FOR THE PEOPLE
FOR EDUCATION
FOR SCIENCE

LIBRARY
OF
THE AMERICAN MUSEUM
OF
NATURAL HISTORY

NOS MAITRES LES OISEAUX

NOS MAITRES LES OISEAUX

Étude sur le Vol animal et la Récupération de l'Énergie dans les Fluides

PAR

Etienne ŒHMICHEN

Ingénieur E. C. P.

—♦♦♦—

PARIS

DUNOD, EDITEUR

Successeur de H. DUNOD et E. PINAT

47 ET 49, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS (VI^E)

1920

—

Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés pour tous pays.
Copr. by Dunod 1920.

A M. J.-L. BRETON

Respectueux hommage

E. O.

INTRODUCTION

Ce livre est le résumé des recherches qu'il nous a été donné de faire sur la question du vol animal, question mystérieuse s'il en fut jamais, pleine à la fois d'embûches et d'attraits. Ces recherches nous ont conduit à l'énoncé de principes particuliers, qui, tout en montrant l'étonnante perfection du mécanisme des ailes chez les êtres volants, ouvrent à l'aviation des perspectives nouvelles et insoupçonnées jusqu'à maintenant. L'oiseau, l'insecte parviennent en effet à se soutenir et à se déplacer dans l'air à grande vitesse, avec une dépense extraordinairement faible d'énergie motrice. On le savait du reste; et ce fut là le point de départ de nos divers travaux d'investigation.

Au cours de ces études, nous eûmes la bonne fortune de pressentir, puis de vérifier par l'expérience une succession de faits qui jettent quelque lumière sur la question, en la rattachant à la technique générale des courants alternatifs à grand décalage, tels que nous les rencontrons en électrodynamique.

Il devenait donc possible de bâtir une théorie spéciale, basée sur ces faits, en accomplissant une sorte de transposition dans le domaine aérodynamique de ce que nous connaissions déjà dans celui de l'électricité. Certes, les phénomènes ne sont pas entièrement comparables, et les principes fondamentaux se prêtent seuls à l'adaptation.

Mais cette manière de faire s'est montrée fructueuse, et

les vérifications expérimentales se sont succédé en foule, apportant presque chaque jour une confirmation nouvelle du bien fondé de notre point de vue.

Ces théories nous ont donc fourni une explication rationnelle du vol à puissance réduite. Elles nous ont permis de prévoir des phénomènes nouveaux, mais elles ne sont pas encore tout à fait complètes. Toutes les déterminations quantitatives sont encore à faire, ou en cours d'exécution. On pourrait donc nous reprocher d'obéir à ce sentiment particulier de hâte, qui pousse certains chercheurs à exposer trop tôt le fruit de leurs travaux. Il n'en est rien pourtant.

Nous ne nous sommes décidé qu'à contre-cœur à publier cet ouvrage, cédant, sur ce point, aux conseils de nos amis et de plusieurs éminents techniciens qui ont bien voulu s'intéresser à nos recherches.

Sans expérience en matière de publication, nous prions nos lecteurs de ne pas trop s'attacher à la forme, dénuée de toute prétention littéraire, et que nous avons maintes fois sacrifiée au souci de clarté qui nous a constamment dominé. Nous nous tiendrons pour pleinement satisfait, si nous avons réussi, par l'élimination des termes scientifiques et des formules, à faciliter quelque peu la lecture de ce petit traité, et à diminuer la complication que présentent automatiquement les théories, toujours délicates, du mouvement des fluides.

Avant d'aborder le sujet lui-même, nous tenons à remercier ici quelques-unes des personnes qui ont bien voulu nous prêter leur concours très efficace et très bienveillant. Notre ami le docteur Marcel Duvernoy, qui a été le témoin constant de nos efforts, et qui nous a initié aux arcanes de la dissection, nous a rendu les services les plus précieux et les plus éclairés. C'est en grande partie sur son insistance que nous nous sommes décidé à publier le présent ouvrage.

Nous adressons à M. Breton, Sous-Secrétaire d'Etat des Inventions de Guerre, et au personnel technique de ses services, nos respectueux remerciements pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu prendre à nos recherches, et pour l'aide constante qu'ils nous ont apportée.

Enfin nous devons à M. Robert Peugeot la plus grande reconnaissance, pour l'appui qu'il nous a donné, depuis le mois de mars 1917, date de notre retour à l'Usine, en mettant à notre disposition le personnel, l'outillage et les matériaux nécessaires.

La direction des travaux pratiques fut assurée, avec un dévouement parfait, par M. Bourgeois, ingénieur attaché à notre service depuis 1912, et qui a réalisé les modèles et les instruments les plus divers avec la plus grande habileté et dans les conditions les plus difficiles.

Nous adressons d'autre part nos remerciements collectifs à toutes les nombreuses personnes qui nous ont apporté leur concours. Nous nous félicitons que la liste en soit infiniment trop longue pour pouvoir la donner ici.

CHAPITRE PREMIER

LA QUESTION DU VOL ANIMAL

Etat actuel de la question

En dépit des efforts obstinés des chercheurs attachés de tout temps à sa poursuite, malgré l'attrait du problème et son apparence de simplicité, quelle que soit enfin la perfection des méthodes d'investigation applicables à ce genre d'études, il faut bien reconnaître que jusqu'à maintenant la question du vol animal n'a pas reçu de réponse.

On ne sait pas comment volent les oiseaux.

Des théories sont nées par centaines, des expériences et des mesures de toutes sortes ont été tentées; le cinématographe et ses dérivés ont saisi et fixé les phases diverses du mouvement des ailes.

Des oiseaux, des insectes de toutes espèces ont accompli leur vol dans le champ des appareils, à la lueur instantanée de l'étréincelle ou des instruments à éclipse; la plaque photographique a enregistré les attitudes, le tambour à stylet a marqué la courbe des efforts musculaires, la dissection a recherché les attaches, le jeu de toute l'ossature; mais l'explication véritable n'est pas venue.

Les meilleures théories sont impuissantes à rendre compte de l'ensemble des phénomènes. En les poussant jusqu'au bout, on tombe toujours dans des contradictions flagrantes avec les faits, et la conclusion reste impossible pour tout observateur de bonne foi.

Marey lui-même, si connu pour ses remarquables travaux sur la question, nous exposant ses vues personnelles, commence par nous annoncer qu'il n'a « pas grand'chose à ajouter à un sujet sur lequel tout a été dit ». Ses propres explications ne lui donnent pas satisfaction. Il comprend ce qu'elles ont d'incomplet, et va parfois jusqu'à douter d'elles.

Les autres théories connues n'approchent pas de plus près la réalité, c'est-à-dire ne rendent pas un compte satisfaisant de la plupart des faits constatés et ne résistent pas au contrôle de l'expérience et du calcul.

Incompatibilité des lois connues de la résistance de l'air avec le vol animal

Si l'on applique les lois connues de la résistance de l'air aux êtres vivants susceptibles de voler, on arrive à peu près à conclure que le vol est, sinon impossible, tout au moins très difficile à réaliser; qu'il exige de l'animal une quantité considérable d'énergie motrice, et qu'il représente, à coup sûr, le plus exténuant de tous les moyens de locomotion. Une pareille affirmation est abondamment démentie par les faits, et quelques exemples nous permettront d'en comprendre la complète absurdité.

a) *Cas du vol au point fixe.*

Considérons tout d'abord un oiseau bon rameur, un pigeon par exemple, pesant à peu près 400 grammes.

Fig. 3

Fig. 1. — Vol au point fixe du pigeon.
Positions des ailes pendant l'abaissement

Chacun sait que cet animal est parfaitement capable de se soutenir en l'air au point fixe, par un battement de ses ailes dans un plan presque horizontal. Il tient alors le corps bien droit, en tendant horizontalement le cou vers l'avant.

Les ailes battent un peu à la manière de deux pales d'hélice suspensive, frappant l'air tour à tour par leur face interne (dessous de l'aile), et par leur face externe (dessus de l'aile), (fig. 1, 2, 3 et 4). Elles changent d'inclinaison à chaque demi-battement, pour donner toujours une poussée de même sens et dirigée verticalement, dans l'axe du corps, de manière à équilibrer le poids de l'oiseau et à le maintenir en l'air.

Fig. 4

Fig. 2. — Vol au point fixe du pigeon.
Positions des ailes pendant l'élévation

Cette attitude, adoptée par le pigeon dans le vol au point fixe, est aussi celle qu'il prend au départ du sol, dans le vol ascendant vertical. La photographie ci-contre (fig. 5), qui montre un départ de pigeons, donne une assez bonne idée de cette curieuse attitude, peu observable au demeurant, parce que l'oiseau ne l'affectionne pas et qu'elle dure généralement très peu.

Si l'on étudie le battement par la chronophotographie par exemple, comme l'a fait Marey, on trouve que l'animal fait à peu près par seconde 8 battements d'aile complets aller et retour. Nous avons trouvé pour notre part que la vitesse moyenne du bout de l'aile était d'environ 6 mètres à la seconde.

Fig. 5. — *Départ de pigeons.*

Remarquer la position verticale du corps particulièrement nette pour le pigeon de droite.

Voilà donc quelques renseignements qui vont nous permettre, semble-t-il, de tirer d'utiles conclusions. Nous nous trouvons, somme toute, en présence d'une espèce d'hélicoptère, du poids de 400 grammes, muni d'une sorte d'hélice alternative à pas réversible, d'un diamètre au plus égal à l'envergure de l'oiseau (soit

65 centimètres environ), et dont la vitesse est telle que le bout de l'aile marche à une allure moyenne de 6 mètres par seconde.

Si l'oiseau ne fait appel pour se soutenir qu'aux lois connues de la résistance de l'air, il est de toute évidence qu'en réalisant une surface identique à tous égards à l'aile de l'animal, et en la faisant tourner autour d'un axe vertical, à une vitesse telle que son extrémité parcourt 6 mètres par seconde, on devrait développer un effort de traction qui serait environ la moitié de celui qu'obtient l'oiseau par le mouvement combiné de ses deux ailes.

Cela revient à dire qu'en fabriquant une hélice, à deux branches cette fois, et dont chaque pale serait intégralement copiée sur l'aile de l'oiseau, on devrait arriver à faire développer à cette hélice un effort de traction de 400 grammes, quand sa vitesse périphérique atteindrait 6 mètres à la seconde.

Or, il s'en faut de beaucoup. Quel que soit le soin apporté à la construction de l'hélice, sorte de transposition dans le domaine continu de l'aile battante ou alternative, nous ne dépasserons pas dans les conditions de vitesse précédentes un effort de traction de 30 à 40 grammes, soit moins du dixième du poids qu'il s'agirait de soulever, et que l'oiseau soulève pour sa part avec une voilure toute semblable, et dans des conditions qui pourraient passer pour comparables.

Il n'y a pas à incriminer la nature des matériaux choisis pour construire l'aile artificielle; la plume, au point de vue qui nous occupe, n'a pas de vertus spéciales. Il est du reste bien facile de s'en assurer, si l'on y tient, en fabriquant, comme nous l'avons fait dans notre première jeunesse, une espèce d'hélice entièrement constituée par des ailes d'oiseau véritable (fig. 6). Ces ailes seraient maintenues à l'inclinaison et à l'extension convenables par quelques légers tendeurs aboutissant à des plaquettes de répartition et assemblés dans un moyeu à double pince destiné à les maintenir solidement à leur emmanchement. L'efficacité resterait la même que pour une hélice présentant des caractères identiques (diamètre, pas et fraction de pas), et construite avec des matériaux ordinaires. S'il y avait une différence, elle serait plutôt défavorable à l'hélice en plumes.

Il n'y a pas grand'chose à retenir, du reste, de cette expérience assez grossière et un peu enfantine, sinon que la nature des plumes et la courbure spéciale des ailes ne jouent pas de rôle bien important dans le cas qui nous occupe.

Fig. 6. — Hélice formée avec des ailes naturelles.

Pour mieux accuser encore le parti que l'oiseau sait tirer de ses ailes, cherchons maintenant ce qui se passerait si l'hélice, chargée de les imiter, tournait à une vitesse telle que la pointe de ses pales parcourre non plus 6 mètres, mais 10 mètres à la seconde. Elle marcherait alors constamment à une vitesse relativement élevée et que les pointes des ailes de l'oiseau de comparaison n'atteignent qu'en certains points seulement de leur course.

Malgré cette exagération de l'allure, le résultat resterait pourtant négatif. Nous passerions, il est vrai, de 30 à 85 grammes comme effort de traction, mais nous serions encore bien loin de l'effort de 400 grammes nécessaire à la sustentation.

Tout cela montre bien que l'oiseau sait utiliser sa voilure infiniment mieux que ne le font nos propulseurs. Et il est logique de penser que toute la différence provient du fait que l'animal procède par alternance.

b) *Cas du planement.*

Nul ne s'étonne de voir planer un oiseau. Les avions nous ont habitués de longue date à ce genre de vol, par les savantes glissades qu'ils accomplissent, moteur arrêté, et il ne semble pas que nous ayons ici quoi que ce soit à envier aux animaux planeurs.

Il se produit pourtant dans ce domaine là quelque chose de surprenant, lorsqu'on en vient aux mesures expérimentales, et qu'on essaie de chiffrer les phénomènes. C'est l'explicable résistance à l'avancement qu'éprouve une *aile morte* que l'on déplace en air calme, ou que l'on soumet à l'essai du courant d'air.

Nous allons voir que si cette résistance était éprouvée par l'aile vivante, le vol plané serait radicalement impossible.

Cherchons tout d'abord à connaître la vitesse absolue du planement, ou vitesse de l'oiseau par rapport à l'air en tenant compte du vent. Nous n'avons pas là-dessus de données bien précises, car il est très difficile de la mesurer avec exactitude. L'absence de points de repère, l'incertitude sur le sens et l'intensité du vent aux différents points de l'atmosphère en rendent la détermination bien délicate, et l'on ne peut espérer mieux que d'assigner à la vitesse de planement des limites entre lesquelles on soit à peu près sûr de la voir se cantonner. Les conditions qui paraissent devoir donner les résultats les moins entachés d'erreur, sont celles d'une observation faite au-dessus d'une plaine bien unie, ou au bord de la mer sur une côte basse, dépourvue d'accidents naturels et aussi plate que possible.

Cette vitesse, comme l'a du reste constaté Mouillard (1), ne varie pas beaucoup quand on passe d'une espèce d'oiseau à une autre, même très différente. Elle paraît du reste assez faible et ne pas dépasser 7 à 8 mètres par seconde, soit environ 26 kilomètres à l'heure.

À la vérité, étant donnés la surface et le poids de l'oiseau, il n'y a là rien de bien extraordinaire. Une très bonne aile artificielle à grande portance pourrait à la rigueur en faire autant.

La surface de 2.500 centimètres carrés, que présentent les deux

(1) Mouillard. — *L'empire de l'air.*

ailes étendues d'un busard, suffit en effet, si le profil en est très bien choisi, pour soutenir le poids du corps (750 grammes environ), lorsque la vitesse de marche par rapport à l'air est de 26 kilomètres à l'heure.

On pourrait, en effet, construire un petit modèle de planeur, capable d'effectuer une glissade planée suffisamment correcte, en lui donnant une surface de 2.500 cmq. et un poids de 750 grammes. Il faudrait cependant particulièrement bien choisir la forme des ailes, pour leur assurer ce chiffre de portance, sans arriver à augmenter par trop la résistance à l'avancement. La réalisation d'un tel modèle serait délicate, mais non pas impossible.

En apparence, il n'y a donc pas de difficulté de principe à appliquer le vol plané de l'oiseau. Malheureusement la question s'embrouille subitement d'une façon totale, quand on étudie les qualités propres d'une aile véritable d'oiseau, d'une aile naturelle, particulièrement en ce qui concerne son degré de pénétration dans l'air.

Soumis à l'action du courant d'air dans les stations d'études aérodynamiques, les oiseaux naturalisés se sont révélés comme offrant à l'air une prise énorme qui les freine énergiquement. Ce sont de détestables projectiles, comme l'on dit en matière d'aérodynamique. Ils *portent mal* et sont *durs à trainer*, si bien qu'avec des ailes semblables à celles des spécimens expérimentés, le vol plané paraît tout à fait impossible.

Or, l'oiseau plane avec la plus grande aisance, même par des vents très faibles, n'atteignant pas 5 mètres à la seconde. Sans perdre d'altitude, et parvenant souvent au contraire à en gagner, il glisse avec une régularité parfaite, qui donne à son vol un caractère d'aisance particulièrement remarquable. Il en faut nécessairement conclure que *l'aile vivante* ne ressemble pas à *l'aile morte*. *Elle agit*, et nous verrons par la suite comment peut s'exercer cette action.

Pour nous en rendre compte avec plus de précision, prenons un spécimen de buse ordinaire, soigneusement naturalisé, et auquel le taxidermiste aura donné la position du vol plané : ailes étendues, queue déployée.

Rendons à ce spécimen, par l'adjonction de petites masses

pesantes, convenablement placées et réglables en position, le poids normal qu'avait l'oiseau de son vivant, soit environ 600 grammes. Puis, lançons horizontalement ce sujet d'un point élevé et en air calme, de façon à tenter de lui faire accomplir une glissade planée, semblable à celles qu'il exécutait continuellement durant son existence. Nous constaterons bien vite qu'il nous est impossible d'obtenir quoi que ce soit qui ressemble à un vol plané, à la descente oblique d'un aéroplane.

Il ne s'agit pas ici d'une répartition défectueuse des masses supplémentaires, car on arrive assez bien par tâtonnements à éviter la véritable culbute. On parvient même à un semblant de stabilité, mais la trajectoire garde le caractère d'une vraie chute, quelle que soit l'altitude du point de lancement. Le spécimen semble de plomb, et se refuse obstinément à prendre la vitesse horizontale de 6 à 8 mètres par seconde dont il aurait besoin pour se soutenir et transformer sa chute brutale en une glissade bien allongée.

Modifications dans l'attaque des ailes, déplacement du centre des pressions par rapport au centre de gravité, par déformation de l'ossature : rien n'y fait. Le résultat reste définitivement négatif.

Ce qui est plus grave, c'est qu'un petit modèle d'avion, de même surface et de même poids que notre spécimen lesté, se comporte mieux que lui et se tient mieux en l'air.

Cette expérience, dont le résultat était à prévoir, confirme la conclusion précédente, savoir : l'intervention certaine de la volonté de l'animal dans le vol plané, en atmosphère tranquille.

Pour invisible qu'elle paraîsse à nos yeux, une oscillation de faible amplitude, une ondulation légère n'en doit pas moins animer l'aile du planeur en air calme ou par vent faible. L'exposé de nos théories montrera combien cette présomption paraît encore s'accroître, et à quel point il serait nécessaire d'entreprendre à ce sujet quelques expériences précises.

Influence des courants aériens

On a cherché à invoquer pour expliquer le planement, par temps calme ou vent faible, sans faire intervenir la volonté de l'oiseau, la mise en jeu de courants aériens, procédant d'une manière

pulsatoire, sortes d'ondes invisibles, échappant à nos sens grossiers, mais que l'oiseau saurait saisir et utiliser. Nous ne pensons pas qu'il en soit ainsi. Cela supposerait une étrange subtilité chez l'oiseau, et pour ces courants eux-mêmes un caractère énergique et soutenu qui s'accorderait mal avec l'impossibilité où nous sommes de les percevoir. La ténuité de ces insensibles actions, si elles devaient jouer un rôle prépondérant, ferait du vol un acte délicat : toute fausse manœuvre, toute erreur dans le déplacement de la voilure se paierait d'une rupture d'équilibre. Or nous savons, pour avoir vu voler des oiseaux mutilés, aux ailes échanquées, abîmées par des accidents de toutes sortes, que les éclopés de l'air se tirent mieux d'affaire que les boiteux sur la terre ferme.

Au reste, une action des courants aériens, assez peu marquée pour nous échapper complètement, ne nous paraît pas suffire pour combler l'énorme lacune. L'écart est trop grand entre ce dont aurait besoin l'oiseau pour voler, et ce que peuvent lui apporter ces menues bouffées d'air, ces minces courants ascendants ou autres. D'ailleurs le phénomène serait évidemment susceptible de variations et de variations capables d'aller jusqu'à suppression totale. L'oiseau devrait donc, à chaque instant, en tenir compte, et modifier son allure en conséquence.

Et qu'arriverait-il si cette aide extérieure venait à faire complètement défaut ? Le vol ramé resterait seul praticable, sans aucune possibilité, si faible soit-elle, d'un planement quelconque. Encore que les oiseaux préfèrent planer quand il y a du vent, et s'en abstiennent à peu près complètement par temps calme, il leur arrive cependant de faire de ces longues glissades en atmosphère parfaitement tranquille.

Sans vouloir mettre en doute un seul instant le fait que l'oiseau *sait* se servir du vent, des courants d'air de toute espèce qu'il est amené à rencontrer ; que son instinct le guide à merveille dans la recherche des éléments favorables et l'aide à éviter tous ceux qui pourraient lui nuire, il faut bien admettre qu'il sait aussi *se passer* de ces divers facteurs, utiles mais secondaires pourtant, parce que trop peu importants et sujets à de trop grandes variations.

Capable de rétablir à chaque instant son équilibre par des mou-

vements d'ailes instinctifs et précis, il lui serait trop imposé s'il devait encore faire appel, pour sa marche elle-même et pour son soutien, à des actions extérieures subtiles et discontinues. Il serait le jouet de l'air, et non pas maître dans l'air.

Du reste, sans attribuer d'autre importance à ces dernières raisons, nous retiendrons simplement le fait que l'oiseau réussit à planer plus ou moins longuement en air calme, au moment de l'atterrissage en particulier. Il n'en faut pas davantage pour pouvoir conclure à la nécessité d'une intervention de l'oiseau sur son aile, intervention qui a pour effet probable d'en produire le frémissement ou l'ondulation, ce qui, comme nous le verrons par la suite, peut provoquer la mise en jeu de toute une succession de phénomènes spéciaux, parmi lesquels nous retrouverons encore celui ou ceux qui nous donneront la solution du problème.

c) Cas du vol ramé horizontal.

Par opposition à cette résistance de l'aile morte, et en faveur de la pénétration de l'aile vivante, pour démontrer aussi combien le vol animal est un mode de locomotion peu fatigant et très différent de notre vol mécanique, nous citerons l'exemple bien connu du pigeon voyageur. On sait que ces oiseaux sont capables d'accomplir des trajets énormes, atteignant des milliers de kilomètres, dans des circonstances atmosphériques dont on ne leur laisse pas le choix. Leur habitude est d'accomplir leur vol d'une seule traite sans escale. Du reste, ils ont à cette façon directe de voyager une raison majeure, lorsque le lâcher s'accomplit en pleine mer. Bien souvent ils ont à surmonter la résistance du vent, comme c'est le cas lorsqu'on les abandonne d'un ballon sphérique libre, et dont la destinée est de marcher avec le vent, ce qui impose au pigeon la nécessité d'avoir à le vaincre pour rentrer au colombier.

Des expériences ont été faites par des propriétaires de pigeons, qui ont pesé leurs messagers avant et après le voyage. On n'a jamais constaté qu'une perte de poids tout à fait insignifiante à la suite du trajet, ce qui suppose une dépense musculaire d'énergie très restreinte, pas disproportionnée en tous cas avec celle que l'oiseau peut normalement fournir.

S'il en est ainsi, et sachant toute la résistance qu'éprouve à son déplacement la paire d'ailes d'un spécimen inanimé, il est nécessaire, au cas où cette résistance resterait la même chez l'animal vivant, que celui-ci soit doué d'une musculature extraordinaire, capable sans trop de fatigue de briser le gros obstacle que l'air oppose à sa marche. Il n'en est rien pourtant.

Les expériences de Marey sur les muscles des oiseaux n'ont rien révélé de spécial, pas plus au point de vue de la quantité qu'à celui de la qualité. Ce sont des muscles ordinaires, pas de beaucoup supérieurs à ceux des mammifères du même poids, et présentant la même énergie contractive par centimètre carré de section ; quant à leur volume, tout le monde le connaît : ce sont eux qu'en langage gastronomique on désigne sous le nom de *filets* de l'oiseau. Ils n'ont rien d'extraordinaire pour la taille de la bête ; développés certainement, mais pas beaucoup plus que ceux des cuisses qui n'ont pourtant pas d'efforts spéciaux à accomplir.

En résumé, qu'il s'agisse du vol au point fixe, du vol plané ou du vol ramé, l'oiseau présente vis-à-vis de nos lois actuelles d'étranges anomalies. Il se soulève et progresse avec une dépense infime d'énergie musculaire, alors que toutes les données que nous possédons sur la question nous conduisent à des conclusions contraires. Le principe même du vol nous échappe donc encore.

Origine des Erreurs

La raison principale qui a empêché jusqu'à présent tous les expérimentateurs de formuler une théorie vraiment acceptable et que l'observation ne puisse pas démentir, tient au fait que nous ne connaissons encore qu'une bien faible partie des lois qui régissent les mouvements des fluides, ceux de l'air en particulier.

Toutes nos connaissances se résument en effet aux résultats d'expériences qui ont exclusivement porté sur les efforts exercés sur un corps quelconque par un courant d'air régulier et *continu*.

L'ensemble de ces résultats, groupés sous le titre de lois de la résistance de l'air, constituait donc le seul bagage mis à la disposition des théoriciens pour l'accomplissement de leurs études.

Or, il est indispensable de sortir du cadre étroit de ces lois particulières pour trouver la solution du problème, car, ainsi que nous allons l'exposer, l'oiseau doit être considéré comme un générateur de courants d'air *alternatifs* ou *ondulés*.

Phénomènes d'inertie dans les courants alternatifs ou intermittents

Les courants d'un fluide sont toujours provoqués par une cause motrice extérieure, dont la grandeur et l'espèce déterminent, dans chaque cas particulier, l'intensité et la nature du courant produit.

Une cause motrice régulière et continue (telle qu'une différence de niveau constante, dans le cas d'un liquide), provoque l'apparition d'un courant de fluide qui est lui-même continu.

Lorsque la cause motrice est variable, le courant qui en résulte l'est également. Si la cause est *alternative*, c'est-à-dire s'exerce tantôt dans un sens et tantôt dans l'autre, le courant cherche à suivre ces fluctuations et affecte, lui aussi, un caractère *alternatif*.

Or, quand on passe du mouvement continu d'un fluide au mouvement alternatif, on voit se manifester toute une série de phénomènes dus à l'inertie du fluide et qui ont pour résultat d'agir profondément sur les propriétés du courant et sur la puissance à mettre en jeu.

Supposons qu'une cause motrice quelconque ait provoqué un mouvement dans un fluide, tel que l'eau par exemple ; si cette cause de mise en mouvement des molécules vient à cesser tout à coup, le courant cependant ne s'arrête pas aussitôt. Les diverses particules de l'eau possèdent en effet un certain élan, une certaine vitesse acquise, qui ne peut pas s'éteindre instantanément.

Ces particules pesantes continuent donc le mouvement commencé, jusqu'à ce que, par frottement contre leurs voisines ou contre les parois du récipient qui les contient, elles aient épuisé toute la *force vive*, toute l'énergie de mouvement qu'elles possédaient.

Inversement, lorsqu'une cause quelconque intervient pour provoquer dans le fluide un mouvement déterminé, les particules (toujours en raison de leur masse) ne se mettent pas toutes immédiatement en route et n'atteignent qu'au bout d'un certain temps leur régime de marche normal.

Fig. 7. — Auge circulaire à vannette mobile.

La vannette est animée d'un mouvement alternatif par une bielle assujettie sur le plateau manivelle du moteur électrique.

Cette sorte de paresse à la mise en train et cette tendance à continuer le mouvement quand la cause motrice a disparu constituent les *phénomènes d'inertie*.

Dans les courants alternatifs ils ont pour effet de provoquer souvent des retards ou décalages considérables du mouvement du fluide, sur la cause périodique qui détermine leur apparition.

Vérification expérimentale des phénomènes d'inertie dans les mouvements alternatifs ou intermittents

Les phénomènes d'inertie périodiques peuvent être mis en évidence, dans le cas d'un courant d'eau alternatif, par une expérience très simple.

Prenons une auge circulaire, pareille à celle dont nous donnons ci-contre la photographie (fig. 7). Elle est constituée, comme l'on voit, par un récipient annulaire, découvert à sa partie supérieure, et contenant de l'eau jusqu'à la moitié de sa hauteur. Dans cette auge, disposons une vannette, sorte de plaque mobile, épousant, sans y toucher toutefois, les parois et le fond du récipient, et montée sur un bras horizontal. Celui-ci peut osciller autour d'un axe vertical, placé au centre du récipient. Un moteur électrique, muni d'une bielle, met en mouvement alternatif le bras et la vannette, à telle vitesse que l'on désire (fig. 8).

Fig. 8. — Auge circulaire à vannette mobile (schéma).

Lorsque la plaque mobile, que nous supposerons osciller de part et d'autre d'une position représentée en A sur le schéma, arrive à l'extrémité gauche de sa course, position représentée en B, l'eau, refoulée dans tout le récipient circulaire, et qui possède à cet

instant une certaine vitesse de marche, continue visiblement son mouvement (fig. 10); il faut que la vannette soit déjà revenue passablement en arrière, c'est-à-dire vers A, pour que le courant veuille bien s'arrêter, puis repartir en sens inverse (fig. 11).

Il y a donc retard entre le courant d'eau et sa cause déterminante, qui est ici le mouvement de la vannette. Continuant sa marche vers A, puis vers C, celle-ci refoule l'eau devant elle et lui communique une allure progressivement croissante (fig. 12). Quand elle s'arrête en C, les choses se passent de la même façon qu'à l'extrémité B, et le courant persiste dans le sens A C (fig. 13) bien après l'arrêt de la vannette et son retour en arrière vers la position A.

Le défaut d'obéissance du liquide aux indications de la vannette se traduit, dans chaque cas, par une accumulation anormale de l'eau qui s'entasse et déferle contre la face marchante, et par un vide, ou dépression sur la face rentrante, sans pour cela que le liquide occupant la plus grande partie du récipient cesse de marcher à la rencontre de la vannette et tende ainsi à contrarier son mouvement.

Voilà donc un phénomène de retard, où se mettent en évidence simultanément la lenteur ou paresse à la mise en route des molécules d'eau, dans le sens où tend à les pousser la cause motrice, ainsi que la persistance du mouvement dans sa direction première, lorsque la cause motrice agissant dans ce sens a cessé d'exister et qu'une nouvelle cause est même apparue en sens inverse de la précédente.

Ce défaut de concordance entre le courant et sa cause déterminante est bien connu des électriciens : c'est le décalage des courants alternatifs relativement à la force électro-motrice. On sait d'ailleurs que lorsque ces deux facteurs, courant et force électro-motrice, arrivent à montrer entre eux un décalage tel qu'ils en viennent à marcher pour ainsi dire à contre-temps, c'est-à-dire que l'un des deux soit maximum quand l'autre est nul et vice versa, le courant ne demande plus aucune énergie mécanique pour sa production. Il suffit, pour l'entretenir, de compenser les pertes dites d'amortissement, qui peuvent être réduites à peu de chose.

Un phénomène identique se passe dans le cas de l'eau, dans

9)

10)

11)

12)

13)

Fig. 9 à 13. — Auge circulaire à vannette mobile.

Schémas des dénivellations de l'eau et des courants produits par le mouvement de la vannette.

l'expérience de l'auge circulaire. A une certaine vitesse, et pour une certaine amplitude de marche de la palette, on constate que la puissance absorbée par le moteur électrique passe par un minimum. A cet instant il est aisé de voir que le courant marche à contre-temps de la différence de niveau, c'est-à-dire que celle-ci est maximum quand la vannette est arrêtée à bout de course, et nulle au contraire quand la vannette marche le plus vite; elle se trouve à cet instant au point A, milieu de sa course.

Il n'est pas aussi facile de montrer le phénomène dans l'air car les courants n'y peuvent être que plus difficilement perçus. Mais sans aller jusqu'à la reproduction intégrale de l'expérience précédente, il est aisé cependant de montrer, par divers exemples, la persistance du mouvement de l'air après disparition de la cause motrice. C'est notamment le cas de ce qui se passe lorsqu'on souffle fortement, et pendant un temps très court, sur la flamme d'une bougie placée à une certaine distance. On voit arriver l'air en mouvement sur la flamme, avec un retard très appréciable sur l'instant de l'émission du courant. Bien que ce ne soit pas, à proprement parler, l'air expiré qui parvienne jusqu'à la bougie, il n'en reste pas moins vrai que le mouvement de l'air a persisté, par inertie, alors que toute cause motrice avait cessé.

Il en est de même pour la colonne d'air qui marche derrière un véhicule en mouvement, et qui se décèle par le nuage de poussière soulevée. Partie à la poursuite du véhicule dans les premiers instants, puis bientôt distancée, elle termine sa carrière en tourbillonnements. La persistance du mouvement par inertie est ici manifeste, puisque la cause perturbatrice (dépression que le véhicule traîne derrière lui et qui lui reste accolée) a cessé depuis longtemps de se faire sentir aux points où l'agitation subsiste.

Intervention des phénomènes d'inertie dans le vol animal

D'après ce qui précède, il est évident que, constitués en générateurs de courants d'air alternatifs, l'oiseau, et d'une façon générale tous les êtres volants, doivent ressentir les effets des phénomènes

d'inertie alternatifs que provoque nécessairement le jeu de leurs ailes battantes. Il est donc probable que la nature a dû les mettre à même de retirer de ces phénomènes les bénéfices que ceux-ci sont susceptibles de leur fournir. Nous verrons que tous les êtres doués de la faculté de voler y puisent en effet la majeure partie des forces nécessaires à les soutenir en l'air et à les faire avancer avec une dépense minime d'énergie musculaire.

La suite de cet ouvrage fournira sur ce sujet, d'apparence compliquée mais clair et simple au fond, toutes les explications nécessaires pour en saisir le principe et les détails.

Les nouvelles théories que nous exposerons dans un prochain chapitre ont besoin, pour être comprises, de quelques explications sur les courants produits, dans l'air ou dans l'eau, par le mouvement d'un corps qui s'y trouve entièrement plongé. Nous commencerons donc par exposer nos vues sur le genre et le mode de production de ces courants, désignés jusqu'à présent sous le nom vague de remous.

L'étude et le classement de ces courants de remous en deux catégories distinctes, l'application à leur production et à leur marche des principes généraux de l'inertie, nous conduiront à l'énoncé de plusieurs propositions importantes.

Adaptées au cas du vol animal, ces mêmes propositions ont apporté une réponse satisfaisante à l'ensemble des problèmes posés mais non résolus jusqu'à ce jour. Nous verrons en outre que toute cette nouvelle technique ouvre sur diverses questions, notamment sur celle de la navigation, tant aérienne que maritime, des aperçus nouveaux, capables d'amener d'importants progrès dans le domaine pratique.

CHAPITRE II

LES COURANTS DE REMOUS

Circulaires Antéro-Postérieurs. — Onde de Suite Phénomènes d'inertie qui les accompagnent

Considérons un corps solide en déplacement uniforme dans l'air. Ce sera par exemple un cylindre plein, à bases circulaires, se déplaçant le long de son axe d'un mouvement rectiligne, à vitesse constante. Ce cylindre marche à peu près comme un obus couché sur sa trajectoire, que nous supposerons être une ligne droite, pour plus de simplicité.

Fig. 14. — Schéma des remous qui se forment autour d'un cylindre en marche dans l'air.

(Circulaires antéro-postérieurs)
Trajectoires relatives

Circulaires Antéro-Postérieurs

Sur la face avant ou face marchante, l'air refoulé subit un commencement de compression. Les molécules, en s'écartant, s'écrasent les unes contre les autres, et la pression est plus forte en ce point que dans le reste de l'atmosphère. A l'arrière, les molécules sont plus rares, car le cylindre se comporte un peu comme un piston que l'on tire dans un corps de pompe, et tendant à faire le vide à sa suite. Il y a donc un déséquilibre atmosphérique entre l'avant du cylindre, qui est en surpression, et l'arrière qui se trouve en dépression. Le résultat normal en est l'apparition de courants particuliers, qui cherchent à rétablir l'équilibre ainsi rompu, et poussent leur cortège de molécules depuis les points en surpression jusqu'à ceux qui sont en dépression (fig. 14).

Ces courants ne pouvant traverser le corps, qui est plein, le con-

Fig. 15. — *Disque en déplacement normal dans un fluide.*
Trajectoires relatives des circulaires.

tournent en glissant sur ses côtés et en décrivant des trajectoires qui ont quelque analogie avec les lignes de force d'un aimant droit. Ces trajectoires, courbes généralement, ne s'écartent que peu du

corps. En raison de leur forme arrondie, et pour rappeler le sens du mouvement moléculaire, nous avons nommé ces courants les *circulaires antéro-postérieurs*.

Si le cylindre perd de la hauteur et finit par se réduire à ses deux bases, on a à faire à un plan mince; les circulaires sont alors très facilement décelables, et nous avons pu les apercevoir nettement, avec leur forme arrondie ou plutôt légèrement ovale, au cours d'une expérience stroboscopique, faite à Beaulieu, en avril 1917, et décrite à la fin de cet ouvrage (fig. 15).

Quelques détails sont nécessaires pour achever la description de ces circulaires. Tout d'abord, il ne faut pas oublier qu'ils n'affectent cette forme simple de trajectoire incurvée allant d'un point fixe à un autre point fixe, que pour un observateur placé sur le corps en mouvement, et se mouvant par conséquent avec lui. Au point de vue absolu, ou si l'on veut pour un observateur immobile, leur trajectoire est naturellement tout autre, puisque leurs points de départ et leurs points d'arrivée sont eux-mêmes mobiles avec le corps, et se déplacent par rapport au sol.

Considérons par exemple une molécule située au point A de la trajectoire du cylindre. D'abord immobile tant que le cylindre est loin, elle est ensuite refoulée par ses voisines de droite, bousculées elles-mêmes par la face avant du cylindre en marche, qui déblaie devant lui l'atmosphère (fig. 16). L'entassement s'accroît à mesure que le cylindre approche, et la molécule est bientôt rejetée, par expansion, sur les côtés de la route suivie par le cylindre. Elle reçoit en même temps une poussée qui la chasse en avant. Son départ s'effectue donc obliquement, et elle parvient de la sorte au point A₁ (fig. 17).

Dans toute cette partie de son parcours, elle s'est heurtée contre les molécules situées à sa gauche, qui, en lui résistant, produisent un accroissement de pression. Dès qu'elle émerge, c'est-à-dire dès qu'elle atteint le bord de la base du cylindre, rien ne fait plus obstacle à son expansion, et la pression qu'elle subit toujours de la part de ses voisines vient la refouler violemment en arrière, jusqu'en un point A₂ (fig. 18).

Cette tendance est d'ailleurs accrue par l'attraction qu'exerce

sur elle la dépression qui existe à l'arrière du cylindre. Elle part donc à grande allure vers ce centre d'attraction qui, marchant avec le corps, accourt à sa rencontre. Elle se recourbe en volute pour le rattraper quand il passe sous elle. Elle reprend alors sa marche

Déplacement d'un cylindre dans l'air.

Fig. 16 à 19. — Schéma des positions successives prises par une molécule faisant partie d'un circulaire antéro-postérieur.

Fig. 20. — Trajectoire relative complète.

Fig. 21. — Trajectoire absolue complète.

dans sa direction première, à la poursuite cette fois du cylindre, qui l'avait primitivement rejetée vers l'avant et en dehors de sa route. Elle est alors parvenue au point A_3 (fig. 19), où elle se trouve en compagnie d'autres molécules, ayant parcouru des chemins analogues; toutes continuent leur course en avant, cherchant à rejoindre le centre d'attraction constitué par la face arrière du cylindre, et qui s'enfuit devant elles. Mais elles en sont bientôt séparées par une distance qui ne fait qu'augmenter, car d'autres molécules, telles que B, ultérieurement repoussées, puis aspirées dans le cortège, ne cessent pas de s'insinuer entre elles et la zone attirante vers laquelle elles tendent (fig. 22), si bien que l'effet attractif cesse bientôt de se faire sentir. Elles courent encore quelque temps par inertie puis leur force vive s'épuise en frottements contre leurs voisines, des tourbillons prennent naissance, et les molécules finissent par revenir à l'immobilité. Celle que nous avons considérée est en A_4 à présent (fig. 21). Elle est loin de son point de départ. Ecrasée puis attirée, elle a cheminé en pure perte et se retrouve, en fin de compte, à forte distance de sa position primitive.

Fig. 22. — *Déplacement d'un corps dans l'air.*

Trajectoires absolues décrites par deux molécules d'air A et B placées l'une devant l'autre en atmosphère calme et successivement rencontrées par le corps en marche.

La molécule a exigé toutefois, pour cette mise en mouvement, une certaine quantité d'énergie qui s'est traduite par une résistance à l'avancement du corps. Cette énergie s'est ensuite dissipée en chaleur, par frottements de la particule contre ses voisines, sans possibilité de récupération.

Voilà bien du travail perdu ! S'il était possible de rentrer en sa possession, n'y aurait-il pas là un intérêt considérable, au point de vue de la puissance à dépenser pour la pénétration ? Il est à remar-

quer que rien à priori ne s'oppose à cette reprise d'énergie, et nous verrons dans le prochain chapitre de quelle manière elle peut avoir lieu.

Un dernier point resterait à établir pour en finir avec les circulaires antéro-postérieures. C'est la justification de la boucle figurée dans la trajectoire absolue. En d'autres termes, il faut montrer que, par rapport au sol, les molécules aériennes reviennent bien *en arrière* du mouvement du corps, pendant un temps d'ailleurs assez court.

Nous avons fait à ce sujet une expérience qui en donne la preuve. Ayant placé sur une automobile un petit châssis portant un plan incliné, dont les efforts de soulèvement par l'air étaient transmis à un dynamomètre (fig. 23), nous avons installé ce plan à des hauteurs variables au-dessus du plancher de la voiture. Nous l'avons placé d'abord à peine au-dessus de la glace pare-brise (fig. 24), puis, développant le châssis dans toute sa hauteur, nous avons juché notre plan à une hauteur de deux mètres au-dessus du niveau supérieur de cette même glace (fig. 25).

Dans le premier cas, le plan était sur le parcours des circulaires antéro-postérieures. Dans le second, il était placé suffisamment haut pour qu'il fût possible de négliger l'action qu'auraient pu avoir sur lui les remous de la voiture. Nous avons alors constaté que pour un même angle d'attaque, le plan était beaucoup plus énergiquement soulevé quand il était au ras du pare-brise, que quand il était haut placé.

Or, dans cette dernière position, la vitesse du plan par rapport à l'air est précisément égale à celle de la voiture elle-même, puisqu'on suppose le plan assez haut pour échapper à l'action des remous produits par la marche de l'automobile. Si donc, en ramenant le plan au voisinage du pare-brise, on trouve des poussées plus importantes, c'est qu'en ce point-là, l'air que l'on rencontre n'est plus immobile, comme c'est le cas pour les points éloignés de la voiture; il vient au contraire au devant du véhicule, et circule par conséquent en sens inverse de celui-ci.

L'endroit où le phénomène se manifeste est, comme nous l'avons dit, sur le parcours des circulaires. Ceux-ci commencent

Fig. 23 à 25. — Circulaires autour d'une automobile en marche.

Fig. 23. — Disposition du plan d'épreuve.

Fig. 24 et 25. — Schémas de l'expérience.

donc bien par revenir en arrière (1) et leur trajectoire absolue affecte bien la forme d'une boucle. La courbe présente un point double, c'est-à-dire qu'il existe un point P de l'espace par où la molécule passe deux fois (fig. 22).

En résumé, considérés au point de vue relatif, c'est-à-dire pour un observateur marchant avec le cylindre, les circulaires antéro-postérieurs possèdent une trajectoire telle que l'indique la figure 20, et qui justifie le nom que nous leur avons donné.

Au point de vue absolu, c'est-à-dire pour un observateur immobile ou par rapport au sol, leur trajectoire affecte la forme de la figure 21, qui correspond à un déplacement dans le sens du mouvement avec une boucle à son début. De toutes façons ils représentent des courants de remous qui absorbent, pour leur production, une certaine énergie, laquelle se manifeste par une résistance à l'avancement. En temps normal, ils dissipent cette énergie en frottements contre les éléments voisins, après le passage du corps.

Onde de Suite

Nous avons considéré précédemment ce qui se passait pour une molécule placée sur la route suivie par le cylindre. Examinons maintenant ce qui peut arriver pour des molécules qui attendent le passage du cylindre en se tenant, non plus sur la voie qu'il parcourt, mais simplement à proximité de celle-ci.

Au moment où arrive l'avant du cylindre, ces molécules, telles que A (fig. 26), sont un instant refoulées et comprimées par celles qui vont constituer les circulaires antéro-postérieurs, puis elles voient défiler devant elles le corps du cylindre. Quand l'arrière passe, traînant à sa suite une intense dépression, les molécules se mettent en route sous l'influence attractive que cette dépression vient exercer sur elles (positions A A₁ A₂ A₃, fig. 26 à 29); elles

(1) On pourrait attribuer l'accroissement d'effort sur le plan d'épreuve, au voisinage du pare-brise, à l'existence d'un courant d'air ascendant produit par le plan vertical de la glace. Ce courant existe; mais on constate tout de même un accroissement d'effort quand on s'arrange pour supprimer ses effets. On y parvient en disposant le plan d'épreuve verticalement. Les conclusions restent les mêmes qu'avec un plan oblique.

marchent ainsi parallèlement aux extrémités terminales des circulaires, et cheminent avec eux, se dirigeant surtout vers le centre de la base attirante, aux points que les circulaires n'atteignent pas eux-mêmes. Il se forme ainsi un second cortège d'accompagnement, très voisin du premier, et provenant des éléments de l'atmosphère

A.

Fig. 26 à 29. — Déplacement d'un corps dans l'air.

Schéma des positions prises successivement par une molécule d'air faisant partie de l'onde de suite.

phère très proches des points de passage du cylindre, mais qui n'ont cependant pas été heurtés directement par celui-ci.

Tout comme dans le cas des circulaires, le mouvement des molécules ainsi mises en route se trouve arrêté au bout d'un certain temps par l'interposition entre elles et le centre d'attraction

qu'est la face arrière du cylindre, de nouvelles molécules provenant des couches d'atmosphère ultérieurement traversées par cette face. Cette insinuation progressive distance bientôt les molécules d'accompagnement qui finissent par s'arrêter et par dissiper en tourbillonnements ce qui pourrait leur rester de force vive.

A ce second cortège, dont les éléments ne décrivent pas de boucle initiale et dont la mise en train résulte de l'attraction ou succion exercée par la face arrière du corps en marche, nous avons donné le nom d'*onde de suite* (fig. 30) (1).

Comme les remous n'ont pas été jusqu'à présent réellement

Fig. 30. — *Déplacement d'un corps dans l'air.*

Trajectoire absolue de l'onde de suite.

étudiés et classés, nous proposons ces dénominations de circulaires antéro-postérieures et d'onde de suite, sans y tenir toutefois particulièrement. Si quelque dénomination meilleure était suggérée, nous l'adopterions bien volontiers. Celles-ci sont assez commodes

(1) Plusieurs auteurs admettent que derrière un corps en marche dans l'air il se forme une sorte de poupe fluide dont les éléments ne se renouvellent pas. Si cette poupe à éléments constants existe réellement, elle ne peut être que de peu d'importance, car les spectres aérodynamiques montrent tous qu'il y a pénétration des filets de fumée et par conséquent renouvellement des éléments au voisinage presque immédiat de l'arrière du corps.

Sans qu'il soit nécessaire d'aller chercher très loin la démonstration des faits, on peut faire observer tout simplement que si les éléments restaient toujours les mêmes on verrait, par exemple, derrière une automobile en marche, tourbillonner toujours les mêmes poussières et les mêmes corps légers. Or il n'en est rien. Les corpuseules qui font cortège à une voiture en marche l'abandonnent tous au bout d'un certain temps, si légers soient-ils, si aptes par conséquent à rester dans des courants intenses. Il y a perpétuellement appel de nouvelles masses, et ces masses ne rentrent dans le repos qu'après un parcours marqué accompli dans le sens de la marche, et au bout d'un temps relativement long.

cependant, et nous les garderons jusqu'à la fin de cet exposé, car elles facilitent passablement les explications.

En résumé, nous réserverons le nom de *circulaires antéro-postérieures* aux courants de remous constitués par la mise en cortège des molécules situées auparavant *sur le passage même du corps*. Ces courants se caractérisent par une boucle initiale, suivie d'une course plus ou moins prolongée à la poursuite du corps en marche. Nous appellerons *onde de suite* la deuxième catégorie de courants de remous, constitués par la mise en cortège de molécules situées auparavant non plus sur le parcours même, mais à *proximité du passage du corps*. Ces courants n'ont pas de boucle initiale, et, n'obéissant que peu à l'influence de la surpression qui règne à l'avant, ont pour cause motrice principale la dépression qui persiste à l'arrière du corps.

Les deux cortèges voient leurs éléments perpétuellement renouvelés par de nouvelles bousculades et de nouveaux appels. C'est donc une dépense d'énergie continue, et qui dure tant que le corps est en marche. La mise en vitesse de ces masses d'air absorbe une certaine quantité de travail, qui doit être nécessairement emprunté à la source d'énergie produisant le mouvement du corps.

Ce travail à fournir est une des causes principales de la résistance à l'avancement. Comme il peut atteindre des proportions considérables, quand la section du corps est grande et que ce corps marche vite, on comprend tout l'intérêt qu'il pourrait y avoir à rentrer en possession de tout ou partie de cette énergie, ou, autrement dit, à la récupérer.

Application au cas des Plans minces

a) *Plan normal à l'air.*

Nous allons appliquer les précédents principes à l'étude rapide des plans minces qui, au point de vue du vol, présentent un intérêt particulier, puisque c'est avec eux que l'on peut faire des ailes ou des branches de propulseurs.

Tout d'abord, le cas du plan normal n'offre rien de spécial.

C'est tout simplement le cylindre de tout à l'heure, dont la hauteur se réduit à n'être plus que très peu de chose. Le corps devient alors un disque mince et rond, marchant normalement à l'air (fig. 15).

Les circulaires antéro-postérieurs se répartissent avec une absolue symétrie tout autour du disque, formant une espèce de

Fig. 31. — *Déplacement d'un disque dans l'air.*
Circulaires et onde de suite.

bourrelet sur ses bords, bourrelet un peu dissymétrique, aplati sur la face marchante, allongé derrière la face rentrante, et présentant à peu près l'aspect qu'indique la figure 31.

L'onde de suite est de même tout à fait régulière. Elle vise les portions centrales du disque, où ses éléments côtoient les parties terminales des circulaires, avec lesquels ils achèvent leur carrière.

Comme tout se passe absolument symétriquement, le point d'application de la résistance ou centre de pression, est tout naturellement placé au centre de figure, soit, dans le cas actuel, au centre du disque.

Il est bien facile d'apercevoir les circulaires et l'onde de suite provoqués par la marche d'un plan mince normal à sa trajectoire, et progressant dans l'eau. Il suffit de prendre une petite règle plate en bois et de la faire se déplacer normalement, dans un récipient assez vaste et contenant de l'eau à la surface de laquelle on a jeté un peu de poudre d'amidon. On voit, avec la plus grande netteté, se former les circulaires. L'onde de suite s'aperçoit de même, quoique avec un caractère moindre de précision. Il est facile en tous cas de constater l'absolue symétrie des phénomènes, symétrie qui était d'ailleurs bien évidente.

Fig. 31 bis. — *Déplacement d'un plan incliné dans l'air.*
Circulaires antéro-postérieurs. — Trajectoires relatives.

Pour apercevoir ces mouvements dans l'air, il est utile de faire appel à la méthode stroboscopique. (Voir la fin de cet ouvrage).

b) *Plan incliné.*

Ce cas présente un intérêt particulier, parce que c'est tout à fait celui d'une aile. Nous l'étudierons en partant du cas précédent.

Supposons qu'au lieu de déplacer le plan en le tenant toujours perpendiculaire à sa trajectoire, on l'incline d'abord un peu sur celle-ci. Que va-t-il alors se passer ?

Les molécules des circulaires antéro-postérieurs qui doivent contourner le bord d'attaque (fig. 31), au lieu d'être simplement refoulées transversalement à la trajectoire, pour revenir ensuite en arrière, seront d'abord fortement rejetées vers l'avant de M en M' (fig. 31 bis), en raison de l'inclinaison du plan qui les domine en les

surplombant. Elles auront, si l'on veut, à escalader non plus un mur à pic, mais un rentrant, ce qui présente plus de difficulté. Pour parvenir au bord A, il faut en effet qu'elles marchent avec le plan pendant un temps d'autant plus long, et à une vitesse dont la composante parallèle à la trajectoire est d'autant plus élevée que le plan est davantage incliné sur la verticale.

Les molécules situées vers l'avant, en des points tels que C', offrent à cette progression qui tend à les refouler, toute la résistance de leur propre inertie. La marche des circulaires se trouve

Fig. 32. — *Déplacement d'un plan incliné dans l'air.*

BC. Chasse relative.

donc gênée sur cette portion de son parcours, la pression augmente et leur vitesse diminue. La conséquence en est un affaiblissement des circulaires sur le bord d'attaque.

En ce qui concerne les circulaires antéro-postérieurs qui doivent contourner le bord arrière, les faits sont complètement renversés. Dans cette partie, les circulaires, loin d'avoir à escalader un rentrant, n'ont qu'à suivre une pente qui leur offre un facile chemin de descente, constitué par le plan lui-même. Les molécules situées à gauche (GG) leur facilitent les choses en leur donnant, par expansion, la poussée nécessaire; les circulaires arrivent donc au bord arrière animés d'une grande vitesse et soumis à une faible pression.

En raison de cette vitesse acquise, ils mettent plus de temps à se recourber en volutes, et le diamètre de celles-ci s'accroît. L'ensemble présente alors l'aspect de la figure 32. Toute la partie droite,

comprise entre B et les points plus éloignés tels que C, peut être considérée comme constituant la « chasse » d'air sous le plan.

Il est à remarquer que cette manière de voir conduit tout naturellement à expliquer que le centre des pressions (ou point d'application de la résultante des actions de l'air sur le plan) doit être, cette fois-ci, plus rapproché du bord d'attaque que dans le cas précédent.

Si l'on se reporte en effet à ce que nous venons de dire, on voit que la pression augmente sous la partie avant du plan, et qu'elle diminue sous la partie arrière. Au bord d'attaque les circulaires sont moins intenses qu'au bord arrière, et, comme ce sont eux qui sont chargés de combler la dépression dorsale, il en résulte que cette dépression s'accroît en avant et diminue vers l'arrière. Toutes ces actions concourent à faire soulever le plan plus énergiquement par l'avant et ainsi s'explique, d'une manière toute simple, le fait déjà bien connu du rapprochement du centre de pression du bord d'attaque, lorsque le plan s'incline sur sa trajectoire.

Quant à l'onde de suite, elle provient surtout des régions supérieures, car l'extension des circulaires ou « chasse » gêne la mise en train des molécules qui sont au-dessous du plan. Le cortège se forme normalement, par une descente droite qui se courbe brusquement et part à la poursuite du plan à la manière ordinaire.

Comme nous l'avons déjà dit, il est à remarquer que les trajectoires précédemment tracées pour les circulaires sont des trajectoires relatives. Il serait nécessaire de les développer pour passer aux trajectoires absolues. Nous n'avons pas besoin d'en venir là car cette manière de voir n'explique pas mieux les faits, et parfois même en rend la compréhension moins facile.

Qu'on veuille donc bien nous pardonner de n'avoir pas identifié les points de vue. C'est un simple souci de clarté, et non pas autre chose, qui nous a fait considérer les trajectoires des circulaires au point de vue relatif, et celles de l'onde de suite au point de vue absolu.

Le raisonnement gagnerait en rigueur à tout ramener à cette conception, et nous l'avons fait pour notre propre compte, mais il

perdrait en simplicité et, comme il s'agit d'idées nouvelles, nous avons cru bien faire en allant au plus pressé qui est, à notre avis, de nous faire nettement comprendre.

Fig. 33. — *Inertie dans les remous.*

Influence mutuelle des surfaces : La feuille de carton abaissée rapidement sur la table, puis arrêtée à peu de distance de celle-ci provoque un départ intense et rapide de circulaires. Après l'arrêt ceux-ci continuent leur mouvement par suite de la vitesse acquise. Il en résulte une raréfaction de l'air contenu entre la surface arrêtée et la table immobile.

Phénomènes d'Inertie dans les Remous

Il est bien facile de montrer l'importance des phénomènes d'inertie dans les remous que nous venons d'étudier, lorsque le corps qui les produit est animé d'un mouvement discontinu ou alternatif. L'expérience suivante, qui présente, malgré sa simplicité, une très grande importance dans la théorie du vol, va nous en donner la démonstration.

Prenons une assez grande feuille de carton rigide, d'environ 0 m. 50 $\times$ 0 m. 50. En la tenant à deux mains par les bords, plaçons-nous au-dessus d'une table sur laquelle seront disposées des feuilles de papier (fig. 33); puis abaissons rapidement la feuille de carton, comme pour l'appliquer à plat sur la table, mais arrêtons brusquement tout mouvement à une dizaine de centimètres de celle-ci.

Nous constaterons qu'aussitôt après l'arrêt, les feuilles de papier libres, placées sur la table, se soulèvent pour chercher à venir se coller sur la feuille de carton, révélant ainsi, entre elles-mêmes et la feuille arrêtée, l'existence d'une dépression en apparence inexplicable.

Pour rendre cette expérience encore plus frappante, on peut en modifier un peu les conditions, en donnant à la feuille de carton un mouvement de translation horizontal, mais toujours normalement à l'air et en l'arrêtant net en un point de sa course (fig. 34).

Si, à proximité de ce point d'arrêt, on a placé d'avance, en la tenant par son bord supérieur, une feuille de papier, on verra cette feuille, d'abord repoussée faiblement par l'approche du carton, se coller énergiquement à lui dès que l'arrêt se sera produit. Le résultat est assez saisissant et tout à fait inattendu. Pour que l'expérience réussisse bien, il faut que la feuille de carton soit bien rigide, et d'ailleurs, pour être plus sûr qu'elle ne fléchira pas, il suffit, comme nous l'avons dit, de la prendre à deux mains. Il faut en outre que l'arrêt soit brusque, comme si l'on avait heurté un obstacle.

Si maintenant, après avoir arrêté la feuille de carton, on la ramène énergiquement en arrière, la feuille de papier est violemment attirée et peut échapper à la main qui la tient.

Si l'expérience est faite au-dessus de la table, on peut de même, par un relèvement rapide succédant immédiatement à l'abaissement, soulever des objets relativement lourds, ce qui ne serait pas possible si la feuille se relevait purement et simplement sans avoir été préalablement descendue, puis brusquement arrêtée.

Voici l'explication de cette expérience :

Rôle des circulaires

Quand on abaisse la feuille de carton sur la table, l'espace qui est compris entre elle et la table va sans cesse en diminuant. Il est le siège de courants semblables à ceux qu'indique la figure. Ce sont des circulaires que la surface de séparation fixe, constituée par la table, a pour effet d'aplatir. Cette surface s'oppose en outre

au renouvellement, par l'air extérieur, des molécules qui ont passé dans les circulaires.

Au lieu de commencer leur divergence assez loin de la surface marchante, comme ce serait le cas si la quantité d'air située par en dessous était illimitée, les molécules sont obligées de se séparer de plus en plus près de la surface, à mesure que celle-ci se rapproche de la table (fig. 33).

Les circulaires prennent donc de plus en plus l'aspect de filets divergents, parallèles à la feuille de carton, se dirigeant du centre vers les bords. Leur vitesse s'accroît d'autant plus que la feuille se rapproche davantage de la surface fixe constituée par la table. Ils

Fig. 34. — *Inertie dans les remous.*

Influence mutuelle des surfaces. — La feuille de papier est attirée vers la feuille de carton après l'arrêt de celle-ci. -- Même explication que pour l'expérience précédente.

en arrivent finalement à marcher avec une rapidité telle, qu'au moment de l'arrêt de la feuille leur élan les entraîne très loin.

A cet instant pourtant, aucune cause de surpression ne subsiste puisque la feuille ne bouge plus et ne refoule plus aucune molécule. La continuation par inertie du mouvement des filets d'air parallèlement à la surface, en allant du centre vers les bords, a donc pour effet d'enlever des particules d'air en trop grande quantité entre la feuille et la table. Un effet de vide intense se produit alors, et les objets légers ayant sous eux de l'air à la pression ordinaire sont fortement soulevés et cherchent à venir se coller contre la feuille.

Il est à remarquer que cet effet de vide est *beaucoup plus important* que la surpression qui l'a précédé, au temps où la feuille marchait encore et s'approchait de la table.

Si l'on répète en effet l'expérience en tenant verticalement la feuille de carton et en l'approchant de la feuille de papier pendant librement, comme nous l'avons précédemment exposé, on voit que cette dernière est bien moins repoussée pendant l'approche qu'elle n'est attirée après l'arrêt (1).

Supposons maintenant que la feuille de carton soit retirée en arrière tout de suite après l'arrêt. La dépression sous la face inférieure tend encore à s'accroître, car l'onde de suite venant de l'extérieur a de la peine à se constituer, puisqu'elle se heurte au mouvement inverse des circulaires qui n'ont pas encore épuisé leur élan et cessé complètement leur marche. Mais elle finit pourtant par s'organiser et le cortège s'établit.

On observe en effet que la feuille de papier ne se contente pas de se soulever, mais part fréquemment à la poursuite de la feuille de carton brusquement relevée. Elle finit cependant par se laisser distancer par celle-ci, car elle chemine en définitive dans l'onde de suite elle-même, dont les éléments sont toujours renouvelés par de nouveaux appels (2).

(1) Une chose toute semblable se passe dans l'eau. Si dans un récipient qui en contient, on cherche à saisir un objet flottant entre deux eaux, en essayant de l'enfermer entre la main et les parois, on constate bien vite que c'est à peu près impossible, si l'objet est suffisamment petit. Il fuit rapidement quand on essaie de le serrer contre les bords.

De même, on ne peut pour ainsi dire pas saisir un corps léger flottant en surface, en relevant la main à plat sous lui. La surface libre joue ici le rôle de plan de séparation, et dès que la main s'approche en se relevant, tous les petits objets surnageant s'enfuient de part et d'autre, à une si grande vitesse qu'on ne peut les rencontrer et les sortir de l'eau.

(2) Il est à remarquer que l'onde, pour s'être manifestée plus tardivement, n'en est que plus intense, puisqu'elle résulte finalement de l'attraction exercée sur les molécules d'air par la dépression qui existe en arrière de la feuille; or cette dépression s'accroît d'autant plus que les courants qui pourraient la combler ont été gênés davantage dans leur établissement par la persistance des courants inverses après l'arrêt. L'onde est donc bien d'autant plus énergique que ces effets de persistance se font plus longuement sentir, ce qui revient à dire que l'onde elle-même tarde plus à se constituer.

Rôle de l'Onde de suite

Nous n'avons pas encore parlé du rôle joué par l'onde de suite au moment de l'arrêt. Ce rôle, très important, est facile à déterminer: son effet s'ajoute à celui des circulaires.

Quand la surface est brusquement immobilisée, l'onde continue son mouvement par inertie, et vient se heurter contre elle. Elle fait donc apparaître une très forte pression sur le dos de la surface, et l'effet s'en ajoute à celui que produit la dépression inférieure, dépression due à la continuation du mouvement des circulaires. Le résultat final se traduit par l'apparition d'un effort considérable tendant à faire continuer le mouvement de la feuille, exactement comme le font les forces d'inertie dues au poids et à la vitesse du carton lui-même et agissant, comme on le voit, dans le même sens.

Il est aisé de se rendre un compte exact des mouvements de l'air, en plaçant à proximité du parcours, à des hauteurs diverses, des témoins de papier constitués par de petites languettes très légères immobilisées à leur base dans des supports. Les mouvements se font avec assez de lenteur pour qu'il soit possible de les apercevoir très nettement. En rendant le mouvement périodique, nous avons pu les déceler mieux encore, par les procédés stroboscopiques dont nous reparlerons dans la suite.

Expérience avec deux surfaces mobiles

Comme nous l'avons dit, les phénomènes précédents se produisent encore très nettement dans l'eau. On peut alors réaliser une variante de l'expérience en rendant les deux surfaces mobiles.

On forme avec deux surfaces rectangulaires et planes, une espèce de charnière que l'on peut facilement ouvrir et fermer (fig. 35). On plonge le tout dans l'eau et l'on cherche à refermer la charnière à peu près complètement, mais en laissant toutefois un espace vide entre les deux surfaces. On constate alors qu'il est très difficile d'arrêter les surfaces à temps, et qu'elles cherchent à se coller tout à fait l'une contre l'autre. Il faut développer un gros effort inverse si l'on ne veut pas que la fermeture se fasse totalement.

Une poudre quelconque (1), répandue sur l'eau, permet d'apercevoir la sortie des circulaires quand la charnière se ferme, et le creux qui se manifeste à l'intérieur quand le mouvement vient à cesser.

Fig. 35. — *Inertie dans les remous.*

Influence mutuelle de deux surfaces mobiles. — Le dièdre que l'on ferme progressivement à la main tend à continuer sa fermeture lorsque l'on cesse tout effort. Le phénomène est d'autant plus accentué que l'on opère plus rapidement. Si on essaie de rouvrir le dièdre *immédiatement* après l'avoir fermé (même incomplètement) on éprouve à le faire une résistance considérable.

L'explication est tout à fait pareille à la précédente, et il est inutile de la donner à nouveau. Les circulaires, continuant à marcher après l'arrêt, déterminent un vide. L'onde de suite, arrivant contre

(1) Il est à remarquer que les mouvements des poudres surnageantes ne donnent pas toujours une idée exacte des courants divers qui se manifestent en profondeur. Les phénomènes de tension superficielle forment en surface une espèce de mince couche élastique, dont les éléments ne participent pas à tous les mouvements des couches plus profondes. Il ne faut donc pas trop se fier à ce que l'on aperçoit et conclure trop vite. Les grands mouvements principaux sont seuls à retenir.

les faces immobilisées, provoque une surpression, d'où production d'une force considérable tendant à terminer la fermeture de la charnière.

Si, tout de suite après l'arrêt, on vient à la rouvrir, on éprouve à ce faire une grande difficulté, c'est-à-dire que l'effort tend à persister dans le même sens et même à s'accroître.

Fig. 36. — *Inertie dans les remous.*

Feuille de carton arrêtée brusquement devant un petit manomètre à eau. Il y a une *légère* dépression au moment de l'arrêt.

Nous verrons l'importance capitale que tout ceci présente dans la théorie du vol des insectes et des oiseaux.

Impulsions récupératrices sur des surfaces isolées

Dans tout ce qui précède, il n'a été question que de surfaces s'arrêtant en face les unes des autres. C'est donc une sorte d'action mutuelle que nous avons été amenés à observer. Il faut examiner

maintenant ce qui se passe quand on agit sur des surfaces isolées.

Cherchons d'abord s'il se produit encore une dépression sous la feuille de carton brusquement arrêtée, quand il n'y a pas de surface fixe en face d'elle.

A cet effet, il suffit de faire l'expérience de l'arrêt, au dessus de la partie supérieure d'un tube plongeant dans un flacon à demi rempli d'eau (fig. 36). Il est facile de constater que dans ces condi-

Fig. 37. — *Inertie dans les remous.*

Influence mutuelle des surfaces. — Feuille de carton arrêtée brusquement devant une surface fixe au centre de laquelle aboutit le tube d'un petit manomètre à eau. Il se produit au moment de l'arrêt une dépression très accentuée.

tions on n'observe qu'une très minime ascension de l'eau dans le tube quand la feuille s'arrête.

Il en est tout autrement quand on place autour de l'extrémité du tube une surface fixe, constituée par une feuille de carton percée d'un trou (fig. 37). Dès l'arrêt, il se produit une rapide ascension de l'eau dans le tube, pouvant atteindre et dépasser 10 milli-

mètres, et révélant ainsi l'existence d'une dépression fugitive de grande importance.

La surface fixe joue donc un rôle, puisqu'on ne constate presque plus rien quand on la supprime. Donc, lorsque la feuille de carton est toute seule, il ne faut pas compter sur l'apparition d'une dépression très importante après son arrêt.

S'il en est ainsi, on peut se demander s'il est encore possible d'observer des phénomènes de récupération. Les expériences suivantes vont nous en donner la preuve.

Plaçons au dessus d'un récipient contenant de l'eau une petite

Fig. 38. — *Inertie dans les remous.*

Plaques suspendue à une potence au-dessus d'une cuve contenant de l'eau.

Si on donne à la plaque une impulsion et qu'on cesse brusquement tout effort, la plaquette tend à continuer son mouvement dans le sens primitif sous l'influence de l'onde de suite qui la rejoint et la pousse en avant.

potence sur laquelle est accrochée une petite plaquette d'aluminium, aussi légère que possible et rigidifiée par quelques fines nervures. Cette plaquette plonge dans l'eau à sa partie inférieure (fig. 38). L'ayant écartée de sa position d'équilibre, faisons lui décrire une demi-oscillation et essayons de l'arrêter à bout de course. Nous constatons à cet instant que la plaquette nous force la main et cherche à continuer son mouvement, bien au delà du point où elle tendrait à parvenir sous l'effet de sa simple inertie.

Elle est énergiquement sollicitée et il faut un assez gros effort pour l'empêcher d'obéir à cette impulsion. Si elle est élastique, on la voit fléchir fortement vers le bas, dans le sens de son mouvement primitif.

Cette impulsion n'est due qu'en faible partie à l'effet de vide des circulaires. Elle provient surtout de l'*onde de suite*, appelée par le

Fig. 39. — *Inertie dans les remous.*

Plaque suspendue à une potence. Dénivellation produite par l'onde de suite venant heurter la plaque lorsque le mouvement cesse et tendant à la relancer en avant.

mouvement de la languette et qui, venant la heurter dans le dos lors de l'arrêt, tend à la projeter vers l'avant (fig. 39). C'est encore au même titre la récupération du travail fourni à la mise en train des courants de remous.

On peut de même montrer cette action dans l'air en effectuant une expérience aussi grossière que la précédente, mais tout aussi instructive.

Il suffit de prendre par sa pointe une ombrelle ouverte, en laissant pendre son manche, et de la soulever rapidement. Si on arrête brusquement le mouvement, on éprouve après l'arrêt complet une réimpulsion qui tend à prolonger la marche, et, si la main ne cède pas à ce nouvel effort, l'ombrelle, pour continuer, pivote autour de sa pointe et le manche se relève considérablement.

L'explication est identique à la précédente : c'est encore l'*onde de suite* qui est venue rattraper la surface pour lui communiquer une importante poussée vers le haut.

CHAPITRE III

THÉORIE DU VOL

Le Coup d'Aile

Cas de l'Oiseau

Considérons un oiseau bon rameur, et comme type prenons le héron, dont nous donnons ci-contre une succession de vues (fig. 40 à 42) fixant ses diverses attitudes au cours du vol. Ces vues appartiennent à une bande cinématographique qui nous a été offerte par le Comptoir de Ciné-location.

Nous constatons que les ailes sont élevées verticalement, et rapprochées beaucoup l'une de l'autre au-dessus du corps. Puis elles s'abaissent, et l'on distingue nettement la flexion qu'elles subissent par suite de l'énergique réaction de l'air.

Elles restent alors complètement déployées. Quand elles sont arrivées à l'extrémité inférieure de leur course, l'oiseau ferme la main (1), c'est-à-dire replie la partie inférieure de l'aile sur l'intérieur.

Ce mouvement, par suite de la construction des articulations, a pour conséquence de changer complètement l'inclinaison de la surface alaire. Presque à plat pendant l'abaissement, presque

(1) L'aile de l'oiseau est assimilable au bras de l'homme, avec lequel elle présente une frappante ressemblance dans sa structure générale. Le bras et l'avant-bras, de longueurs variables suivant les espèces, sont très faciles à reconnaître. De même que chez l'homme, le bras est simple, et l'avant-bras composé de deux os. La main comporte un certain nombre d'articulations, et présente des rudiments de doigts, dont certaines plumes (rémiges extrêmes) peuvent être considérées comme constituant le prolongement.

pareille, quand elle passe à l'horizontale, à l'aile d'un avion en marche, elle change subitement d'orientation, et se présente presque verticalement, comme un manteau qui couvrirait les épaules

Fig. 40

Fig. 41

Fig. 42

Vol horizontal du Héron cendré.

L'abaissement s'effectue avec les ailes frappant l'air à peu près normalement. En fin d'abaissement on observe le changement de plan; les ailes sont presque perpendiculaires à la trajectoire. Lire de gauche à droite et de haut en bas.

Nota. — A la position 15 le héron se prépare à atterrir; le coup d'aile n'a pas eu alors toute son amplitude normale et les ailes n'ont été que faiblement rapprochées au-dessus du dos de l'oiseau.

de la bête et qu'elle maintiendrait déployé. On dirait que l'oiseau dresse à cet instant une sorte de paravent pour masquer ce qui est derrière lui.

Fig. 43. — Oscillations verticales du Héron en vol oblique ascendant.

L'oiseau gagne de la hauteur pendant l'abaissement et en perd pendant l'élévation.
(Voir appendice : sustentation par choes).

Ce mouvement est accompli rapidement ; il est suivi du rejet vers l'arrière du manteau vertical ainsi provisoirement constitué, puis les ailes sont ramenées en avant et en haut et considérablement rapprochées l'une de l'autre. A cet instant, elles ont repris toute leur extension et leur aspect de plans se coupant entre eux, suivant une droite à peu près horizontale, et sensiblement placée dans l'axe du corps.

Le mouvement d'élévation est ici plus rapide que celui de l'abaissement, mais cela n'est pas une règle absolue pour tous les êtres volants.

Vu de face, et en pointant sur l'écran les positions successives d'un même point du corps, le héron nous montre qu'il gagne de l'altitude au départ quand ses ailes s'abaissent. Il n'en gagne plus quand elles montent, et il lui arrive même très souvent d'en reperdre.

La courbe que nous donnons ici (fig. 43) a trait à deux relevés faits sur cette bande cinématographique. Le point visé, pour le héron venant à nous, est la tache grise qu'il possède au bas du cou, dans une région qui n'est pas très éloignée du centre de gravité. Faute de mieux, nous avons pointé cet endroit, qui a le mérite de rester constamment visible.

En abscisses, nous avons figuré les temps, en prenant comme base l'intervalle, supposé régulier, entre deux vues successives. En ordonnées ont été portées les altitudes, corrigées en tenant compte de l'approche progressive de l'animal. La correction a été basée sur la mesure de l'envergure apparente à deux coups d'ailes successifs, ce qui a permis d'établir l'échelle de réduction. Enfin, l'écran où se faisait le pointage était constamment ramené sur deux repères fixes du paysage, pour éviter les erreurs dues aux mouvements de l'opérateur et à ceux de l'appareil de projection.

Cette courbe montre bien le gain d'altitude pendant l'abaissement, et la perte pendant l'élévation. D'ailleurs, la projection cinématographique, un tant soit peu ralentie, permet très facilement de s'en apercevoir à l'œil nu.

Une succession de pointages faits sur l'oiseau, cinématographié cette fois transversalement, donne la courbe n° 2 (fig. 44). En abscisses sont toujours portés les temps et en ordonnées les inter-

Fig. 44. — Vol horizontal du Héron cendré.

Trajectoire d'un point voisin du centre de gravité. La vitesse s'accroît à chaque changement de plan en fin d'abaissement.

Fig. 45. — Vol horizontal du Héron.
Trajectoire absolue de la pointe de l'aile. — L'aile revient en arrière après chaque changement de plan en fin d'abaissement. C'est le coup de fouet.

valles très agrandis, qui séparent sur l'écran deux images successives d'un même point de l'animal. Elles représentent donc l'avancement obtenu par unité de temps, et par conséquent la vitesse aux différents instants du vol. Le point visé est ici le croupion, à la naissance des rectrices, et toujours faute d'un point plus précis plus rapproché du centre de gravité.

La courbe montre nettement que l'avancement est saccadé, et que le corps de l'animal est projeté énergiquement vers l'avant, au moment du retournement des ailes après l'abaissement, c'est-à-dire au moment où l'oiseau change leur inclinaison en les relevant comme un manteau, et en les chassant vers l'arrière.

La courbe n° 3 (fig. 45) montre la trajectoire des pointes d'ailes, et fait clairement voir ce retour en arrière qui s'effectue après le retournement que certains auteurs ont appelé coup de fouet.

Cette courbe, pas plus que les précédentes, n'a le mérite de la nouveauté. Marey en a tracé, bien avant nous, de semblables, par des procédés différents, et M. Bull a constaté chez les insectes que la vitesse passait par un maximum au moment du retournement de l'aile à la partie inférieure, si bien qu'il s'agit là de

choses connues. Mais la théorie du coup d'aile, que nous allons bientôt donner, se sépare complètement de tout ce qui a été fait jusqu'à présent.

Avant de l'exposer toutefois, nous examinerons encore si l'insecte se comporte comme l'oiseau.

Cas de l'Insecte

Les diverses phases du vol de l'insecte ont été déjà très étudiées par Marey, puis, plus récemment par M. Bull, directeur de l'Institut Marey (1).

Nous avons nous-même étudié la question, au moyen d'appareils spécialement adaptés, qui seront ultérieurement décrits. Voici ce que l'on peut constater quand on soumet un insecte à un dispositif quelconque d'analyse des mouvements rapides.

Prenons comme type l'écaille martre (*chelonja caja*). Il s'agit ici d'un insecte de belle taille ; huit centimètres d'envergure environ, quatre centimètres de longueur pour le corps, trente battements à la seconde ; cette vitesse nécessite naturellement des appareils d'investigation spéciaux.

Nous donnons ici (fig. 46 et 47) un extrait d'une bande stroboscopique destinée à la projection cinématographique. Cette bande, prise au strobographe électrique, dont nous donnerons plus loin la description, représente les battements d'ailes d'une écaille martre (*caja*), maintenue à la pince par l'abdomen : l'animal est vu de devant, et se présente un peu obliquement, comme pour venir à l'observateur vers la gauche. Le film doit être lu de bas en haut, en commençant par la bande de gauche. On y observe aisément le changement de plan : à l'abaissement l'aile est vue par la tranche et paraît toute mince. Elle a au contraire tourné de près de 90° pen-

(1) Les expériences de M. Bull l'ont conduit à conclure, en particulier, à l'intervention de la volonté de l'insecte dans le retournement du plan de ses ailes. Cette intervention, que Marey n'admettait pas, était, comme nous le verrons, nécessaire en prenant nos théories pour bases. Sans connaître les résultats des travaux de M. Bull, qui nous auraient ici épargné une série d'expériences, nous avons cherché à démontrer le fait par la dissection et par l'examen stroboscopique de divers insectes. Nous avons été amené à conclure qu'elle se produisait réellement.

Fig. 46

Fig. 47.

Fig. 46 et 47. — *Vol de l'Écaille Martre* (caja)
Le film doit être lu de *bas en haut* en commençant par la grande bande de gauche. L'insecte vient vers la gauche de l'observateur.

dant l'élévation, et on l'aperçoit alors dans toute sa surface. On a eu soin ici de maintenir le thorax de l'insecte dans la position qu'il prend à peu près dans le vol libre horizontal.

Pendant l'abaissement, l'aile descend d'abord normalement, c'est-à-dire que les plans des deux ailes se coupent entre eux, suivant une ligne peu inclinée sur l'axe du corps de l'animal. L'inclinaison pourtant s'accroît bientôt, et l'aile prend un peu la forme d'une sorte d'hélice, tendant à pousser légèrement le corps en avant. A la fin de l'abaissement, les ailes, dirigées vers le bas, font entre elles un angle obtus d'environ 130° . A cet instant, l'insecte retourne son aile avec violence, et la ramène en arrière et vers le haut. La flexion que subit alors la pointe de l'aile est considérable, et l'insecte est énergiquement projeté vers l'avant (M. Bull). Puis les ailes sont ramenées jusqu'à se toucher au-dessus du corps et s'arrêtent brusquement face à face, et le mouvement reprend.

Dans son ensemble, et à la flexion près de la main chez l'oiseau, qui n'a d'autre but que de modifier l'inclinaison de la surface des ailes, comme l'insecte le fait lui-même par simple torsion, il n'y a pas de différence de principe entre le fonctionnement de la

machine à voler de l'insecte et celle de l'oiseau. Il n'y a donc pas de division bien nette à établir, et la théorie restera la même dans les deux cas.

Le principal avantage pratique de cette similitude consiste surtout dans la possibilité plus grande de faire des vérifications sur les courants de remous existant autour des ailes des insectes, qui consentent à voler au point fixe. Nous exposerons comment ces vérifications furent faites, et les services que nous rendit le stroboscope électrique que nous avons imaginé et réalisé pour les besoins de la cause.

Ceci posé, passons à la théorie du vol.

Théorie du Coup d'Aile dans le Vol Ramé

Cas de l'Oiseau

Pour figurer clairement les positions successives prises par l'aile aux différents instants du battement, nous dessinerons une série de traits numérotés, dont chacun représente la coupure de l'aile vers son milieu, par un plan vertical parallèle à l'axe du corps. Le restant de l'aile devra être imaginé de la naissance à la pointe, en passant bien entendu par le point marqué.

Abaissement et Retournement

Considérons le temps de l'abaissement. L'aile, qui progresse avec l'oiseau tout en s'abaissant, passe successivement par les positions 1, 2, 3, 4, 5 (fig. 48). Elle se trouve donc dans les conditions d'un plan incliné, animé d'un mouvement de translation suivant AA'. Comme telle, elle est environnée de tous les remous ordinaires : circulaires antéro-postérieurs et onde de suite. Celle-ci descend selon la direction marquée par la flèche S. Les circulaires, comme dans tout plan incliné à mouvement de translation, sont raccourcis sur le bord d'attaque A, allongés sur le bord arrière B (fig. 32).

Quand l'aile est arrivée au bas de sa course, l'oiseau l'arrête brusquement et en change l'inclinaison, si bien qu'elle prend la

position 6. Comme l'aile vient de s'arrêter, toute cause de surpression sur la face marchante, et de dépression sur la face rentrante ou dos, cesse brusquement d'exister. Il y a donc effet de vide sur la face préalablement marchante.

A cet instant, l'onde de suite, qui descend obliquement à la poursuite de l'aile, continue son mouvement et vient se heurter contre elle. L'aile immobile reçoit le choc comme une paroi contre laquelle vient se briser une lame. Il en résulte l'apparition d'une forte pression sur le dos de cette aile.

Fig. 48. — Positions successives de l'aile au cours d'un ballement en vol horizontal.

1 à 5 : Abaissement. — 5 à 6 : Changement de plan. — 6 à 12 : Elévation.

Si à cet instant l'animal n'en changeait pas l'inclinaison, il serait projeté en avant, mais aussi vers le sol. Grâce au changement de plan qu'il opère en temps voulu, l'effet de projection vers le bas cesse de se faire sentir. L'aile redressée et presque verticale à présent, ne reçoit qu'une impulsion vers l'avant, sans composante nuisible ou dirigée vers le bas. L'animal en accentue l'effet, en renvoyant ses ailes vers l'arrière (6, 7, fig. 48) pour s'appuyer sur cette onde, et augmenter l'effet de propulsion.

De toutes façons, on voit clairement que l'énergie de mouvement, contenue dans l'onde de suite, est reprise et utilisée pour la propulsion. C'est ici que nous voyons pour la première fois l'animal reprendre, dans ses courants de remous, une partie du travail

qui s'y trouvait en quelque sorte emmagasiné sous forme de force vive.

Ainsi se manifeste la possibilité d'une récupération de l'énergie préalablement dépensée. Il en résulte tout naturellement une réduction correspondante de la quantité totale de puissance à fournir pour obtenir la progression. Ce fait est capital s'il peut être expérimentalement démontré (et nous verrons qu'il l'est en effet). Avec cette conception toute spéciale, le champ s'ouvre à des possibilités de vol mécanique, au moyen de puissances motrices bien plus faibles que celles qu'exige l'aviation moderne.

Élévation

Cette récupération achevée, l'oiseau soulève ses ailes, en les maintenant tout d'abord à peu près tangentes à leur trajectoire (8, 9, 10).

Les circulaires sont alors faibles ou nuls, et dirigés du bord avant au bord arrière de l'aile, qui coupe l'air par sa tranche, et sans attaque efficace.

En fin d'élévation, l'oiseau relève leur bord postérieur, les étend brusquement, les amène presque à se toucher, et les arrête net face à face (11, 12).

Nous sommes ici dans le cas de deux surfaces marchant à la rencontre l'une de l'autre, et s'arrêtant l'une devant l'autre. Les circulaires, dans le mouvement de fermeture, marchent avec force du dos de l'aile à son dessous. Au moment de l'arrêt brusque, entraînés par leur inertie, ils continuent leur marche, ce qui a pour effet de provoquer sur le dos de l'aile un vide très important, et d'autant plus persistant que les ailes, très rapprochées, ne laissent pas un passage bien large entre elles pour les courants de comblement qui tendraient à se former (Expérience de la charnière).

Profitant de cet état momentané de vide au-dessus de ses ailes, l'oiseau les abaisse de toute sa force. La pression sous les ailes augmente. La dépression sur leur dos est maintenue, car si une onde de suite ou de comblement se forme bien pour tenter de la détruire, la descente rapide de l'aile, tendant au contraire à l'accroître, peut maintenir quelque temps les choses en l'état.

Il en résulte donc que pendant l'abaissement, et *surtout à son début*, règne une énorme différence de pression entre le dessous de l'aile et son dessus, et l'animal, fortement appuyé, *s'élève*.

En raison de l'importance du vide créé sur son dos à la fin de l'élévation, vide entretenu par la rapide descente des ailes, on conçoit que l'onde de suite, qui se forme suivant S pour venir combler ce vide, doit être un courant énergique, ce qui explique l'intensité de la poussée qu'elle est capable de faire subir au corps tout entier, quand l'animal lui présente ses ailes retournées, ses ailes en manteau ou en paravent vertical, qu'il lui oppose alors pour en recevoir le choc propulseur, choc d'énergie récupérée.

En résumé, le rameur sépare ses fonctions de suspension et de propulsion. L'abaissement le soulève, le début de l'élévation le projette en avant. L'énergie qu'il dépense à l'un de ses coups d'ailes peut être reprise par lui, sous forme de travail utile au temps suivant. Les courbes nous l'ont montré, la théorie nous l'explique. Ainsi peut se justifier la faible dépense de puissance fournie par l'animal pour la locomotion aérienne.

Cas de l'Insecte

Pour terminer l'examen du vol ramé, nous analyserons rapidement le cas de l'insecte, en prenant comme type le sphinx du liseron.

La seule différence qui existe entre le coup d'aile de l'insecte et celui du héron précédemment étudié provient du fait qu'il n'y a pas, cette fois-ci, de possibilité d'extension ou de fermeture de l'aile, par cassure de celle-ci vers son milieu. Encore cette différence réside-t-elle moins dans le principe que dans la proportion des organes.

Soumis à la dissection sous le microscope, ou simplement à la loupe, l'insecte montre bien des rudiments de pièces articulées, très raccourcies, très localisées à la base de l'aile, et qui reproduisent parfaitement le bras, l'avant-bras et la main, dont les doigts sont assimilables aux nervures de l'aile.

Nous reproduisons ici, en les exagérant, ces pièces que nous déformons un peu à dessein (fig. 49), pour en mieux faire com-

prendre l'analogie avec le bras, l'avant-bras et la main d'un oiseau quelconque, mais dont le caractère schématique d'ensemble reste pourtant assez juste.

Au fond, l'aile est pareille à celle de l'oiseau comme disposition de principe, seulement le bras et l'avant-bras sont réduits à très peu de chose, et la main est extrêmement rapprochée du corps.

C'est en fermant celle-ci et en ramenant le bras au corps que l'insecte replie ses ailes sur son dos. Il opère donc tout à fait comme l'oiseau, et la seule différence entre eux consiste en un écart de proportions.

Cela tient tout simplement, pensons-nous, à ce que l'insecte n'est pas planeur. Son aile se réduit à ce qu'on appelle le fouet chez l'oiseau, et le manteau ou partie de l'aile garnissant le bras et l'avant-bras chez l'oiseau manque chez l'insecte. Or cette partie joue un rôle très important dans le planement. L'insecte, qui ne pratique pas cette manière de voler, n'en a donc pas besoin.

Au demeurant, le vol ramé reste identique : même rapprochement considérable des ailes au-dessus du dos de la bête, même changement de plan à la fin de l'abaissement, même retour énergétique en arrière, même remontée.

A la fin de l'abaissement, nous observons un changement du plan de l'aile d'environ 90°. Presque horizontale pendant la descente, l'aile se retourne brusquement à bout de course, pour se mettre à peu près droite, en tournant vers le haut son bord antérieur. L'onde de suite la heurte, et ce choc produit une pression très intense, dont l'animal accentue l'effet en renvoyant son aile en arrière, à la rencontre de l'onde elle-même.

Il en résulte une poussée vers l'avant, exactement comme chez l'oiseau, et ainsi s'obtient la *progression* par récupération de l'énergie contenue dans *l'onde de suite*.

A l'élévation, les mouvements sont encore les mêmes que pour le héron, à la flexion près de la main, qui d'ailleurs ne pourrait apparaître. Le mouvement du fouet, ou voile de l'aile, reste en tous les cas le même.

D'abord tangentes à la trajectoire, les ailes se rapprochent comme chez l'oiseau, de manière à amener presque au contact l'un

de l'autre leurs bords antérieurs. A cet instant, elles forment une espèce de dièdre, dont l'arête est tournée vers l'avant. L'entrée de l'air entre les deux ailes ne peut se faire que par une étroite fente, qui ne lui laisse pas grand place. Les bords postérieurs sont alors rapprochés à leur tour, de manière à fermer presque complètement le dièdre, et les ailes se collent à peu de chose près l'une contre l'autre.

Fig. 49. — *Disposition schématique du bras, de l'avant-bras et de la main chez l'insecte.*

Les proportions du bras ont été intentionnellement exagérées.

Nous sommes de nouveau dans les conditions de la charnière de notre précédente expérience. Lors du mouvement de fermeture, les circulaires fonctionnent dans le sens indiqué par les flèches ; à l'arrêt, c'est-à-dire quand les ailes sont immobilisées et presque collées face à face, l'effet de vide se produit au maximum d'intensité. Le coup d'abaissement, qui suit immédiatement, prend donc toute l'efficacité portante dont il a besoin. Le vide, entretenu sur le dos des ailes par leur descente, provoque l'apparition d'une onde de comblement de très grande intensité, qui produira en fin de course le choc nécessaire à la progression.

Flexion des Ailes

Il est à remarquer qu'au début de l'abaissement l'aile ne fléchit pas comme elle le fait au commencement de l'élévation, après le

retournement inférieur. M. Bull avait déjà constaté ce fait, que nous avons observé nous-même sur toutes les espèces soumises à l'examen stroboscopique.

Nous l'attribuons en partie à la construction de l'aile, qui ne présente pas du tout la même flexibilité dans ses deux sens, chez un très grand nombre d'insectes, chez les sphingides notamment. Elle résiste beaucoup mieux à une poussée venue d'en dessous, qu'à une poussée venue d'en dessus.

Une petite balance spéciale, à contacts électriques, que nous avons fabriquée pour essayer la flexion des ailes, indique un rapport qui peut aller jusqu'à trois, entre la flexibilité par en dessous et la flexibilité par en dessus.

Il est d'ailleurs tout à fait logique qu'il en soit ainsi. Quand elle commence à s'abaisser, l'aile doit porter le corps ; si à cet instant elle fléchissait et se retroussait en arrière, elle faciliterait le passage des circulaires par les bords, ce qui remettrait de la pression sur l'aile et en enlèverait par-dessous. L'aile serait mauvaise et ne porterait pas.

Par contre, la flexibilité de l'aile du dessus vers le dessous présente un intérêt marqué. Agissant un peu à la manière d'une mèche de fouet, elle tend à continuer son mouvement quand, avant d'arriver au moment du retournement, l'insecte ralentit progressivement son aile, pour l'arrêter et commencer à la relever ensuite. Grâce à son élasticité, la pointe continue vers le bas, et son arrêt ne se produit que quand le corps de l'aile commence à remonter. Il en résulte que cet arrêt prend un caractère de brusquerie plus accentué, et que le mot de « coup de fouet » nous paraît désigner de la plus heureuse façon.

C'est tout à fait ce qui se passe quand on manie une perche élastique, effilée à son extrémité, comme une canne à pêche. Quand on fait osciller une telle canne, l'extrémité légère et élastique continue son mouvement après l'arrêt du poignet, et ne revient en arrière que quand le corps de la canne est lui-même reparti en sens inverse. Il en résulte une grande sécheresse de coup, que les pêcheurs mettent à profit pour « ferrer », comme ils disent, c'est-à-dire accrocher brusquement et sans lui

laisser le temps de faire un mouvement, le poisson qui mord à l'appât.

En raison de la brusquerie de cet arrêt et de la vivacité de son rappel en arrière, l'aile gagne beaucoup en efficacité au moment du retournement ; les effets d'inertie s'accroissent considérablement, et, par suite, les variations de pression qui en sont la conséquence normale.

Cependant, la flexibilité doit être soigneusement calculée, car si elle venait à trop s'accroître, l'aile pourrait se retrousser vers l'avant, et perdre une partie de son efficacité propulsive ; elle ne doit fléchir que juste de la quantité nécessaire pour faire son office de fouet, sans se recourber pourtant outre mesure.

D'ailleurs, cette différence de flexibilité (1), constatée chez l'insecte, se retrouve dans la plume de l'oiseau, et à peu près au même titre, pour des raisons toutes semblables, et sur lesquelles nous ne croyons pas avoir à insister davantage.

(1) La différence de flexibilité de l'aile, selon que l'effort s'exerce sur sa face externe ou sur sa face interne, ne se manifeste pas cependant chez toutes les espèces d'insectes. Chez les diptères, en particulier, la flexibilité est à peu près la même dans les deux sens. Malgré cela, pendant le vol de ces insectes, on constate toujours que le retournement de l'aile ne se fait sentir qu'au commencement de l'élévation, tout de suite après le changement de plan, et qu'il fait à peu près défaut au commencement de l'abaissement, après que les ailes se sont rapprochées au-dessus du dos de l'animal.

Ce fait semblerait indiquer que, dans ce cas, l'intensité du choc en récupération, qui est destiné à pousser l'insecte en avant quand l'aile se retourne au bas de sa course, est notablement plus forte que celle des réactions qui doivent soulever le corps pendant l'abaissement. Il est, d'ailleurs, à remarquer qu'il n'y a là rien de bien étonnant. L'impulsion vers l'avant est une action de courte durée, qui a plutôt le caractère d'un choc. L'effet de soulèvement se fait sentir au contraire pendant une fraction notable de la période d'abaissement. Il en résulte nécessairement, si les deux actions totales sont du même ordre de grandeur, une amplification marquée de l'effort de propulsion, relativement à celui qui produit le soutien. De là une différence dans la flexion des ailes dans les deux cas. Il semble, du reste, que l'on ne constate le fait que chez les insectes dont le corps offre une certaine résistance à l'avancement, et qui sont capables cependant de se déplacer rapidement.

Amplification de l'Effort portant

Nous croyons nécessaire d'ajouter encore quelques mots à cette théorie succincte du coup d'aile dans le vol ramé. Il peut arriver, chez l'oiseau, que le changement d'inclinaison de la surface de l'aile pendant la remontée atteigne une valeur suffisante pour que cette même surface, au lieu de se redresser simplement, presque verticalement, pour recevoir la poussée dorsale, en arrive à s'incliner au delà de cette position verticale, de manière à trouver sur la colonne d'air venue d'arrière (onde de suite et autres), non pas seulement un appui de propulsion, mais un véritable effet de soulèvement. Chez certains oiseaux, comme le canard, on en arrive à un tel degré de renversement de la surface de l'aile vers l'arrière, que le coup d'aile, pendant la remontée, produit un effet de sustentation dans son début, presque aussi fort que le coup d'abaissement.

Le fait a été constaté par Marey, qui en donnait une explication malheureusement inadmissible. Mais il n'en a pas moins été vérifié par les instruments d'enregistrement qu'employait ce savant, et dont la précision était aussi grande qu'on pouvait le désirer.

Fig. 50, 51. — Vol horizontal du canard sauvage.

La fig. 50 représente l'élévation des ailes telle que la ferait l'oiseau pour obtenir un simple effet de *progression*. La fig. 51 montre cette même élévation telle que le canard la fait réellement. Il obtient alors un double effet de *progression* et de *sustentation*.

Les ailes d'un canard sauvage, ou même d'un pigeon au vol, dans les instants qui suivent son départ du sol, présentent cette curieuse inclinaison, si bien que chaque demi-battement est alors efficace pour la sustentation (fig. 50 et 51). On voit, d'ailleurs, que la théorie n'en subit aucune modification, et qu'il y a simplement

une exagération de l'amplitude des mouvements, d'où résulte une augmentation de l'effet de soutien.

Vol Ascendant Vertical

Ce genre de vol, qui fait de l'animal un hélicoptère, n'est qu'un cas particulier du précédent, avec cette différence qu'il ne s'agit que de s'élever, et non plus de progresser horizontalement.

Fig. 52. — Vol ascendant vertical.

Schéma des positions de l'aile dans le vol ascendant vertical
ou dans le vol au point fixe.

Il est évident que, dans ces conditions, l'animal doit chercher, pour obtenir le maximum d'effet utile, à développer et à multiplier les efforts de soulèvement. La remarque précédente nous donne le moyen tout simple d'y parvenir : il suffit que l'animal redresse le corps et exagère l'importance du renversement de la surface des ailes, ou, autrement dit, l'angle de ses changements de plan.

Le corps est redressé, et les ailes battent suivant la ligne générale AA', inclinée d'une trentaine de degrés sur l'horizontale.

En adoptant le même mode de représentation que pour le vol ramé, mais en séparant cette fois, pour plus de clarté, la succession des positions 1, 2, 3, 4, 5, qui correspondent à l'abaissement, de celles 6, 7, 8, 9, 10, 11 (fig. 52) qui correspondent à l'élévation, nous

Fig. 53

Fig. 54

Fig. 53 et 54. — *Vol ascendant vertical du Héron.*

Lire de haut en bas en commençant par la bande de gauche.

La fig. 53 représente les premières phases de l'*abaissement*. L'aile descend très obliquement par rapport à l'axe du corps. (En même temps qu'elle s'abaisse, ses pointes se dirigent vers l'avant).

La fig. 54 représente les dernières phases de l'*abaissement* et le *changement de plan* qui précède l'élévation. On distingue la flexion de la main qui accompagne ce changement de plan.

voyons que, si les inclinaisons de l'aile sont conformes à celles que nous avons figurées, les deux demi-battements donneront un effet d'élévation. L'abaissement (1, 2, 3, 4, 5) se fera avec une torsion de l'aile *très marquée*, amenant son bord antérieur A à précéder de beaucoup dans le mouvement le bord postérieur A'.

Par rapport à l'axe du corps de l'animal, l'inclinaison de l'aile est beaucoup plus marquée pendant l'abaissement que dans le vol ramé ordinaire, où elle est presque nulle. A l'élévation, l'aile garde tout au moins la même inclinaison par rapport à l'axe du corps, si elle ne l'augmente pas elle aussi (fig. 53 et 54).

Le résultat final est donc l'accroissement de l'angle formé par l'inclinaison moyenne à l'abaissement et l'inclinaison moyenne à l'élévation. Les ailes sont beaucoup plus tourmentées que dans le vol ramé horizontal, et s'il y a toujours reprise de l'énergie sous forme de choc de l'onde de suite et sous forme de vide par l'inertie des circulaires, il n'en reste pas moins vrai que l'exagération des changements de plan, pour laquelle l'oiseau n'est pas fait, ainsi que la nécessité d'avoir à développer un effort axial important, dont le minimum est le poids total de la bête, font de ce genre de vol un mode particulier d'élévation que la plupart des oiseaux n'affectionnent pas, et qu'ils pratiquent le moins possible, préférant toujours s'élever par la ligne oblique, qui leur demande une intensité d'efforts et une désarticulation moins grandes.

Mais si, pour le plus grand nombre des oiseaux et à très peu d'exceptions près, telles que l'glouette, l'oiseau-mouche et les très petites espèces, on observe rarement ce genre de vol, il est au contraire journellement employé par un nombre considérable d'insectes, par les papillons crépusculaires, tels que les sphinx par exemple. Ces insectes excellent dans le vol au point fixe, qui est un cas particulier du vol ascendant vertical.

L'heure à laquelle ils apparaissent, c'est-à-dire tout de suite après le coucher du soleil (heure calme par excellence), la possibilité de les observer de tout près, et enfin l'aptitude qu'ils ont de pratiquer merveilleusement ce genre de vol dans une chambre close, écartent, d'une façon définitive, toute hypothèse plus ou moins fondée sur l'aide qu'ils pourraient trouver dans d'invisibles courants aériens.

Stationnaires et comme cloués en l'air, ils se placent devant la fleur qu'ils veulent inspecter, en déroulant leur spiritrompe qui plonge dans le calice odorant. Dédaigneux de tout appui sur la fleur exploitée, ils restent jusqu'à épuisement des sucres nourriciers,

puis, d'un petit saut brusque, passent à la fleur suivante, toujours volant du même vol régulier. Et jamais à aucun instant de sa sortie la curieuse bête ne se pose.

Fig. 55 et 56. — Vol au point fixe du *Sphinx convolvuli*.

Les positions I, II, III sont celles de l'abaissement. Les positions IV, V, VI sont celles de l'élévation. En III commence le changement de plan.

S'il en fallait davantage pour se convaincre de la possibilité du vol économique, c'est-à-dire à puissance motrice réduite, ce serait à désespérer des témoignages du bon sens et de l'observation.

Les théories que nous avons exposées, et qui nous montrent l'animal volant comme un récupérateur habile de l'énergie qu'il dépense, comme un être capable de reprendre à chaque instant, dans ses propres remous, le travail qu'il leur avait communiqué à l'instant précédent, ne font que justifier ce que le bon sens nous affirme de toutes ses forces, quand nous regardons voler pendant des heures l'insecte infatigable.

Vol Plané

Probabilité de Mouvements d'Ondulation

Les difficultés d'investigation sont ici considérables. Le vol plané n'est pas observable de près. L'oiseau ne le pratique pas souvent au voisinage du sol, sauf pour atterrir, et il n'est pas démontré que tout se passe alors de la même façon que dans le cas du vol aux grandes altitudes.

En outre, si, comme nous le pensons, ce genre de vol nécessite, par temps calme, des mouvements de tourbillonnement de l'aile, ces mouvements sont forcément de faible amplitude, et par conséquent peu visibles, surtout de loin. Il est donc difficile de s'assurer qu'ils se produisent réellement.

La cinématographie ultra-rapide en pleine lumière existe et donne de bons résultats. M. Noguès, de l'Institut Marey, l'a réalisée et appliquée à toutes sortes d'études, notamment au vol des pigeons.

Mais il n'y a pas d'appareils cinématographiques à prises rapides applicables à des objets très éloignés. Nous en construisons un présentement, mais nous ne pouvons pas encore présumer grand'chose des résultats qu'il donnera ni du temps que demandera sa mise au point. L'outillage n'est pas terminé, et l'expérience reste à faire pour prouver l'existence de ces légers mouvements d'ondulation pendant que l'oiseau plane. Nous croyons, il est vrai, les avoir observés déjà, mais il n'y a pas de certitude véritable dans un

simple examen à la lunette. Nous ne pouvons pas garantir le résultat de nos observations, qui ont été faites à trop grande distance.

Cependant nous pensons que ces mouvements ont lieu réellement, toutes les fois que l'animal remonte le vent. Ici comme précédemment, il ne paraît du reste pas possible qu'il en soit autrement, étant donnée la résistance énorme que l'aile présente à la pénétration, dès que son attaque est suffisante pour assurer le soutien de l'animal. Nous attendrons pourtant, pour donner des affirmations, que soit réalisé l'appareil de synthèse qui, mauvais projectile quand on laisse ses ailes inertes, prendrait tout à coup les qualités d'un bon planeur, quand on leur communique ce léger mouvement d'ondulation. Les seules difficultés viendront de la détermination de la forme des ailes, qui joue ici un rôle considérable, et de la position exacte de l'axe de tourbillonnement.

Forme des Ailes favorable à l'Ondulation

En ce qui concerne la forme, le modèle que nous établissons présentement offre une disposition spéciale. Il s'agit ici d'une aile à centre de pression fixe.

Nous avons vu précédemment qu'une aile plane voyait son centre de pression *se rapprocher* continuellement de son bord d'attaque, quand diminue l'inclinaison de l'aile sur sa trajectoire. D'autre part, aux faibles incidences, une aile formée d'une portion de cylindre ou aile arquée, voit son centre de pression *s'éloigner* du bord d'attaque, quand l'inclinaison de l'aile sur sa trajectoire diminue et tend vers zéro.

S'il en est ainsi, il devient possible de réaliser une aile pour laquelle le centre de la pression générale serait immobile. Il suffirait, pour y arriver, de combiner une portion de cylindre à arquée avec un plan droit; autrement dit, il suffirait de construire une aile dont, par exemple, les parties voisines de la carlingue présenteraient une arquée, et dont les parties extrêmes seraient planes au contraire, avec passage progressif d'un des profils à l'autre.

C'est ce genre de surface que nous avons réalisée (fig. 57); elle présente bien, quand elle est convenablement établie, un centre de pression à peu près indépendant de l'angle d'attaque. La partie

arquée présente un centre de pression rétrograde pour une diminution de l'attaque. La partie plane présente un centre de pression progressif, si bien que le point d'application de la résultante générale peut être réduit à l'immobilité.

L'intérêt qui s'attache à cette fixité du point de pression se com-

Fig. 57. — Aile à centre de pression fixe.

La partie extrême *ab* est à peu près plane. Le centre de pression de cette portion de l'aile se *rapproche* de la tranche antérieure quand l'attaque décroît. La partie voisine du corps *cd* est concave. Le centre de pression *s'éloigne* de la tranche antérieure quand l'attaque diminue. Le centre de pression de l'ensemble peut donc rester fixe.

prend tout de suite. Si l'on veut en effet faire tourillonner l'aile autour d'un axe sans avoir à développer d'efforts, il est évident que l'on peut y parvenir en s'arrangeant pour que le centre de pression de l'aile et son centre de gravité se trouvent tous les deux sur l'axe de tourbillonnement. De cette manière, il n'y aura pas de couple résistant, et l'aile sera en équilibre indifférent, c'est-à-dire qu'on pourra la faire osciller pendant la marche autour de son axe fixe sans éprouver de résistance de la part de l'air, ou de la part de son propre poids.

L'oiseau paraît présenter cette disposition (fig. 58) (nous disons paraît, car rien n'est plus difficile que de se faire une idée exacte de la forme vraie des ailes pendant le vol plané). Il ne faut pas oublier qu'elles sont en effet très élastiques, et que la courbure générale d'une aile déployée en air calme n'est pas du tout la même que celle qu'elle présente quand l'air agit sur elle et la presse.

D'autre part, une aile naturalisée soumise au courant d'air n'a pas forcément la forme que lui donne l'oiseau pour planer. Il semble bien pourtant que l'on se trouve en présence de deux surfaces, courbe et plane, réalisant, jusqu'à un certain point, la fixité du

centre de pression, et celui-ci paraît être au voisinage de la prolongation du bras de l'oiseau, ce qui donnerait à l'animal la possibilité de faire osciller son aile autour du bras comme axe de rotation.

Fig. 58. — Milan ordinaire.

Dessin demi-schématique montrant la disposition du bras, de l'avant-bras et de la main.

sans avoir à faire d'efforts musculaires de quelque importance pour accomplir ce mouvement.

Ceci posé, admettons que ces ondulations aient lieu pendant le vol plané, et voyons les conséquences qu'elles peuvent entraîner.

Hypothèse sur le Vol plané

Supposons que l'oiseau planant avance de la droite à la gauche, en présentant son aile avec une certaine attaque, représentée par l'angle α (fig. 59).

Les circulaires antéro-postérieurs ont la répartition et la forme indiquées pour les plans inclinés, et que nous reproduisons sur la figure. L'onde de suite est représentée en S.

Si à cet instant l'animal accentue son attaque et amène l'angle d'incidence à avoir la valeur α' la pression sous l'aile augmente immédiatement. Pour parer à ce changement de régime et pour lutter contre ce déséquilibre qui vient de s'accroître, les circulaires vont chercher à s'accroître eux aussi ; mais l'inertie des molécules d'air qui les constituent leur fait *perdre du temps*. Ils ne prennent pas tout de suite leur intensité. Il faut qu'ils se mettent en train. Il y a donc un retard très appréciable, pendant lequel la pression reste trop forte sous l'aile et trop faible par en dessus, ce qui produit un bénéfice momentané au point de vue de la sustentation.

D'autre part, ce relèvement brusque a pour effet de provoquer l'apparition d'une dépression très forte sur le dos de l'aile. Il en résulte l'appel immédiat d'une onde de suite importante. L'aile, qui a ralenti sous l'influence de ce véritable coup de frein, se trouve bientôt rattrapée par l'onde qu'elle vient précisément de former, et dont la direction est celle de la figure 59. Elle en reçoit donc une impulsion venue de l'arrière, et légèrement ascendante (1) (fig. 61).

Fig. 59. — Relèvement de l'onde de suite lors d'un changement de plan ou d'un accroissement d'attaque.

L'onde S devient un courant ascendant lorsque l'attaque augmente (α') et que la surface ralentit.

L'aile est donc projetée vers le haut et vers l'avant, et ainsi se détruit l'effet de freinage que le relèvement d'attaque avait d'abord produit. L'onde de suite est presque aussitôt récupérée que créée. Son énergie se trouve reprise avant que soit terminée la phase du relèvement. L'oiseau peut alors se laisser glisser, en remettant son

(1) Il est facile de se rendre un compte approximatif du caractère ascendant de l'onde après le relèvement du plan.

Il suffit de traîner un petit plan dans l'eau, à faible attaque, et de le redresser en le ralentissant. L'onde remonte derrière la surface, comme le schéma l'indique. Elle suit donc le plan dans son relèvement.

attaque à zéro. Il pénètre sans résistance sensible dans le milieu fluide, perd de l'altitude, et recommence la manœuvre d'accroissement d'attaque pour s'élever à nouveau.

Ces mouvements sont certainement de peu d'amplitude, et doivent se succéder rapidement, si bien qu'ils pourraient finalement présenter les apparences d'un frémissement, et il serait possible d'y voir la cause du bruissement des ailes lors de l'atterrissage en vol plané.

Mais il est possible également que leur fréquence dépende beaucoup de la grandeur de l'oiseau. Chez les grands voiliers, ils pourraient avoir l'aspect d'une ondulation très allongée.

Quoi qu'il en soit, nous voyons qu'en admettant l'influence de la volonté de l'animal, pour faire accomplir à son aile des mouvements de tourillonnement rapides et de peu d'amplitude, la conséquence en est l'apparition de phénomènes d'inertie d'un caractère périodique, et provoquant :

- 1° Un accroissement de portance au début du relèvement ;
- 2° Une poussée récupératrice en fin de relèvement ;
- 3° Une progression sans résistance pendant la descente à attaque nulle.

L'effet du freinage est compensé par la poussée consécutive de l'onde, et l'on y gagne finalement d'accomplir la majorité de la progression à attaque nulle, c'est-à-dire à *résistance réduite*.

Vol Ondulé (1)

Nous allons trouver dans le vol ondulé, pratiqué presque exclusivement par les passereaux de petite taille, comme les moineaux, les mésanges, etc., une image très nette du vol à changement d'incidence sur la trajectoire. Nous verrons combien ce genre de vol, si facile à expliquer par la théorie de la récupération, vient renforcer l'hypothèse des ondulations dans le vol plané.

(1) Les théories contenues dans ce chapitre et dans le suivant, relatif au vol en orbes courtes, doivent être considérées comme l'énoncé de simples hypothèses et non comme un ensemble de faits prouvés.

Il ne sera possible de passer à l'affirmation que quand sera terminée la série d'expériences de synthèse que nous préparons actuellement.

Fig. 60. — Vol ondulé d'un passereau (moineau).

L'animal a les ailes fermées dans les parties descendantes. Il les ouvre ensuite brusquement et *ricoché*, regagnant de l'altitude et perdant de la vitesse. Il aide sa remontée par quelques battements.

Lorsqu'un moineau vole horizontalement entre deux points suffisamment éloignés l'un de l'autre, on le voit décrire une trajectoire ondulée très accentuée. Sa marche est une succession de bonds. Tantôt il s'élève en battant des ailes, tantôt il glisse et descend obliquement en les fermant parfois complètement. Il ressemble alors à une espèce de torpille empennée, et sa queue représente la seule portion déployée de sa voilure. On dirait qu'il exécute une succession de ricochets très allongés, et on ne le voit ramer que dans les portions de sa course où il gagne de l'altitude (fig. 60).

On doit se demander pourquoi l'oiseau procède de cette manière, qui n'apparaît pas *a priori* comme bien commode, et dont le rendement reste douteux. C'est allonger son chemin presque à plaisir, que de substituer à la ligne droite une ligne ondulée semblable à celle qu'il suit. Il semble qu'il n'y ait pas d'intérêt à perdre ainsi de l'altitude, pour avoir à se donner la peine de la regagner ensuite. Nous allons voir que, bien au contraire, cette façon d'opérer peut rapporter à l'oiseau un bénéfice considérable, au point de vue de la puissance à dépenser. Il est d'ailleurs évident qu'il ne se comporterait pas

ainsi, s'il n'y trouvait son avantage.

Supposons l'oiseau animé d'une certaine vitesse horizontale. S'il

ferme à cet instant ses ailes, il devient semblable à un projectile très pénétrant, car si l'aile est résistante, il n'en est pas de même du corps, entièrement taillé pour ne pas laisser de prise à l'air. Plus rien ne le soutient que sa vitesse. Il perd donc de l'altitude et descend comme une flèche commençant à s'incliner vers le sol, sur sa trajectoire parabolique.

Cette descente accroît encore sa vitesse par rapport à l'air. Quand il la juge suffisante, il ouvre brusquement ses ailes, en leur donnant une importante attaque. Il en résulte l'apparition d'un effet d'inertie très intense. Les circulaires perdent du temps à s'établir, une forte surpression se manifeste sous l'aile, et une dépression correspondante apparaît en dessus.

Il en résulte donc, simultanément, la production d'un effet de freinage et d'un effet de soulèvement très puissants. L'animal ricoche sur de l'air encore immobile à l'instant précédent, et où aucun commencement de circulaires n'existait avant ce brusque déploiement de surface.

Fig. 61. — Vol ondulé du moineau.

Ricochet en fin de période descendante. — Quand l'oiseau ouvre les ailes, il subit un coup de frein énergique. En même temps il appelle une onde de suite intense. La perte de vitesse produite par le freinage permet à l'onde de rattraper l'aile. Il y a récupération et l'oiseau rebondit en aidant son ascension par quelques battements.

La perte de temps, qui résulte de l'organisation des circulaires, transforme le milieu élastique en un milieu plus résistant, et l'oiseau bondit sur ce ressort provisoirement constitué.

En même temps, la dépression dorsale qui se manifeste sur les ailes appelle une onde de suite *S* de grande intensité (fig. 61). Quand l'animal remonte, il perd de la vitesse, et l'onde de suite, relevée à cet instant et constituant alors un courant d'air *ascendant*, rattrape l'aile qui ralentit, et, lui rendant son énergie sous forme d'une poussée vers le haut et vers l'avant, vient *compenser*

l'effet de freinage, dû à l'accroissement précédent de l'attaque. L'oiseau en aide l'action, en battant des ailes dans ce courant d'air qui le porte et le soulève.

Quand l'altitude à laquelle il veut parvenir est atteinte, il couche à nouveau son corps sur l'horizontale et, profitant de la vitesse acquise, se laisse tomber en *projectile, toutes ailes fermées*. Il progresse alors sans résistance, et sa vitesse s'accroît en même temps que son altitude diminue. Puis les ailes s'ouvrent à nouveau et l'oiseau remonte, en aidant son ascension par quelques battements. Les phénomènes se reproduisent ainsi périodiquement jusqu'à la fin du vol.

En fin de compte, le vol ressemble beaucoup à la succession de ricochets qu'exécute une pierre plate à la surface de l'eau, à cette différence près que les ricochets perdent peu à peu de l'amplitude et de la portée, et finissent par s'éteindre.

Ici le battement des ailes de l'oiseau a pour simple but *d'entretenir* le mouvement, de compenser les pertes et d'empêcher les oscillations de s'amortir. Comme ces battements s'effectuent dans des courants d'air ascendants, ils ne doivent pas demander grand effort à l'oiseau, l'air accomplissant tout seul la majorité de l'effet de poussée ou de soulèvement.

En résumé, l'oiseau paraît obtenir les effets suivants :

- 1° Pénétration sans résistance sensible dans les parties descendantes de la trajectoire, quand les ailes sont fermées, mais perte corrélative d'altitude;
- 2° Freinage à l'instant de l'ouverture des ailes, produisant en même temps, par effet d'inertie, une surpression anormale, d'où résulte le ricochet ou soulèvement;
- 3° Reprise de l'énergie du coup de frein, sous forme d'impulsion ascendante et vers l'avant, de la part de l'onde de suite récupérée. Reprise simultanée de l'altitude perdue.

Finalement les pertes d'altitude et de vitesse se trouvent automatiquement compensées par récupération. Il reste donc à l'animal l'avantage d'avoir progressé pendant la plupart du temps avec les ailes fermées, c'est-à-dire sans résistance. Les battements d'ailes n'ont fait qu'entretenir le mouvement, de manière à combler le déficit qui a pu se produire dans les récupérations successives.

Si le cycle était parfait, l'oiseau n'aurait *absolument aucune puissance* à dépenser pour la progression. Nous n'irons pas jusqu'à

Fig. 62. — Vol du Héron (atterrissage).

Le film est lu de haut en bas en commençant par la gauche. L'aile, vue par la tranche dans les premières photographies, augmente son attaque pour freiner la marche. En 1, 2 et 3 on observe un retroussement des plumes de duvet garnissant le bord antérieur des ailes. L'aile paraît déchiquetée. Ce retroussement est dû à un courant venu de l'arrière. C'est l'onde de suite qui a rattrapé l'aile. L'action cesse et le bord de l'aile redevient net à partir de 4. L'action est donc de courte durée. Elle résulte de la *variation* de l'attaque et non pas simplement d'une dépression dorsale plus accentuée, car elle devrait alors persister quand le nouveau régime est établi. C'est une manifestation de la récupération dans les ondulations de l'aile.

dire qu'il en est ainsi, et d'ailleurs les battements que l'oiseau fournit nous donnent la preuve qu'il y a tout de même des pertes.

Nous pensons cependant qu'elles sont très faibles, et que nous pouvons conclure ici à l'existence d'un vol à dépense de puissance réellement réduite, et voir dans la succession de ces phénomènes la raison de cette progression si facile, demeurée jusqu'à présent quelque chose de vraiment mystérieux.

Vol en Orbes courtes (1)

Il est à remarquer que le vol précédent peut être considéré comme le développement, sur la ligne droite, du vol en orbes pratiqué par les grands planeurs. Dans ce dernier cas toutefois, l'oiseau n'a pas besoin de replier ses ailes pendant la descente pour diminuer sa résistance à l'avancement. Il arrive exactement au même résultat en se *servant du vent*.

Quand il décrit la portion descendante de son orbe, il marche *avec le vent dans le dos*. S'il prend de la vitesse par rapport au sol, il n'en prend guère par rapport à l'air. Il est donc à peu près dans les conditions du moineau dont les ailes sont fermées pendant sa descente, c'est-à-dire qu'il ne trouve pas grand appui sur l'air, et qu'il se comporte surtout comme un projectile animé d'une vitesse horizontale importante.

Peu importe alors que ses ailes pénètrent mal. Marchant presque avec l'air, la résistance qu'elles éprouvent demeure insignifiante. C'est l'avancement sans difficulté par rapport au sol.

Continuant son mouvement de descente rapide, l'oiseau décrit un cercle qui l'amène face au vent. Il redresse alors brusquement son attaque, et obtient sous ses ailes une surpression considérable, qui tend à le soulever. La dépression dorsale appelle une onde qui le suit et le rattrape, quand la vitesse diminue suffisamment. L'effet de freinage est ainsi compensé par la poussée oblique, provenant de l'onde récupérée. L'oiseau peut donc remonter presque aussi haut qu'au début de sa glissade dans le vent (fig. 63).

(1) La théorie qu'on va lire ne s'applique pas au vol en grandes orbes qui tient beaucoup plus du vol plané ordinaire.

Il est évident que si le vent souffle *horizontalement*, l'oiseau ne peut pas gagner de la hauteur par ce procédé. Lorsqu'il veut monter à des altitudes croissantes, il lui faut avoir recours, à certains moments, soit à des battements, soit à de simples ondulations de ses ailes, visibles ou non, et pareilles à celles dont nous avons donné la théorie dans le vol plané en air calme.

Quand il monte absolument sans battre des ailes, c'est qu'il a rencontré un courant d'air oblique ascendant. Il est complètement impossible à une *aile inerte* de s'élever dans un courant d'air horizontal.

En résumé, quel que soit le genre de vol employé, nous voyons que la théorie reste toujours la même : c'est toujours la recherche d'une *pénétration à puissance réduite* ; soit à ailes

Fig. 63. — Vol en orbes courtes.

L'oiseau descend dans le vent ailes étendues. Il n'est alors ni soutenu, ni freiné et décrit une parabole descendante. Puis il fait rapidement volte-face et remonte. La manœuvre s'opère par un accroissement d'attaque avec gauchissement plus accentué sur l'aile pivot. L'onde appelée suit le mouvement et donne progressivement l'impulsion nécessaire à la remontée. Cette explication ne convient qu'aux orbes de court rayon.

fermées, dans le cas du passereau qui vole en ligne à peu près directe, soit par effacement du rôle retardateur des ailes en

descendant avec le vent, dans le cas du vol en orbes pratiqué par les rapaces de petite taille.

Dans chaque cas, le brusque accroissement d'attaque de l'aile, soudainement réalisé, semble produire une sorte d'effet de surprise, qui soulève et qui freine; puis survient presque immédiatement le contre-coup de l'onde, qui détruit l'effet du freinage et parachève l'élévation en rendant de la vitesse à l'animal.

Dans l'un et l'autre cas, l'oiseau qui navigue à altitude constante ne paraît pas avoir d'autres efforts à faire que ceux qui sont destinés à combler les pertes du cycle ainsi décrit.

CHAPITRE IV

PROCÉDÉS D'INVESTIGATION - EXPÉRIENCES

I. — Méthode Stroboscopique

La méthode dite stroboscopique nous a fourni le principe fondamental de la plupart des instruments que nous avons réalisés, pour procéder à nos expériences de vérification.

Rappelons en quelques mots en quoi consiste cette méthode d'examen des mouvements rapides.

Considérons un corps en mouvement, une roue par exemple, animée d'un mouvement de rotation très rapide et bien uniforme. Supposons, pour plus de clarté, que sur la jante sombre de cette roue on ait préalablement peint une petite tache blanche, très nette et tranchant bien sur le fond (fig. 64).

Dès que la roue a été mise en mouvement, la tache a cessé d'être visible, et tout ce qu'il est possible d'en apercevoir en pleine marche n'est qu'une sorte de cercle grisâtre, mal délimité, et qui représente la trajectoire circulaire décrite par la tache.

Après avoir fait l'obscurité dans la pièce, procurons-nous une source de lumière intermittente, capable de lancer des éclairs d'excessivement courte durée, et plaçons-là de manière à ce qu'elle puisse illuminer la roue en mouvement.

Si l'on s'arrange pour que les lueurs jaillissent justement une fois par tour de roue, et exactement au moment où la tache passe en un même point de sa trajectoire, il ne sera possible d'apercevoir la tache qu'en ce point là seulement, puisqu'à toutes ses autres positions elle demeure plongée dans l'obscurité.

Si la durée de l'éclair est assez petite pour que la roue n'ait pas le temps de se déplacer d'une quantité appréciable pendant le

temps où la lumière se produit, nous apercevrons la tache comme si elle était complètement immobile, et avec toute la netteté qu'il est possible de souhaiter.

La méthode consiste donc à ne laisser voir qu'une des positions de la tache et à escamoter toutes les autres. C'est une espèce de prise de vues instantanées superposées les unes aux autres, où l'œil

Fig. 64. — Principe de la méthode stroboscopique.

La source de lumière instantanée, synchronisée avec la roue, éclaire toujours la tache A en un même point. La tache paraît alors immobile. Si le synchronisme n'est qu'approché, les éclairs surprennent la tache à des positions décalées les unes sur les autres A_1 , A_2 et la tache semble se déplacer lentement.

joue le rôle de l'appareil photographique, et l'instrument à éclairs celui de l'obturateur.

Si la roue fait au moins dix tours par seconde, la persistance des impressions sur la rétine suffit pour donner l'illusion d'une vision continue, sans aucun tremblotement.

Ceci posé, admettons qu'au lieu de faire jaillir des éclairs à des

intervalles exactement égaux au temps que met la roue à faire un tour complet, c'est-à-dire en synchronisme parfait avec celle-ci, nous réussissions à les faire apparaître à des intervalles très légèrement plus longs que ce même temps. Le dispositif à éclairnement marchera un peu moins vite que la roue elle-même; nous allons en voir les conséquences.

A un tour donné, l'éclair surprend la tache en un point tel que A, et nous l'y fait apercevoir. Au tour suivant, quand la tache repasse au point A, l'appareil à éclairs, plus lent que la roue et par suite un peu en retard sur elle, n'est pas encore prêt à lancer sa lueur; c'est seulement quand la tache passe par A¹ que la brusque illumination se produit. Nous apercevons donc la tache en ce même point A¹. Au tour suivant, le mécanisme des éclairs, toujours en retard sur la roue, fonctionne quand la tache est en A₂, et ainsi de suite. Si bien que la tache, qui nous apparaît successivement en A, A¹, A₂, etc., a l'air de marcher lentement dans le sens de la roue, sens dans lequel elle se déplace à toute vitesse en réalité.

Plus le retard de l'appareil à éclairs par rapport à la roue sera petit, plus petits seront les intervalles, tels que AA¹, entre deux positions aperçues consécutivement à chaque tour de roue, et plus lent, par conséquent, sera le mouvement apparent de la tache. On pourra donc ralentir celui-ci autant qu'il sera nécessaire pour l'observer tout à son aise.

Il va de soi que si, au lieu de faire retarder l'appareil à éclairs sur le mouvement de la roue, on l'avait au contraire fait avancer sur lui, on aurait observé le phénomène inverse, c'est-à-dire que la tache aurait paru se déplacer plus ou moins lentement en sens inverse de sa marche réelle.

Voilà donc acquise la possibilité de rendre visibles, et facilement observables, des mouvements qui, par leur rapidité, paraissent devoir échapper à toute espèce d'examen direct.

Stroboscope Électrique

Généralement la source de lumière intermittente est constituée par un faisceau de lumière solaire, que l'on rend convergente par un système de lentilles, et sur le parcours duquel on place au point

de concentration un disque tournant opaque, portant une étroite fenêtre. L'ensemble est disposé de telle sorte que l'objet à examiner par stroboscopie ne puisse recevoir que les rayons qui passent par la petite fenêtre (fig. 65).

Fig. 65. — *Stroboscope solaire.*

Etude du mouvement d'une roue. — Le disque à fenêtre est mis en synchronisme approché avec la roue.

Comme celle-ci ne laisse passer de la lumière que quand elle se trouve au point de concentration C, on conçoit que si elle est étroite et le faisceau bien resserré, la durée de l'éclairement est extrêmement faible dès que le disque tourne à quelque vitesse.

On peut varier le genre d'obturateur pour raccourcir encore la durée d'éclairement, notamment en employant deux disques tournant en sens inverse l'un de l'autre, etc.

Nous n'avons pas fait appel toutefois à un dispositif de ce genre, pour des raisons que nous exposerons en même temps que nous décrirons nos appareils. Nous avons choisi, comme source de lumière intermittente, la décharge électrique, et dans beaucoup de cas la décharge en atmosphère rare, telle qu'elle se produit dans les tubes de Geissler.

Bien que composée généralement d'une série d'éclairs multiples

d'intensité décroissante, l'étincelle électrique peut être considérée comme une source de lumière pratiquement instantanée. Sa durée, bien inférieure à un cent millième de seconde, est assez faible pour permettre la photographie à courte distance des projectiles d'armes à feu (Mach et Salcher). Elle convient donc tout particulièrement dans le cas qui nous intéresse.

Pour obtenir des intensités lumineuses suffisamment grandes, nous avons fait emploi d'une assez forte bobine d'induction, capable de développer normalement entre ses pointes des étincelles de 25 centimètres de longueur.

Ce n'est pas sous cette forme cependant que la décharge est pratiquement utilisable. Nous la réduisons à une longueur de 15 millimètres, en adjoignant au secondaire de la bobine une batterie de condensateurs. L'étincelle est alors extrêmement brillante et très riche en rayons violets et ultra-violets. En la faisant jaillir au voisinage du foyer d'un assez grand réflecteur parabolique, on obtient un faisceau très puissant, qui donne sur son parcours une intensité lumineuse de même ordre que celle d'une forte lampe à incandescence.

Malheureusement, l'étincelle ainsi raccourcie est extrêmement bruyante et produit de véritables détonations, ce qui est gênant pour l'opérateur. Il est également nécessaire de se protéger les yeux contre l'effet des rayons ultra-violets qu'elle émet en très grande quantité. Il arrive aussi que certains insectes, paralysés par la peur qu'ils éprouvent au milieu d'un tel vacarme, refusent de battre des ailes.

L'étincelle, malgré ces quelques inconvénients, auxquels il est du reste possible de parer par des mesures spéciales, telles que l'emploi de verres dépolis, de caisses d'isolement, etc., donne d'excellents résultats, particulièrement lorsqu'on veut faire des prises de vues cinématographiques. Sa puissance permet même d'opérer pendant le jour, sans qu'il soit nécessaire de faire l'obscurité dans la salle.

Pour le simple examen rapide, nous faisons le plus large emploi de la décharge dans des tubes de Geissler spéciaux, roulés en spirale ou en cylindre, et contenant de l'azote à la pression de 1 milli-

mètre de mercure. Le tube est placé soit dans un réflecteur courbe, soit simplement dans une caisse à parois réfléchissantes et diffusantes.

Ces tubes donnent toute satisfaction quand le mouvement à étudier n'est pas trop rapide. Malheureusement, les oscillations du circuit primaire de la bobine provoquent l'apparition d'éclairs multiples, à des intervalles de temps qui ne sont pas négligeables et qui sont voisins de $1/3.000^e$ de seconde pour la bobine que nous employons actuellement. D'autres bobines ont conduit à des périodes plus courtes, mais il ne nous a pas été possible de les éliminer complètement.

La conséquence en est la production, à chaque éclair, d'un train d'images régulièrement espacées et chevauchant entre elles. Si le mouvement à étudier n'est pas trop rapide, les images sont très peu décalées les unes sur les autres, et les vues restent pratiquement nettes. Mais, quand la vitesse s'élève un peu trop, le décalage s'aperçoit et le trouble commence. Ces oscillations sont donc extrêmement gênantes.

L'intercalation de distances explosives, dans le secondaire, ne suffit pas, contre toute attente, à les faire disparaître. Lorsque ces distances sont assez grandes pour que les oscillations ne puissent plus passer, le tube perd la majeure partie de sa luminosité et ne peut plus servir à grand'chose.

L'intercalation de résistances liquides ne donne pas de meilleurs résultats, pas plus du reste que les montages indirects sur le circuit externe des détonateurs. Par contre, les oscillations sont d'autant plus amorties que le tube présente une plus grande longueur et une plus petite section, en même temps que de plus petits électrodes, c'est-à-dire qu'il est plus résistant. Avec de tels tubes, on obtient des décharges à peu près complètement épurées de toute oscillation parasite. La vision est alors aussi nette, à peu de chose près, qu'avec l'étincelle, et, bien que la luminosité soit beaucoup moindre, nous préférons le tube pour un premier examen direct.

Son fonctionnement silencieux permet de faire sans fatigue les plus longues expériences, et, quand il s'agit d'insectes, on obtient alors des vols beaucoup plus soutenus, car l'animal n'est plus

incommodé par de violentes commotions atmosphériques, comme c'est le cas dans la marche par étincelles.

Pour des examens d'un genre plus particulier, nous avons également employé l'ampoule de Crookes, faisant ici, croyons-nous, la première expérience de radio-stroboscopie.

Le sujet à examiner était intercalé entre l'ampoule synchronisée avec lui et l'écran fluorescent. Nous n'avons encore appliqué cette méthode qu'à l'étude des mouvements des masses gazeuses, enfermées dans des récipients opaques aux rayons ordinaires, mais présentant une certaine transparence pour les rayons X.

Il va de soi que le procédé reste applicable à l'étude de tout mouvement vibratoire interne chez un animal quelconque, pourvu que les éléments mobiles présentent une certaine opacité pour les rayons X.

Production de la Décharge électrique

La décharge, étincelle ou effluve, se produit à chaque rupture du circuit primaire de la bobine d'induction. Il suffit donc tout simplement de provoquer ces ruptures en temps opportun, c'est-à-dire toutes les fois que l'objet dont on étudie le mouvement occupe une position bien déterminée et toujours pareille, si l'on veut une *image fixe*, ou une série de positions voisines les unes des autres et progressant régulièrement, si l'on veut examiner le mouvement tout entier *au ralenti*.

Il faut donc mettre le dispositif de rupture en synchronisme complet, ou approché, avec le mouvement à étudier. On peut y arriver de deux manières :

La première consiste à demander au mouvement lui-même de provoquer périodiquement les ruptures.

La seconde consiste à synchroniser, indépendamment et par tâtonnements, l'appareil à rupture avec le mouvement.

1° Rupture automatique :

a) Interrupteur oscillant.

Les appareils varient selon que le rupteur est du type oscillant ou du type tournant.

Avec le rupteur oscillant la fermeture du circuit primaire est assurée par deux forts grains de contact en platine iridiée, placés de préférence dans une atmosphère de gaz d'éclairage.

Fig. 66. — Schéma du Stroboscope à rupture automatique (interrupteur oscillant).

L'insecte, maintenu à la pince au-dessus de la plaquette en provoque l'oscillation par la chasse d'air périodique due aux battements de ses ailes. Un relais, électriquement lié à la plaquette, produit la rupture du primaire de la bobine.

La rupture est obtenue par la séparation des grains, dont l'un est fixe et dont l'autre est assujéti sur une armature oscillante en fer, susceptible d'être attirée par un électro-aimant. Le contact est assuré par un ressort de rappel accroché à l'armature et au socle de l'appareil (fig. 66).

Toutes les fois que le courant est lancé dans l'électro-aimant, le circuit primaire est rompu par suite de l'attraction de l'armature qui entraîne un des grains, et l'étincelle jaillit au secondaire.

Le courant d'alimentation de l'électro-aimant est lui-même établi et rompu par un petit interrupteur très léger et très sensible, à grains de contact très fins, et dont la fermeture peut être provoquée sans demander d'effort appréciable.

Dans de telles conditions, l'on voit que si ce dernier interrupteur vient à être fermé, le courant passe dans l'électro et provoque la coupure du primaire, d'où résulte finalement la décharge à haut potentiel produisant l'éclairement.

Pour les insectes, l'interrupteur léger est constitué par une petite feuille d'aluminium extrêmement mince, pouvant basculer, sous le moindre soufflé, autour d'un axe horizontal, et portant un très petit grain de platine. Ce grain peut prendre contact avec un autre qui est fixe, ou s'en détacher. Une amplitude de mouvement de la plaque, d'un dixième de millimètre, suffit à produire la fermeture ou la coupure.

Si dans ces conditions on fait voler un insecte à la pince, en le maintenant à une distance déterminée de la plaque, la chasse d'air intermittente que produisent ses ailes suffit à la faire osciller et à établir et rompre le contact à chaque battement. Comme les temps morts restent constants si l'on ne déplace pas l'insecte, l'étincelle jaillit régulièrement et l'illumine toujours en un même point de son battement qui apparaît seul, et donne l'illusion de l'immobilité pour une position donnée.

En déplaçant lentement l'insecte, ou en faisant varier les constantes de temps de l'électro, on obtient, par variation continue des temps morts, des images qui se déplacent lentement, dans le sens du battement ou en sens inverse, ce qui donne l'illusion du battement ralenti et en permet le facile examen.

Dans d'autres expériences, la rupture et la fermeture du petit contact étaient obtenues par choc avec une tringle très légère, maintenant l'insecte captif et tournant avec lui. Nous reviendrons sur cet essai quand nous exposerons les résultats trouvés (fig. 67).

Fig. 67. — Schéma du Stroboscope à rupture automatique (manège).

L'insecte lié par une patte à une légère tringle lui communique par son vol un mouvement circulaire rapide. A chaque tour la tringle rencontre un rupteur élastique agissant sur un relais (non figuré) qui coupe le circuit primaire. L'insecte est aperçu toujours à la même place, mais ses ailes ne présentent pas l'apparence d'immobilité. On distingue une série des positions qu'elles prennent au cours du battement.

b) Interrupteur rotatif.

Pour les mouvements dont on est maître, il est plus commode d'employer l'interrupteur rotatif. Ces interrupteurs sont couramment utilisés pour l'allumage des moteurs à explosion. Ils sont généralement très bien faits, et nous les employons tels quels, en ayant soin toutefois de les placer dans un récipient étanche où l'on fait passer du gaz d'éclairage.

Ici, nous n'avons plus besoin de relais, et l'interrupteur coupe directement le courant de la bobine. Dans le gaz, nous avons encore un bon fonctionnement en coupant 5 ampères sous 48 volts. Mais il ne faudrait pas trop dépasser cette limite, sous peine d'arri-

Fig. 68. — Boîte de vitesses du Stroboscope à rupture automatique
(Interrupteur tournant).

On distingue 3 balladeurs. Celui d'en haut permet d'obtenir le synchronisme exact, le synchronisme approché par défaut et le synchronisme approché par excès. Les deux autres ne donnent que le synchronisme exact et approché par défaut. La démultiplication est faible pour le deuxième pignon (mouvements très ralentis) et très faible pour le troisième (mouvements apparents presque insensibles).

ver à des irrégularités au point de vue de l'instant de jaillissement de l'étincelle.

La rotation de l'interrupteur est obtenue par un changement de vitesse actionné par le mouvement que l'on veut examiner.

Nous en donnons ci-contre deux photographies (fig. 68), avec schéma du dispositif employé (fig. 69).

Le changement de vitesse est ici intercalé entre le moteur actionnant le tout et l'accouplement avec le mouvement à observer. Il est enfermé dans un carter en tôle et comporte 4 roues, l'une solidaire de l'arbre principal, le long duquel elle peut coulisser sur une clavette longue ; les trois autres sont à demeure sur un arbre secondaire portant le rupteur.

Nous avons perfectionné depuis ce dispositif et augmenté beaucoup les puissances, mais le principe est resté le même. Dans celui qui est ici figuré, la roue qui est sur l'arbre principal possède 66 dents, et les trois roues clavetées sur l'arbre de l'interrupteur en ont respectivement 65, 66 et 67.

Quand le pignon balladeur de 66 dents engrène avec la roue du milieu, qui en possède également 66, le rupteur tourne à la même vitesse que l'arbre principal. Si un objet, tel qu'une hélice, est accouplé à cet arbre, il sera donc illuminé toujours au même point de sa rotation et paraîtra fixe.

Quand le pignon balladeur de 66 dents engrène avec le pignon de 67, l'arbre du rupteur tourne un petit peu moins vite que l'arbre principal portant l'hélice. Sa vitesse n'est que les 66/67 de celle de cet arbre, le dispositif à éclairs retarde sur le mouvement à étudier, perd un peu de temps à chaque tour, et les éclairs, surprenant l'objet à des positions chaque fois plus avancées, donnent l'illusion de la marche dans le sens normal.

C'est le contraire qui se passe quand le pignon de 66 dents engrène avec celui de 65. On obtient alors l'illusion de la marche inverse.

Il va de soi que le mouvement à étudier n'a pas du tout besoin d'être rotatif. Il suffit qu'après l'accouplement se trouve un organe de transformation, pour que le mouvement se commue en alternatif de même période, et l'examen se fait tout aussi bien.

Fig. 69. — Schéma du Stroboscope à rupture automatique (Interrupteur tournant).

A chaque tour de l'arbre à trois pignons l'interrupteur coupe le primaire et une étincelle jaillit. Si le rapport d'engrenage est de 1, le stroboscope éclaire l'hélice toujours à la même place et celle-ci paraît fixe. Si le rapport est de 66/67 ou 66/65, l'hélice paraît tourner lentement dans le sens direct ou en sens inverse.

2° Rupture indépendante.

Il est quelquefois très commode, pour l'étude des insectes en particulier, d'opérer en synchronisant soi-même par tâtonnements le dispositif de rupture avec le mouvement à observer. Le seul inconvénient que présente cette méthode provient de ce qu'elle ne s'applique qu'à des mouvements parfaitement réguliers, ce qui n'était pas nécessaire dans le cas de la rupture automatique.

Avec certaines espèces, comme le sphinx bourdon (*macroglossa stellatarum*, très commun dans nos jardins pendant tout l'été), on n'obtient rien de bon, parce que le battement est saccadé et que la fréquence change tout le temps.

Par contre, cette méthode réussit bien avec le sphinx du liseron (*convolvuli*), du troëne (*ligustri*), de la vigne (*deilephila elpenor*), du pin (*pinastri*), avec les hyménoptères, guêpes, frelons, et avec les coléoptères qui consentent, comme la petite cétoine, à voler en captivité au bout d'une courte attache.

Elle est la seule possible avec les libellules dont le vol à la pince est trop court pour qu'on ait le temps de trouver la place qui leur conviendrait au-dessus de la petite plaquette du précédent dispositif.

Le mécanisme de rupture est alors constitué comme suit :

Une turbine à jet de mercure dans le gaz (fig. 70) pareille à toutes celles que l'on emploie pour les bobines d'induction de T. S. F. et de radiologie, est entraînée par un moteur électrique, muni de deux enroulements d'excitation, l'un en dérivation et l'autre anticomposé. Ce deuxième enroulement présente l'avantage de régulariser la vitesse. Si en effet une petite résistance vient à se produire, le courant augmente et le champ diminue; le moteur cherche donc à accélérer et finalement le régime reste stable.

Il est indispensable de munir le moteur de cet enroulement, si l'on ne veut pas détruire le synchronisme quand on fait varier le courant primaire. Il se produit en effet un phénomène assez curieux, dont nous dirons quelques mots.

La bobine étant alimentée par une batterie d'accumulateurs, indépendante de celle qui actionne le moteur de la turbine, on

constate un ralentissement de celui-ci dès qu'on ferme l'interrupteur du courant primaire, autrement dit, dès qu'on fait fonctionner la bobine. Cela tient, pensons-nous, aux courants de Foucault, que l'élément de courant mobile, véhiculé par le jet de mercure, développe dans les masses métalliques voisines et dans la masse même du mercure.

Fig. 70. — Schéma du Stroboscope à rupture indépendante.
(Turbine à mercure).

On synchronise le rupteur par tâtonnements avec le battement de l'insecte en agissant sur le moteur du rupteur au moyen du potentiomètre de réglage.

Quand on fait varier l'intensité, ces courants varient eux-mêmes, et aussi la résistance que l'on éprouve à faire tourner le jet de mercure. Le moteur tend à ralentir, et le synchronisme n'est plus suffisamment approché.

On voit alors le mouvement apparent s'accélérer, et l'examen

devient difficile. On pourrait, il est vrai, le ramener bien vite à sa vraie valeur, mais les mains sont occupées à tenir l'insecte et à manœuvrer le rhéostat du primaire, ou bien, si l'on photographie, à déclancher l'obturateur, et il vaut mieux n'avoir pas à intervenir.

Le moteur électrique actionnant la turbine à mercure est commandé par un potentiomètre P à contacts glissants, qui sert à régler sa vitesse jusqu'à l'obtention du synchronisme. Il doit comporter un grand nombre de spires pour arriver à la précision nécessaire.

Enregistrement Photographique

Dans la stroboscopie au point fixe avec commande automatique, il est excessivement facile de prendre des vues photographiques. On opère sur un objet d'apparence immobile, et il suffit de poser le temps nécessaire. Avec l'interrupteur oscillant, on n'arrive pas cependant à une fixité suffisante pour avoir de bons résultats, et il est rare que l'on n'ait pas plusieurs images non exactement superposées sur la plaque. La méthode, par contre, réussit très bien avec l'interrupteur rotatif, puisque la fixité est alors complètement obligatoire et ne dépend ni de l'opérateur, ni du sujet.

Il est à remarquer pourtant que l'on n'obtient ici que des vues fixes, généralement dépourvues d'un réel intérêt. Il est donc indispensable d'opérer de manière à prendre la succession des positions, c'est-à-dire d'enregistrer une véritable cinématographie du phénomène.

Enregistrement Cinématographique

L'appareil que nous avons établi présente d'assez nombreuses analogies avec celui que M. Bull a réalisé, plusieurs années avant nous, pour l'étude et la photographie stéréoscopique du vol d'insectes en liberté.

Rappelons brièvement le principe de son instrument qui lui a permis d'obtenir de remarquables épreuves.

Une bobine d'induction a son circuit coupé et rétabli par deux balais, frottant sur les lames contiguës d'un grand collecteur, et produisant une rupture au passage de chaque lame. Un tambour en carton est claveté sur l'arbre de ce collecteur et porte un double

film. En face de chacun d'eux est placé un objectif en quartz achromatisé par du spath. Un obturateur est disposé en arrière.

Le film est contenu dans une boîte octogonale en bois, pour pouvoir opérer à la lumière du jour.

Deux étincelles en série, de 1 millimètre chacune, jaillissant entre des pointes de magnésium, en arrière d'un système concentrateur en quartz, viennent former image au centre optique de l'objectif.

L'insecte à photographier est généralement placé dans un tube muni d'une porte en mica, dont l'ouverture provoque le déclenchement de l'obturateur.

L'instrument étant mis en marche, les étincelles jaillissent avec un son musical, à une fréquence d'ailleurs quelconque, et qui, dans les derniers essais de M. Bull, a pu être poussée à 3.000 à la seconde. On démasque alors une fenêtre pour attirer l'insecte captif dans son tube. Il s'envole, bascule la porte de mica, qui, en retombant, fait déclancher l'obturateur. Il est alors photographié autant de fois par seconde qu'il jaillit d'étincelles pendant le même temps, et l'on obtient une véritable cinématographie stéréoscopique.

L'obturateur, qui s'est ouvert au moment de l'essor de l'insecte, se referme automatiquement quand toutes les vues sont prises.

Au point de vue photographique, ce procédé est parfait, et présente sur le nôtre une supériorité marquée en ce qui concerne l'étude du vol, car il permet de photographier des insectes en pleine liberté. Il ne faut pas oublier toutefois que nous avons cherché surtout l'examen direct en pleine lumière de l'animal, et l'étude des remous produits par le mouvement de ses ailes, ce qui impose l'obligation de maintenir le sujet captif.

La photographie ne joue ici qu'un rôle secondaire, consistant à fixer d'une façon durable certains des principaux résultats d'observation.

Le procédé de M. Bull ne permettait pas cet examen, qui nécessite absolument l'emploi de la méthode stroboscopique, avec une source de lumière intense et synchronisée.

Ceci posé, nous allons expliquer le principe de notre appareil

Fig. 71. — Schéma du Strobographe électrique enregistreur.

Le synchronisme est obtenu en agissant sur le moteur qui entraîne à la fois l'interrupteur et le tambour porte-film. Les rapports de vitesse et le diamètre de celui-ci sont calculés de telle sorte que pour un tour complet du tambour, il se produise un nombre d'étincelles égal au nombre de fois que le film contient la hauteur d'un cliché cinématographique normal, soit 18 m^{m} . On synchronise par défaut en agissant sur le potentiomètre. L'obturateur est alors déclenché. Tous les films d'insectes reproduits dans cet ouvrage ont été pris avec cet instrument.

d'enregistrement, permettant à la fois l'examen et la prise de vues cinématographiques.

Il comporte d'abord un tambour avec dispositif de tension du film. Ce tambour est en acier; le diamètre en est calculé de façon à ce que la longueur du film qu'il reçoit soit un multiple exact du pas de la bande cinématographique.

Il est animé d'un mouvement de rotation très lent, qui lui est communiqué par un train réducteur d'engrenages, dont la roue de tête est attaquée par la dynamo d'entraînement; celle-ci porte en bout d'arbre le mécanisme de rupture (fig. 71 et 72).

Le rapport de vitesse entre le tambour et la dynamo est de 48 dans le cas figuré ci-contre, c'est-à-dire que l'étincelle jaillit 48 fois par tour de la grande roue. Celle-ci doit donc avoir un développement précisément égal à 48 fois la hauteur d'une vue cinématographique ordinaire.

D'autres roues, permettant de prendre jusqu'à 144 vues par tour, peuvent être adaptées. Le rapport d'engrenage est en même temps modifié dans le carter qui a été prévu à cet effet. Il faut en outre changer, pour chaque genre de roue choisie, la boîte en bois qui la contient et porte l'objectif.

Généralement le tambour à 48 vues est suffisant. Il est intéressant d'opérer parfois avec la roue de 96 vues. La roue de 144 n'est à employer qu'exceptionnellement.

L'objet dont on veut prendre le film stroboscopique est maintenu dans les limites d'un cadre, déplaçable le long d'une forte règle en acier graduée. On effectue la mise au point en enlevant la roue et en glissant à la place où elle se trouve, devant l'objectif, un simple verre dépoli. L'obturateur est alors ouvert, et l'on se règle sur deux fils tendus dans le cadre et éclairés par derrière.

L'ouverture de l'obturateur est commandée par un électro-aimant à plongeur, muni d'un puissant ressort de rappel. Dès que le courant cesse dans l'électro, la fermeture s'opère.

Sur l'arbre de la roue est ajusté, à frottement demi-doux et réglable à volonté, un moyeu, portant un bras rectiligne équilibré, et butant normalement contre l'armature en gâchette d'un second

électro-aimant. Cette gâchette peut s'effacer pour libérer le bras dès que l'électro est actionné (fig. 72).

Le circuit de l'obturateur est monté en série sur un interrupteur normalement fermé, et que le bras peut venir heurter de manière à l'ouvrir après avoir accompli un tour complet, lorsque la gâchette l'a laissé partir.

Fig. 72. — Dispositif de refermeture automatique de l'obturateur.

Ce dispositif a été modifié depuis.

Enfin un galet à ressort, courant sur une rampe latérale assujettie sur le bras, lui laisse sa liberté de départ, mais vient s'opposer à ce qu'il fasse plus d'un tour, en revenant par élasticité se placer sur son parcours, de manière à le coincer en le butant en bout.

Le dispositif à éclairs, également monté sur la règle, comporte un éclateur placé au voisinage du foyer d'un réflecteur parabolique, derrière lequel sont logés les condensateurs.

En avant sont disposées deux grandes lentilles, destinées à assurer une plus grande homogénéité de fond qu'avec le réflecteur seul, qui n'est pas suffisamment parfait.

Fig. 73. — *Strobographe électrique enregistreur.*

On aperçoit le miroir concave et les deux supports de l'éclateur. Le grand condensateur n'est pas visible. Sous le miroir sont les potentiomètres de réglage dont on aperçoit les poignées blanches. Une glace dépolie est en avant de l'éclateur. Au fond, la caisse du strobographe avec ses rainures permettant l'emploi de tambours de différents diamètres. En bas et à gauche deux tambours porte-films.

Ces lentilles ont, il est vrai, l'inconvénient d'absorber à peu près toutes les radiations ultra-violettes, comme l'objectif du reste qui est en crown et flint ordinaires. Mais, en raison du grand excès de lumière rendu nécessaire par l'examen direct, cela n'a pas ici d'importance.

Lorsqu'on veut prendre une vue avec ce dispositif, on commence par mettre au point sur un objet fixe, puis on garnit la roue de son film et l'on referme la boîte. L'obturateur est alors fermé, et le bras immobilisé par sa butée.

On place l'objet à cinématographier dans le cadre de champ. S'il s'agit d'un insecte tenu à la pince, on lui laisse alors le libre

Fig. 73 bis. — *Stroboscopie radiographique.*

Stroboscopie radiographique d'un piston dans un cylindre. L'ampoule et la soupape sont peu visibles. Vers la droite : écran fluorescent. Sous le banc d'optique : potentiomètre de réglage. En combinant cet appareil avec un changement de vitesse on peut, en laissant les impressions se superposer, enregistrer des stroboscopies radio-cinématographiques.

usage de ses ailes. Si c'est un mouvement mécanique qu'il s'agit d'étudier, comme une aile artificielle ou comme une hélice quelconque, on l'actionne avec son moteur particulier.

Quand le régime est établi, on met en marche la dynamo entraînant le tambour et le rupteur. Des étincelles éclatent à une fré-

quence proportionnelle à la vitesse. On règle celle-ci de manière à obtenir un synchronisme approché.

Lorsque le mouvement à étudier apparaît avec toute la régularité et le ralenti voulus, on déclanche l'appareil en appuyant sur un bouton. Le courant est alors lancé simultanément dans l'électro du bras de manœuvre et dans celui de l'obturateur. Le bras est aussitôt libéré et l'obturateur s'ouvre. Quand la roue entraînant le bras est sur le point de repasser par la position pour laquelle a commencé la prise de vues, le bras vient buter sur l'interrupteur de l'électro, l'ouvre, et provoque ainsi la fermeture de l'obturateur. Le bras continuant son mouvement vient heurter le galet qui l'immobilise.

Il ne reste plus qu'à développer le film.

En enlevant l'objectif, et en garnissant de plomb la caisse de recouvrement, il serait possible de prendre des vues radiostroboscopiques, à la condition d'opérer avec de très petits insectes, pouvant tenir dans un champ de moins de $18^{\text{m/m}} \times 24^{\text{m/m}}$.

Il faudrait alors prendre un tube témoin pour éclairer l'objet, car les rayons X n'éclairant pas, on ne saurait pas si l'on est ou non au synchronisme approché.

Nous entreprendrons quelques expériences à ce sujet dans le courant de l'année.

II. - Vérifications Expérimentales relatives aux Courants de Remous

CIRCULAIRES DANS L'AIR

Nous avons effectué l'expérience suivante, pour apercevoir les circulaires autour d'un plan mince, se déplaçant dans l'air à grande vitesse.

Une petite boîte rectangulaire, très aplatie, dont les deux grandes bases étaient percées d'un certain nombre de petits trous, fut placée sur un bras tubulaire, monté lui-même sur un arbre creux (fig. 74).

Des trous furent percés dans l'arbre et à la sortie supérieure du

Fig. 74. — Etude des remous au stroboscope par émission de fumée.

Nota. — On peut étudier tout aussi bien les remous par la méthode du courant d'air.

bras, pour permettre à de l'air, soufflé par l'extrémité P, de pénétrer dans le bras, puis dans la boîte, dont il pouvait s'échapper par les petits trous pratiqués dans ses bases.

En P était adapté un raccord à frottement doux, auquel aboutissait un tube de caoutchouc. Le bras et la boîte étaient équilibrés par un contre-poids.

L'ensemble ayant été ajusté, par un manchon M, sur l'arbre du stroboscope à interrupteur tournant, et les trous de l'une des faces de la boîte bouchés avec de la cire, on fit tourner l'appareil, de manière à ce que l'air fût refoulé par la face dont les trous restaient libres.

On disposa le stroboscope pour une vision fixe et on lança, par le tube de caoutchouc T, de la fumée très épaisse, provenant de la combustion de vieux linges, dans un récipient clos de faible volume.

L'appareil paraissant immobile dans l'air, malgré une vitesse de rotation de 600 tours par minute, on pouvait en distinguer les moindres détails. On aperçut ainsi, tout autour du plan, et particulièrement sur les côtés, des boucles de fumée semblables à celles qu'indique la figure, où l'on suppose la boîte plate vue par en dessus.

Ces boucles étaient constituées par les circulaires antéro-postérieurs. En faisant varier la vitesse, on n'obtint pas de grandes modifications dans la forme de ces circulaires.

Nous nous préparions à essayer de prendre une vue photographique de l'expérience, lorsque le bras se rompit à l'assemblage avec la boîte qui, violemment projetée, se brisa complètement. En outre le déséquilibre qui en résulta produisit de telles déformations de l'ensemble que l'on renonça, faute de temps, à refaire un matériel plus solide.

Il était du reste à craindre que la photographie ne donnât pas grand'chose. Les filets de fumée observés n'étaient pas bien épais, car ils ne représentaient qu'une portion de la fumée totale débitée par l'appareil pendant une révolution complète.

En outre, la fumée « abandonnée » par la boîte à toutes les positions autres que celles montrées par la stroboscopie, faisait une

sorte de fond un peu trouble qui aurait gêné la prise de vues photographiques.

CIRCULAIRES DANS L'EAU

Il n'est pas nécessaire de revenir avec détails sur cette expérience déjà citée, et que tout le monde peut répéter, en déplaçant simplement une règle plate, normalement, dans une cuvette pleine d'eau, dont la surface a été légèrement saupoudrée de poudre d'amidon.

Les circulaires se voient nettement (fig. 75).

Fig. 75. — *Circulaires et onde de suite autour d'un disque en marche.*

On s'aperçoit de même, lorsque le plan, au lieu d'avancer normalement, s'incline sur sa trajectoire, que les circulaires du bord d'attaque se raccourcissent, et que ceux du bord arrière s'allongent considérablement, jusqu'à faire une véritable chasse, qui au commencement (entre B et C), est presque rectiligne.

On peut se faire une idée assez exacte des trajectoires accomplies en réalisant une figuration grossière des molécules elles-mêmes.

Il suffit pour cela de prendre un plat allongé, et légèrement

relevé sur ses bords, et de répandre à sa surface, de manière à les amener à se toucher, une très grande quantité de billes d'acier bien polies.

Les billes extérieures, refoulées sur les bords relevés du plat, tendent à redescendre, et déterminent ainsi une sorte d'état de compression du milieu, qui le fait ressembler, jusqu'à un certain point, à une tranche faite dans un liquide qui serait soumis à une certaine pression.

En prenant une règle plate, dont l'extrémité est appuyée contre le fond du plat, et que l'on déplace en un mouvement de translation, on refoule les billes qui, pressées par celles qui se tiennent sur les bords relevés, tendent à reprendre leur place. On a ainsi une grossière, mais assez fidèle image de ce qui se passe dans l'eau par exemple (fig. 76).

Fig. 76. — *Figuration des mouvements moléculaires par des billes d'acier.*

Lorsque la règle avance normalement, on voit les billes s'écarter et décrire la trajectoire caractéristique des circulaires. Après le passage de la règle, les billes glissent un peu en bas de leur sorte de talus, à cause du vide qui se fait en arrière, et on voit se former l'onde de suite.

Quand la règle s'incline sur sa trajectoire et marche comme une aile d'avion ou une pale d'hélice, on voit se raccourcir les circulaires de tête, qui ne font bientôt qu'esquisser le mouvement.

Les circulaires arrière s'allongent au contraire, et se rapprochent d'une ligne droite parallèle au plan dans les premiers instants de leur marche. Leur déplacement absolu résulte d'ailleurs de la combinaison de cette vitesse relative et de celle du plan lui-même; elle est dirigée, à peu de chose près, suivant une ligne droite perpendiculaire au plan mobile.

L'onde de suite ne vient plus que des régions situées au dessus du bord d'attaque.

Circulaires dans les Hélices

L'examen stroboscopique nous a permis d'étudier assez facilement la forme des circulaires autour d'une hélice en marche. Voici comment nous avons procédé.

Une hélice est calée sur le bout d'arbre du stroboscope électrique à interrupteur rotatif et à changement de vitesse. On sait qu'il est alors possible, en faisant la nuit dans la salle d'expérience et en mettant l'appareil en marche, d'apercevoir l'hélice à la lueur des décharges électriques périodiques, comme si elle était complètement immobile; si l'on manœuvre le changement de vitesse de manière à modifier le rapport des engrenages, on obtient une apparence de rotation de l'hélice, d'une suffisante lenteur pour qu'on en puisse distinguer continuellement les moindres détails.

Si l'on a fixé préalablement sur l'hélice un léger fil de soie, vers son bord arrière, ce fil se développe pendant la marche, et on l'aperçoit parfaitement. En calant le stroboscope au point fixe, le fil apparaît dans une immobilité complète et comme rigidifié, suivant une ligne courbe dont l'étude est très intéressante (fig. 77).

Loin d'obéir uniquement à la force centrifuge qui devrait le tendre suivant un rayon, le fil, sollicité par le courant d'air, s'allonge de manière à s'inscrire à peu près sur un cylindre ayant pour axe celui de l'hélice, et pour rayon la distance du point d'attache du fil à ce même axe.

Il est évident que, voyageant avec l'hélice, le fil ressent l'effet de l'air à la manière de l'observateur que nous avons supposé placé sur le corps en marche, quand nous avons étudié la question

des remous ; il se moule dans les filets d'air, comme le ferait une longue banderole que l'on tendrait en dehors de la portière d'un wagon en marche, et que l'on verrait violemment tirée en arrière, pour aller se recourber derrière la voiture. Or il est bien certain que la trajectoire suivie par les molécules, et qui affecte pour le voyageur la forme d'une simple boucle assez courte, ne serait pas du tout de même aspect si on l'inscrivait sur le sol immobile.

Fig. 77. — Vitesse relative de l'air sous une hélice, montrée au stroboscope par un fil fixé à la pale.

Il en est de même dans le cas du fil de l'hélice. Bien qu'immobile en apparence, et paraissant indiquer le véritable mouvement de l'air par rapport au sol, le fil en réalité ne montre que les courants d'air relatifs, les courants par rapport à l'hélice elle-même, et pour se faire une idée juste de l'expérience, il faut supposer que l'observateur est sur l'hélice et tourne avec elle.

Ceci posé, examinons de plus près la forme du fil. Nous le voyons s'échapper de la pale de l'hélice en restant fortement tendu.

Si l'hélice est bien faite, il s'en va de manière à prolonger exactement la pale elle-même à l'endroit où il la quitte. Les filets *relatifs* glissent donc sous l'hélice parallèlement à elle (1).

D'autre part, *quelle que soit la longueur du fil*, son extrémité E se recourbe toujours en un commencement de volute.

Ceci prouve donc l'existence de circulaires antéro-postérieurs,

Fig. 78. — Vitesses absolue et relative de l'air sous une pale d'hélice.

V' = Vitesse relative
 C = Vitesse absolue
 V = Vitesse de l'hélice

disposés les uns au-dessous des autres et courbant leurs crosses aux divers points de la trajectoire, comme l'indique la figure 32.

Le recourbement ne peut se faire tout de suite à la sortie, parce que le fil est continu, c'est-à-dire que ses diverses parties tiennent les unes aux autres, ce qui n'est pas le cas pour les molécules

d'air. En chacun de ses points, il est sollicité à la fois par celui des circulaires qui se recourbe et par l'ensemble de ceux qui continuent le mouvement pour aller s'incurver plus loin. Il est donc forcé d'obéir à cette dernière action, plus puissante puisqu'elle est en réalité une somme d'actions; en pointe au contraire, comme il n'y a pas d'autres éléments situés plus loin qui chercheraient à le tendre, il peut suivre les boucles des circulaires et s'incurver avec eux.

Il résulte de tout ceci que les circulaires antéro-postérieurs du bord arrière forment une série de volutes décalées les unes derrière les autres, et qui tendent à rétablir la pression sur la face dorsale de l'hélice.

(1) Si en réalité nous sentons une chasse d'air à peu près suivant l'axe de rotation, c'est que la vitesse propre de l'hélice (V) se compose avec cette vitesse relative (V') de filets, pour donner une résultante C qui représente la trajectoire *absolue* ou chasse pour l'observateur immobile (fig. 78).

Il est plus difficile d'apercevoir, par ce procédé, les circulaires du bord d'attaque ou circulaires de tête, lorsque le pas de l'hélice est petit, c'est-à-dire qu'elle marche à petite attaque. Ces circu-

Fig. 79. — Circulaires autour de la tranche antérieure d'une hélice.

La feuille de papier est chassée *en arrière* du mouvement de l'hélice et vient jusqu'en OC, puis après être revenue en OD elle se replace en OA.

lares sont très rétrécis, très diminués comme diamètre. Presque complètement aplatis sur l'hélice à l'avant, ils se recourbent suivant un faible rayon et il faut employer un fil très court si l'on veut les voir. Il faut en outre le fixer tout près du bord antérieur; sans

cette précaution, le fil aurait son extrémité prise par les circulaires du bord postérieur, qui auraient vite fait de l'entraîner avec eux.

Il est plus commode de les montrer d'une autre façon. Prenons une petite bande de papier fort, rectangulaire, puis ayant arrêté l'hélice, plaçons la bande dans un plan passant par l'axe de rotation de celle-ci, et approchons la tranche de papier aussi près que possible de la tranche antérieure ou bord d'attaque de l'hélice (fig. 79). La bande étant maintenue fixe, mettons tout l'appareil en marche. Bien que l'hélice ne puisse toucher la tranche de papier et en passe seulement très près, on entend, dès que la vitesse atteint quelque valeur, un ronflement qui s'accroît et parvient à une extrême intensité, lorsque la rotation de l'hélice est rapide. Il arrive même que le papier s'effiloche et fasse une espèce de charpie sur sa frange.

Mettons à cet instant le stroboscope sur vue tournante. On verra l'hélice se déplacer très lentement et il sera possible d'apercevoir toutes les oscillations de la bande de papier, qui auront l'air également de s'effectuer tout doucement, malgré le caractère de vibration qu'elles ont en réalité.

Nous verrons que quand l'hélice approche de la bande, celle-ci est d'abord un peu refoulée vers l'avant par les circulaires. Puis, dès que le passage du bord de l'hélice est accompli, la bande de papier revient fortement en arrière, puis elle s'arrête, pour essayer finalement de repartir avec l'hélice et de la suivre. Nous avons ici une idée de la trajectoire *absolue* des circulaires, puisque cette fois-ci le témoin qui nous sert de base est immobile dans son ensemble, et n'exécute que des mouvements oscillants par rapport au sol. Nous y retrouvons bien la caractéristique des trajectoires absolues des circulaires, telle que nous l'avons décrite au début de cet ouvrage. Poussée légère en avant de A en B, retour en arrière de B en C, et marche dans le sens du corps de C en D. C'est une justification de la forme de boucle que nous avons indiquée.

Circulaires et Onde de suite dans une Aile battante alternative

Pour l'étude des remous de l'aile alternative, nous avons employé les mêmes procédés que pour l'hélice dont il vient d'être

question. Nous avons toutefois multiplié les témoins de papier, auxquels nous avons laissé plus de liberté, et que nous avons disposés sur une rampe, pour en suivre plus facilement les déplacements relatifs.

Le mouvement alternatif avec changement de plan commandé à chaque extrémité a été réalisé par un procédé déjà connu et que certains constructeurs ont employé, pour transformer en mouvement de rotation le mouvement alternatif du piston d'un moteur.

Ici, c'est le contraire qu'il s'agit de réaliser : il faut transformer le mouvement circulaire de l'arbre du stroboscope en un mouvement alternatif avec changement de plan *commandé*. L'explication en est assez délicate ; le mouvement, que l'on saisit tout de suite quand on le voit, est plus difficile à exposer clairement.

Voici en quoi il consiste (fig. 80) : Sur un axe vertical est placé un tube pouvant tourner autour de lui, et portant en son milieu deux tourillons pareils à ceux d'un canon. Sur ces tourillons vient s'articuler une fourche, dont le manche est terminé par une rotule ; cette rotule est saisie dans un plateau circulaire, claveté sur l'arbre du stroboscope. On voit que quand ce dernier tourne, la rotule, forcée de le suivre, décrit un cercle.

La fourche est donc obligée de tourner dans tous les sens, pour que la rotule puisse accomplir sa trajectoire circulaire. Elle communique donc au tube, sur lequel elle s'assemble par les tourillons, un mouvement d'oscillation.

On voit d'autre part que selon que la rotule se tourne vers le bas ou vers le haut du cercle qu'elle décrit, la fourche est inclinée de même. Si donc la fourche se termine vers l'avant de la figure par une poignée qui lui appartienne, située dans le prolongement des tourillons, lorsque le plateau fera un tour complet, cette poignée, qui fait partie de la fourche, accomplira une oscillation complète aller et retour autour de l'axe vertical. En même temps, elle tournera sur elle-même dans un certain sens, puis en sens inverse.

Il suffit donc d'assujettir dans la poignée le manche d'une petite aile artificielle, et de l'orienter convenablement, pour voir l'aile battre alternativement dans un plan horizontal, et changer d'incli-

Fig. 80. — Aile battante à changement de plan commandé à chaque fin de course.

naison à chaque demi-course, comme fait l'aile d'un insecte ou d'un oiseau.

L'ensemble des positions prises par l'aile aux différents points de sa course est figuré ci-contre par une succession de traits numérotés (fig. 81). Chacun de ces traits représente une position de l'aile projetée sur un cylindre droit, que l'on développe ensuite sur le

Fig. 81. — Positions de l'aile à changement de plan commandé à chaque fin de course.

plan de la figure. L'allée et la venue, au lieu d'être superposées comme cela se passe réellement, ont été dessinées l'une au-dessous de l'autre, pour augmenter la clarté.

Nous sommes donc en présence d'une aile battant à plat, et changeant de plan pour chaque demi-battement. C'est tout à fait le cas de l'aile d'un animal en vol au point fixe, ou en vol ascendant vertical. L'axe du corps sera figuré par l'axe vertical autour duquel oscille le tube à tourillons.

L'appareil ayant été mis en marche à une vitesse telle que l'aile batte à peu près comme celle d'un pigeon (envergure : 0 m. 65 ; battements : 480 par minute), nous avons placé le projecteur stroboscopique de manière à éclairer, non seulement l'aile dans toutes ses positions, mais encore une rampe déplaçable, portant une série de témoins de papier ou de clinquant d'acier très fin, formant autant de petites languettes serrées à leur base et libres à leur extrémité.

La rampe étant placée sous les ailes à quelque distance, et le stroboscope étant disposé pour l'examen à vues progressives, on observe un mouvement d'apparence ralentie des témoins de papier, qui s'inclinent suivant le sens où le courant d'air les sollicite.

On voit les témoins s'abaisser un peu après le passage de l'aile. C'est l'instant où ils reçoivent la *chasse* à peu près verticale, pareille à une chasse d'hélice que l'aile leur envoie. Plus la rampe est bas placée, plus ils s'inclinent tard, ce qui est du reste évident puisque le courant d'air met plus de temps à parvenir jusqu'à eux.

En fin de course, l'aile achève son retournement, et l'onde de suite, qui vient au contact de la face inférieure, lui restitue son énergie. On est alors témoin d'un phénomène de pression des plus importants, et qui est d'un intense effet : c'est celui qui, dans le cas de l'oiseau, donne l'effort de soulèvement cherché par l'animal.

Chose remarquable, cet effet se produit précisément aux instants où l'aile, qui est vers le bout de sa course, ne possède qu'une vitesse d'oscillation extrêmement faible. Nous verrons plus tard l'importance de ce fait dans la théorie des mouvements décalés, et combien il concourt à expliquer le vol à puissance réduite.

Il est très facile de noter la trajectoire de l'onde de suite. Il suffit de faire une émission de fumée au-dessus du plan d'oscillation de l'aile, pendant l'examen stroboscopique. On voit la fumée se diriger alternativement vers la droite et vers la gauche, à la

poursuite de l'aile qui, en se retournant, l'emprisonne, la ramène et l'expulse.

La récupération est ici visible. On voit pour ainsi dire l'onde qui déferle contre la surface, qui, la ramenant, la fait échapper ensuite par ses bords, la transformant immédiatement en circulaires dont celui du dessous constitue la chasse.

En fixant de même un fil à l'extrémité inférieure de l'aile, on voit, exactement comme pour l'hélice, ce fil suivre le plan de l'aile et se recourber en extrémité, décelant ainsi l'existence des circulaires successifs et étagés, sans qu'il y ait ici de différence de principe avec l'hélice elle-même.

Détermination des Efforts verticaux

Nous avons noté les efforts verticaux développés par l'aile alternative, par le procédé suivant : Deux points blancs, bien visibles, sont fixés sur l'aile. Puis, le stroboscope ayant été calé pour éclairage fixe, on amène l'aile à la position pour laquelle jaillit l'étincelle. Cette position sera celle où devra se trouver le mécanisme à l'instant de la vision.

On vise alors chaque point blanc avec une mire que l'on immobilise dans sa position. On met ensuite en marche et l'on observe à nouveau. En raison des flexions dues à son inertie propre et à l'action de l'air, l'aile se trouve généralement fortement relevée, et les points blancs, qui paraissent immobiles, ne coïncident plus avec les deux lignes de mires fixes.

Sans toucher aux deux premières, on place deux nouvelles mires fixes, de manière à viser les deux nouvelles positions des points.

Ceci fait, on arrête, et on donne la lumière ordinaire dans la salle. On ramène l'aile à la main de manière à ce que ses points blancs se trouvent bien en face des premières mires.

Si maintenant on fait fléchir l'aile en lui appliquant un effort normal à sa surface et passant par son centre de pression (1), on

(1) Ce centre de pression devra, autant que possible, être très voisin du centre d'inertie autour de l'axe vertical.

pourra, pour une certaine valeur de cet effort, ramener l'aile à se retrousser, d'une quantité telle que ses deux points blancs se trouvent exactement dans le prolongement des secondes mires.

A cet instant, l'aile se retrouvera fléchie exactement comme elle l'était au même point pendant sa marche, sous l'influence de

Fig. 82. — Courbes des efforts verticaux développés par une aile battante de 0 m. 55. Amplitude 70 degrés.

Les efforts maximum sont rapprochés des extrémités de la course, c'est-à-dire qu'ils se produisent aux instants où la vitesse est faible. — A rapprocher des courbes obtenues sur les plaques à mouvement alternatif dans l'eau (voir Appendice).

l'air et des effets d'inertie. L'effort à faire au dynamomètre, pour ramener l'aile à cette même position, sera donc égal à celui qu'exerçaient sur elle la résistance de l'air et son inertie propre.

Nous connaissons donc cet effort, et il suffira de le projeter sur la verticale pour connaître l'intensité de la poussée utile.

En recommençant l'expérience pour un certain nombre de points de la course, on peut tracer la courbe des efforts verticaux. Nous donnons ci-contre la représentation de cette courbe qui forme une double pointe (fig. 82).

Comme on le voit, l'effort est maximum aux deux extrémités de la course, c'est-à-dire quand l'aile est presque arrêtée. Il est plus faible quand l'aile marche à toute vitesse.

Les deux facteurs : effort, vitesse, obéissent donc à des lois telles que les maximum de l'un tendent à se produire en même temps que les zéros de l'autre, et vice versa. Cela revient à dire que les deux facteurs sont décalés l'un sur l'autre d'un angle qui tend vers 90 degrés.

Influence de l'Élasticité

Lorsque l'on fait l'expérience précédente avec une aile à manche et à voile trop rigides, elle ne réussit généralement pas bien.

A l'extrémité de sa course, l'aile semble prise par en dessus et rebroussée énergiquement comme pour prolonger sa course. Elle a l'air de recevoir quelque chose dans le dos avant son arrêt complet, et il apparaît sur l'aile un certain effort négatif ou dirigé vers le bas. Cet effort est essentiellement nuisible à la sustentation, et une aile artificielle ainsi réalisée n'aurait que bien peu de chances de se soulever en l'air.

Il cesse complètement de se manifester lorsque la poignée de l'aile possède une élasticité suffisante. L'aile n'est plus du tout prise par en dessus, n'a plus l'air de recevoir un poids sur le dos en arrivant à fin de course; elle se retourne au contraire avec aisance, et se soulève ensuite dans le bon sens en « volant » réellement, et de la façon la plus nette pour quiconque la voit.

A quoi tout cela peut-il être dû ? La raison en est des plus simples. Les mouvements alternatifs *mécaniques* n'ont jamais le caractère saccadé des mouvements alternatifs naturels. Tous ralentissent beaucoup, bien avant de parvenir en extrémité de leur

course. Un pendule, qui passe très vite au milieu de son parcours, a perdu la plus grande part de sa vitesse assez longtemps avant d'être arrivé à son point de relèvement maximum, auquel il atteint très lentement.

Il en est de même pour à peu près tous nos mouvements alternatifs, et particulièrement pour le mouvement à point central qui nous occupe actuellement. Or un très fort ralentissement et un arrêt total produisent pour l'air des effets de même espèce. Il en résulte que dès que ce ralentissement vient à se faire fortement sentir, l'onde de suite rattrape la surface et la prend par en dessus, alors qu'elle n'est pourtant pas encore arrêtée, et surtout pas encore retournée. L'effet produit est manifestement nuisible, puisque l'aile, réellement prise par en dessus, reçoit une poussée qui tend à la précipiter à terre.

L'élasticité du manche et du corps de l'aile corrige tout cela. En raison de son inertie et des efforts que lui a fait subir le coup précédent, l'aile se trouve tendue et fléchie en arrière du mouvement, sur lequel elle retarde. Quand la poignée commence à ralentir, l'aile se détend et continue son mouvement.

Les effets fâcheux du ralentissement prématuré ne sont alors plus à craindre. La poignée de l'aile a le temps de gagner son extrémité et de pratiquer son retournement, avant que l'aile elle-même ait pu marquer un sensible ralentissement. L'arrêt ne s'accomplit que quand la poignée est déjà en train de revenir en arrière; il est donc beaucoup plus brusque, et, chose importante, il ne s'accomplit que quand le retournement de plan (qui lui ne peut retarder) est déjà très fortement commencé. Tout se traduit par un grand bénéfice au point de vue de la portance, l'onde de suite déferle contre la partie qui est *en dessous*, et l'aile vole.

Au fond, c'est tout simplement le cas de la canne à pêche à extrémité flexible, dont le rôle est de transformer le mouvement trop lent du poignet du pêcheur, en une saccade brusque, susceptible d'accrocher le poisson, avant de lui laisser le temps de fuir.

Ici comme là, il y a avantage à brusquer les choses, et à obtenir un arrêt net, suivi d'un retour immédiat.

Expériences sur des Animaux volants

Ces expériences ont porté :

- 1° Sur les diverses positions prises par l'aile au cours du battement ;
- 2° Sur la répartition des courants de remous autour de l'aile ;
- 3° Sur l'utilité pour le vol de tels ou tels organes ;
- 4° Sur la constitution même des organes du vol (Etude anatomique).

POSITIONS SUCCESSIVES DE L'AILE AU COURS D'UN BATTEMENT

Le stroboscope permet d'examiner très facilement les battements des ailes des insectes. On peut opérer : soit au stroboscope automatique à interrupteur oscillant, soit au stroboscope à commande indépendante.

Avec l'appareil à interrupteur oscillant, l'insecte est maintenu à la pince, par l'abdomen, au-dessus de la plaquette vibrante. Nous avons décrit ce dispositif que nous rappellerons brièvement.

La petite plaquette, pareille à celle d'un microphone, établit un contact entre deux grains de platine, à chaque impulsion qu'elle reçoit par le vent des ailes de l'animal. Il en résulte l'ouverture et la fermeture périodiques du circuit d'un électro-aimant, dont l'armature porte les gros grains de platine ou de tungstène, intercalés dans le circuit primaire de la bobine d'induction.

A chaque impulsion de la plaquette, il y a rupture du circuit primaire par attraction de l'armature de l'électro-aimant, et une étincelle jaillit. Pour obtenir un éclairage intense et régulier, il faut que la rupture entre gros grains se fasse dans une atmosphère de gaz d'éclairage ou d'hydrogène.

L'insecte est ainsi éclairé périodiquement à une place déterminée de son battement, qui reste la même tant qu'on ne fait pas varier la distance de l'animal à la plaque.

Si l'on veut examiner les positions successives prises par l'aile au cours d'un battement complet, il suffit d'éloigner ou de rapprocher lentement l'insecte de la plaque. On peut obtenir le même résultat en changeant les constantes de temps des appareils électri-

ques, par l'introduction progressive d'une self-induction dans leur circuit.

Il est toutefois plus facile, dans beaucoup de cas, d'employer le stroboscope à turbine précédemment décrit. On amène la fréquence des interruptions à être voisine de celle des battements de l'insecte.

Fig. 83. — *Hanneton volant à la pince.*

L'insecte est vu de dos. On distingue ses élytres qui forment un dièdre et accomplissent elles aussi un mouvement de battement de très faible amplitude. Leur écartement est plus grand dans le cliché du bas que dans celui du haut. Remarquez le rapprochement considérable des deux ailes au-dessus du dos en fin d'élévation. — Lire le film de *bas en haut*.

Ce résultat est obtenu en réglant la vitesse du moteur électrique qui actionne la turbine à jet de mercure. Une résistance, montée en potentiomètre, permet d'y arriver facilement, par des tâtonnements qu'un peu d'expérience réduit bien vite à peu de chose.

Nous avons observé, par l'un et l'autre de ces procédés, une quantité considérable d'insectes. Mais toutes les espèces ne peuvent pas être étudiées de cette façon. Il faut des sujets qui consentent à battre des ailes, quand on les tient captifs par l'abdomen. Il faut en outre que les battements soient assez rapides pour que les éclairs se succèdent à faibles intervalles, sans quoi la vision serait discontinuée, saccadée, et très fatigante pour les yeux de l'observateur.

Ces conditions éliminent du rang des sujets bons pour le stroboscope la plupart des papillons diurnes, dont les battements sont trop lents, un certain nombre de diptères (mouches, taons, etc.), tous les orthoptères (sauteuses, mantes, etc.), la plupart des coléoptères, sauf le hanneton, la cétoine et, dans certains cas, le lucane ou cerf-volant.

Le hanneton, en particulier, consent à voler à la pince, quand on le maintient par la pointe dont est munie la partie inférieure de son abdomen. Il faut toutefois sectionner les tarses des pattes postérieures, sinon l'insecte saisirait la pince et refuserait de voler (fig. 83).

La petite cétoine vole au bout d'un fil assez court pour qu'il soit possible de la maintenir dans le champ de l'appareil stroboscopique. Le cerf-volant, chloroformé et fixé par les pattes à des attelles rigides, donne à son réveil quelques courtes poussées de vol.

Les libellules, maintenues très près du thorax, donnent parfois de bonnes séries de battements très réguliers (fig. 84). Le gomphus aeneus fait des vols courts, mais très soutenus. Les grandes libellules (*L. Depressa*, *Anax formosus*) se prêtent également bien au vol au point fixe.

Mais les insectes qui donnent les meilleurs résultats au stroboscope sont incontestablement les papillons nocturnes, et particulièrement les sphinx (fig. 85). Admirablement établis pour le vol, ces gros insectes crépusculaires battent avec une puissance et une régularité remarquables. La vibration de leurs ailes donne un son d'une hauteur constante, et qui rappelle le ronflement lointain d'une hélice d'avion. Leur corps, relativement lourd et d'aspect fusiforme, présente un corselet puissant, garni d'un système musculaire de belle taille. Les ailes, fortes et bien taillées, sont des propulseurs élégants et solides. On devine, au simple aspect de ces splendides insectes, que l'air est leur véritable domaine, et qu'ils y sont tout à fait chez eux.

Du reste, ils dédaignent de se reposer durant le cours de leurs longues pérégrinations. Quand ils stationnent devant une fleur, c'est l'air qui leur fournit l'appui nécessaire. Véritables hélicoptères immobilisés dans l'espace, ils battent sans arrêt. La rapidité du mouvement de leurs ailes produit une sorte d'ombre grise, qui enveloppe comme d'une vapeur leur corps sombre et fuselé, dressé presque verticalement.

Fig. 84. — *Libellule* volant à la pince.

C'est un admirable spectacle que de voir, au crépuscule, s'abattre un essaim de ces grands sphinx sur un massif de fleurs odorantes.

Fig. 85. — Vol du *Sphinx convolvuli*.

L'insecte maintenu à la pince est placé face à l'observateur en descendant comme pour venir à ses pieds. Le changement de plan est visible au milieu du film. On remarque en effet que la partie dentelée de l'aile qui constitue son bord arrière est tournée vers le haut pendant l'abaissement et vers le bas pendant l'élévation. — Lire le film de *bas en haut*.

La plante s'anime, les calices et les feuilles, refoulés par la chasse d'air des ailes, se ploient puis se redressent. Des corps sombres se déplacent par saccades, se fixent dans l'air qui vibre à l'unisson, et la contemplation de ce vol merveilleux nous a fait maintes fois retarder et manquer le coup de filet brutal qui devait interrompre la ronde, pour livrer un captif au laboratoire.

Plein d'aisance et d'ardeur pendant son vol libre, le sphinx n'a pas moins de souplesse et d'énergie quand on le maintient par l'abdomen à la pince légère, qui le fixe dans le champ du stroboscope. Le battement garde toute son amplitude et toute sa régularité. Si la pince est bien faite et ne blesse pas l'animal, on peut obtenir plusieurs vols avec le même sujet, à quelques jours d'intervalle.

Les plus robustes et les plus constants de ces insectes sont le sphinx du liseron et celui du troëne. Certains ont consenti à fournir des batte-

ments soutenus de plus de cinq minutes à la pince. On verra plus loin combien la prolongation et la constance du vol au point fixe

présentent d'intérêt dans l'examen stroboscopique, et particulièrement dans l'étude des remous.

D'autres sphinx, plus petits, ont également fourni de bons résultats. Nous citerons par exemple le sphinx du pin, celui du peuplier, le sphinx de la vigne à corps rose, et le petit sphinx de la vigne ou porcellus. Le macroglosse du caillelait, les hémaris et autres variétés du genre macroglossa, ont des irrégularités de battements qui rendent obligatoire l'examen à l'interrupteur oscillant et à la plaquette. En outre la cuirasse glissante dont est garni leur abdomen en rend difficile la contention par la pince.

La plupart des noctuelles de petite taille conviennent également et donnent de bons vols au point fixe (fig. 86). Nous en avons examiné un très grand nombre, appartenant à des sections et à des genres très variés. Le genre *Catocala* fournit les meilleurs éléments (*Likenée fiancée*, *Likenée bleue*, etc.).

Enfin quelques hyménoptères (guêpe, frelon, rarement le bourdon), donnent de courts vols à la pince. Leur vol manque un peu de

Fig. 86.
*Vol de l'Ecaillé
Martre (Caja).*

L'insecte tourne le dos à l'observateur et regarde un peu vers sa droite. Les premières vues (clichés du bas) correspondent à l'abaissement. Après le changement de plan (5^e vue) l'insecte est enveloppé comme d'un manteau par ses ailes.

Lire le film de bas en haut en commençant par la bande de droite.

régularité; il est préférable de prendre pour l'observer l'interrupteur à plaquette. Toutefois, comme le battement des ailes est ici très rapide, il est indispensable d'alléger la plaquette au maximum, pour n'être pas gêné par sa période propre de vibration. Aussi, pour ce genre particulier d'insectes, employons-nous une lame vibrante en aluminium très courte et légère, inclinée comme une pale d'hélice, et placée entre deux plaques de garde destinées à concentrer le courant d'air sur elle.

Étude du Mouvement des Ailes et des Remous produits

Vol Horizontal

Quel que soit l'animal choisi, le mouvement des ailes reste à peu de chose près le même. On observe presque toujours un rapprochement considérable des ailes au-dessus du dos de l'insecte (fig. 87).

Fig. 87. — *Vol du Grand Sylvain.*

Observer le rapprochement considérable des ailes.

L'abaissement se fait avec les ailes largement étalées et portant presque à plat, c'est-à-dire avec une faible inclinaison sur l'axe de marche.

Autrement dit, pour un insecte qui avance, quand l'aile s'abaisse, son bord antérieur ne descend pas sensiblement plus bas que le bord postérieur.

On pourrait se demander comment nous pouvons ainsi affirmer ce qui se passe par rapport à la trajectoire en vol libre, puisque nous n'étudions que des insectes au point fixe.

Bien qu'ici notre méthode d'investigation soit moins sûre que celle de la photographie directe de l'insecte en liberté, nous pouvons cependant nous placer dans des conditions comparables à celles du vol libre.

Il suffit de donner au corps de l'insecte, l'inclinaison sur la verticale qu'il prend naturellement pendant sa marche horizontale, et de souffler de l'air à sa rencontre, à une vitesse approximativement égale à sa vitesse normale de translation.

L'insecte, trompé par ce courant d'air et par la position de son corps, bat des ailes comme s'il progressait réellement, et il devient possible de se rendre compte des angles d'attaque qu'il adopte aux différents instants du battement.

Ceci posé, examinons ce qui se passe après l'abaissement. Nous y voyons succéder un retournement de l'aile énergique et rapide. L'aile remonte en se présentant presque perpendiculairement à la trajectoire. Elle fait donc à peu près un angle droit avec la position qu'elle avait pendant la descente. Presque verticale cette fois, elle revient en arrière tout en se relevant. Visiblement elle s'appuie sur l'air qui est en arrière, pour projeter le corps en avant, comme le feraient les pieds d'un nageur à l'instant de la progression.

Ce mouvement accompli, l'aile achève sa remontée en restant à peu près tangente à la trajectoire, jusqu'à ce que son bord antérieur vienne presque rencontrer le bord correspondant de l'autre aile. A cet instant

Fig. 88 — Vol du *Hanneton*.

L'insecte est vu de dos fuyant l'observateur en vol horizontal. Les premières vues (clichés du bas) correspondent à l'abaissement. L'aile est vue par la tranche. A la quatrième vue commence le changement de plan. L'aile tourne de 90 degrés et on l'aperçoit dans toute sa surface pendant l'élévation. — Lire le film de bas en haut.

existe sur le dos de l'insecte un dièdre qui se ferme à son tour, par rapprochement des parties postérieures des ailes, puis l'abaissement se produit de la façon précédemment décrite.

Ces divers mouvements sont nettement marqués sur les extraits de films stroboscopiques que nous donnons ici. Le premier repré-

sente le vol d'un hanneton, maintenu à la pince par le bas du corps, et dans l'attitude du vol horizontal. L'animal est vu de dos. On aperçoit ses élytres qui forment un dièdre au-dessus de son corps ; les ailes sont reconnaissables à leurs nervures (fig. 88).

Fig. 89. — Vol du Smérinthe du peuplier. L'insecte est vu de dos. A l'abaissement l'aile est vue par la tranche. A la quatrième image, changement de plan. Observer le rapprochement des ailes au-dessus du dos. — Lire le film de bas en haut.

Les positions 1, 2, 3, sont celles de l'abaissement. L'aile se présente alors par la tranche, et nous verrons plus loin combien cette attitude correspond à celle que prend l'aile du héron, aux mêmes instants de son vol horizontal.

Les positions 4, 5, 6, 7, sont celles de l'élévation. L'aile n'est plus vue par la tranche. Tout son voile apparaît en plein, et il est bien certain qu'elle s'est retournée de près de 90°.

Continuant leur mouvement d'élévation, les ailes viennent se rejoindre et parviennent presque au contact (voir fig. 83). Les inclinaisons de l'aile ou angles d'attaque ne sont pas très faciles à apprécier ici.

C'est là une des infériorités de la méthode photographique, qui ne donne que des silhouettes difficiles à bien interpréter. L'examen direct est infiniment plus

instructif et plus complet son seul inconvénient est de ne pas laisser de trace écrite.

Le second film représente quelques phases du battement d'un smérinthe du peuplier (fig. 89), maintenu à la pince dans une direction légèrement inclinée sur l'horizontale. Même rapprochement considérable des ailes au-dessus du corps, même descente à plat,

même changement de plan à la remontée. Il n'y a pas de différence avec le cas précédent.

Dans le cas du vol de l'oiseau, il est à remarquer que les attitudes à l'abaissement et à l'élévation sont encore de même genre en ce qui concerne l'orientation du plan des ailes. Pendant que l'aile descend, on voit clairement qu'elle ne s'abaisse pas obliquement, mais bien normalement. Quand elle passe à l'horizontale, elle rappelle tout à fait l'aile d'un avion en marche. Son bord antérieur n'est pas plus abaissé que le bord arrière, ils sont à peu près au même niveau.

Quand l'aile arrive au bas de sa course, une rapide flexion de la main permet au changement de plan de s'opérer. L'aile est tournée vers l'arrière, son plan est presque vertical, et la poussée qui doit produire la progression, en récupération sur l'onde de suite et sur les circulaires, peut s'accomplir normalement.

Vol ascendant Vertical

Lorsque le corps de l'insecte est tenu dans la position qui correspond au vol au point fixe, ou, ce qui revient à peu près au même, au vol ascendant vertical, on observe une différence dans l'aspect des plans de l'aile aux différentes positions de l'abaissement et de l'élévation.

Ici le corps est à peu près droit, et les ailes battent dans un plan très peu incliné sur l'horizontale. Le battement tend à devenir plus symétrique, et l'on observe un accroissement de l'incidence à l'abaissement. Dans cette phase, l'aile travaille en hélice développant un effort de traction dirigé suivant l'axe du corps, c'est-à-dire que son bord antérieur précède le bord postérieur, et ne se trouve plus dans un même plan, passant à peu près par cet axe.

L'aile est fortement inclinée vers l'avant, et agit comme une hélice tendant à développer un effort de traction vertical. A la fin de l'abaissement s'effectue un brusque changement de plan, permettant à l'onde de suite de venir frapper la face dorsale de l'aile et de joindre son effet à celui des circulaires, qui font un vide sur la face interne, actuellement retournée et qui regarde en haut. Cet instant correspond, comme pour l'aile artificielle, à un renforcement consi-

dérable de la poussée verticale. C'est le moment de la récupération.

L'aile revient ensuite, et l'élévation ressemble à l'abaissement, à cette différence près que tout est renversé, sens du mouvement et inclinaison du plan de l'aile. Il en résulte l'apparition d'efforts de même direction que précédemment.

Arrivée en fin d'élévation, l'aile fait un retournement de même espèce, quoique d'amplitude moindre, sans doute à cause de la différence de flexibilité.

La suite du battement se reproduit de la façon précédemment indiquée. Ce genre de vol correspond donc simplement à une exagération de l'amplitude des changements de plan, exagération rendue obligatoire par la nécessité d'obtenir des poussées nombreuses, dirigées verticalement dans l'axe du corps. Au lieu de faire effort dans l'axe pendant un temps sur deux, comme c'est le cas pour le vol horizontal, on a cette fois une poussée pour chaque temps. On en comprend tout de suite l'utilité, puisqu'il s'agit de supporter le poids du corps tout entier par la simple traction des ailes, alors que dans le vol horizontal ce même

effort de traction n'avait à vaincre que la résistance de l'inertie à la pénétration de l'air, et que les choses se passaient comme pour un avion, traîné par une hélice dont l'effort de traction reste bien inférieur au poids de l'avion lui-même.

Le film stroboscopique ci-joint donne quelques-unes de ces positions, pour un sphinx pinastri, placé dans l'attitude du vol au point fixe (fig. 90).

Fig. 90. — Vol du Sphinx du pin.

Attitude du vol au point fixe. Abaissement et changement de plan.
Lire le film de bas en haut.

Sens des Courants de Remous

Lorsque l'insecte, examiné au stroboscope, consent à fournir des vols un peu plus prolongés, il devient facile d'étudier les remous de l'air autour de ses ailes. Il suffit tout simplement de faire l'expérience avec témoins de papier, telle que nous l'avons faite pour l'aile artificielle.

En plaçant sous l'animal une minuscule rampe formée de languettes de papier courtes, maintenues par leur base et susceptibles de vibrer rapidement, on voit les choses se passer exactement comme pour l'aile artificielle. C'est la même chasse d'air sous l'aile, le même effet de vide en fin de course, le même retard à l'impulsion quand on éloigne l'insecte de la rampe.

Mais il y a ici quelque chose de plus. Comme l'insecte pos-

sède en réalité deux ailes, ou plutôt deux systèmes d'ailes, on peut voir le renforcement d'action qui résulte de leur influence *mutuelle*.

En plaçant un témoin de papier au voisinage du point où les ailes se referment (fig. 91), on voit ce témoin d'abord repoussé quand les ailes se relèvent, puis attiré violemment quand elles se séparent, et ceci sous l'influence du vide intense qui se fait à cet

Fig. 91. — Vol du *Sphinx* du pin (*pinastri*).

Un témoin de plume est fixé derrière l'insecte qui est vu de profil regardant vers la gauche dans la position du vol au point fixe. Un index constitué par un fil d'aluminium sert de repère fixe. A la première image (bas du film) les ailes sont rapprochées au-dessus du dos ; le témoin de plume repose contre le bout du fil métallique. Les ailes s'abaissent appelant une onde de suite. La plume se décolle alors de l'extrémité du fil et on voit grandir l'intervalle qui l'en sépare pendant toute la durée de l'abaissement. Elle indique la présence d'un courant (onde de suite) qui persiste fort longtemps. Nombre de battements par seconde : 33. — Lire le film de *bas en haut*.

instant sur le dos de la bête, par l'effet d'inertie des circulaires. Le témoin de papier en vient même à plonger entre les deux ailes. En le déplaçant latéralement, on le voit désigner le centre de l'aile, comme s'il voulait y atteindre. A cet instant le témoin est simplement sollicité par l'onde de suite, dont il matérialise ainsi l'existence. Il prouve la marche du grand courant de comblement parti à la poursuite du vide, et que l'aile de l'insecte, en fin d'abaissement, saura heurter et envelopper pour s'appuyer dessus.

La stroboscopie rend ici de grands services, car elle donne la possibilité de saisir ces invisibles courants, dont la fréquence élevée leur donne un caractère vibratoire, et qu'elle permet de tout « voir » avec une extrême clarté. Le lent mouvement des ailes, les ploiements progressifs du papier, se suivent pour ainsi dire phase par phase. On peut déplacer les témoins, explorer les diverses parties de l'air autour de l'insecte, fixer des fils aux ailes, y observer les circulaires, etc.

Aucun autre moyen ne permettrait d'arriver à ce résultat d'une manière aussi complète et aussi sûre. La photographie fixe une ou plusieurs projections du mouvement, et il faut ensuite tenir compte de sa perspective spéciale. En outre, à l'étincelle on n'obtient que des silhouettes. Ici, c'est la vie elle-même que l'on aperçoit de ses propres yeux. On fait varier à son gré la vitesse du mouvement, que l'on peut même annuler, pour telle portion que l'on désire étudier de plus près.

Utilisée par Marey avec la lumière solaire, la stroboscopie s'est montrée beaucoup plus puissante et d'un bien meilleur emploi avec la décharge électrique, comme nous l'avons pratiquée nous-même. Le champ de vision peut être porté à plusieurs mètres de diamètre, et l'intensité lumineuse moyenne arrive à égaler celle d'une lampe à incandescence ordinaire. Les moindres détails de l'aile se distinguent avec la plus complète netteté, et avec leur coloration propre.

Nous avouons pour notre part que, malgré l'habitude, nous ressentons toujours quelque émotion quand, dans le champ du projecteur, apparaît un grand sphinx remuant lentement ses ailes, et les retournant dans un mouvement merveilleux d'aisance et de grâce,

sans qu'il subsiste d'autre preuve de l'énorme vitesse de son mouvement réel que la vibration de la pince qui le tient au point fixe, et le nuage de fine poudre d'or détachée de ses ailes, et qui scintille dans le faisceau lumineux des éclairs.

Rôle des Ailes multiples

Nous venons de voir que l'insecte se comporte de manière à pratiquer la récupération de l'énergie de ses courants de remous.

En vol horizontal, il se soulève quand ses ailes descendent, et progresse au début de leur remontée. Il y a effet de vide au-dessus du corps, quand les ailes se rejoignent face à face et s'arrêtent; constitution d'une onde de suite quand elles redescendent; récupération au moment du changement de plan inférieur quand l'onde heurte l'aile retournée, et que les circulaires dépriment l'air sur la face interne, qui se trouve alors tournée vers l'avant. Il y a une poussée verticale (abaissement) et une poussée axiale (élévation), pendant un battement complet.

En vol vertical, nous avons vu se symétriser les phénomènes. Les changements de plan prennent plus d'importance. Il y a deux poussées axiales par battement complet, l'abaissement comme l'élévation donnant lieu à des efforts de traction de même espèce, toujours par récupération de l'onde de suite et par l'effet de vide des circulaires.

Mais jusqu'à présent nous n'avons examiné le rôle des ailes que par paire. Or, la plupart des insectes possèdent en réalité quatre ailes, et il convient d'étudier le fonctionnement de l'ensemble. Nous allons voir que cette disposition particulière a sa raison d'être, très naturelle, et ne change absolument rien aux principes généraux.

Pour le démontrer, il faut étudier de plus près le retournement de plan qui s'opère à la fin de la course de l'aile. Nous avons déjà dit que ce retournement s'effectuait sous l'influence de la volonté de l'animal (M. Bull), et nous avons montré que nos théories conduisaient à penser qu'il n'en pouvait être autrement. Voyons la façon détaillée dont il s'opère :

L'aile voit son bord antérieur revenir le premier en arrière.

cependant que le bord postérieur poursuit encore sa course dans le sens initial. Il en résulte que l'aile prend généralement la forme d'une espèce de cuiller creusée profondément, ou de poche, dans laquelle l'onde pourrait s'engouffrer de façon à développer l'effet de pression d'où résulte la poussée (fig. 92).

En d'autres termes, l'aile paraît envelopper littéralement cette onde qui court derrière elle, de manière à l'enfermer, et à en recevoir toute l'énergie de mouvement qu'elle contient.

Fig. 92. — Vol de l'*Agrion puella*.

Les ailes antérieure et postérieure se suivent comme s'il n'y avait qu'une seule surface continue.

On pourrait artificiellement reproduire ce mouvement, en imaginant que l'on dispose l'un au-dessus de l'autre deux bâtons A et B (fig. 93) animés chacun d'un mouvement alternatif autour d'un axe vertical XX'.

Les deux mouvements alternatifs, au lieu d'être synchrones, seraient un peu décalés l'un par rapport à l'autre, si bien que l'un des deux bâtons tel que A parviendrait au bout de sa course, quand l'autre B n'y serait pas encore arrivé. Il reviendrait donc sur ses pas quand B marcherait encore dans sa direction première, et ces deux bâtons deviendraient assimilables aux bords antérieur et postérieur de l'aile de l'insecte.

L'axe XX' serait alors celui de l'animal que l'on supposerait voler au point fixe ou en montée verticale. Supposons que les deux bâtons soient réunis par une toile, fixée sur chacun d'eux, et disposée de telle sorte qu'elle leur permette, lorsqu'elle est complètement tendue, de prendre les positions respectives qui correspondent à leur maximum d'écartement.

On voit que lorsque A reviendra vers la droite, pendant que B continuera sa course vers la gauche, il arrivera un moment où les deux bâtons seront exactement superposés. Si, à cet instant, la toile est gonflée par l'onde de suite qui s'y est engouffrée, la forme de cuiller ou de poche se montrera tout naturellement, et cette poche aura une certaine apparence hélicoïdale. Lorsque le mouve-

ment se poursuivra, la toile se tendra progressivement, par augmentation de la distance entre A et B.

Quand elle sera complètement tendue, elle présentera l'aspect d'une surface hélicoïdale presque parfaite (plus exactement celle d'un paraboloïde hyperbolique). Dans la succession de ses mouvements, elle sera donc alternativement tendue et détendue, en fléchissant autour d'une ligne intermédiaire entre A et B.

Si les deux bâtons A et B ne sont pas très loin l'un de l'autre, on pourra même remplacer la toile par un voile membraneux d'une certaine élasticité, et on aura ainsi reproduit une aile naturelle,

Fig. 93. — *Mouvement d'une palette à changement de plan commandé à chaque fin de course.*

Il suffit que les deux tiges aient des mouvements alternatifs *décalés* l'un par rapport à l'autre.

dont A représenterait le faisceau des nervures avant, et B celui des nervures arrière.

Or, chez l'insecte, ces deux faisceaux de nervures aboutissent à des extrémités bien distinctes et indépendantes, recevant chacune leur commande de mouvement. L'identité est donc à peu près complète, et l'on a réalisé une véritable aile synthétique.

Mais s'il n'y a pas d'inconvénient à opérer de la sorte quand l'aile est étroite, c'est-à-dire quand les deux bâtons A et B n'ont pas

leurs plans d'oscillation très éloignés les uns des autres il s'en présente d'assez graves, quand cette distance s'exagère, autrement dit quand on cherche à augmenter la largeur de l'aile pour gagner de la surface. Le voile membraneux élastique, reliant les deux bâtons, est alors soumis à de très amples efforts.

S'il présente quelque rigidité, il subit une compression assez brutale lorsque A et B se trouvent l'un au-dessus de l'autre, et que leur distance passe en conséquence par un minimum. Si l'un des deux bâtons, tel que A, n'est pas muni à sa base d'une charnière lui permettant de se soulever quand B passe au-dessous de lui, le voile est ployé et risque le froissement.

Lorsque l'aile aurait marché quelque temps, il ne manquerait pas de se produire un déchirement dans le sens de sa longueur, aux points où le ploïement s'accomplit. Aussi la Nature ne dépasse-t-elle pas une certaine largeur pour les ailes d'insectes, quand elle veut augmenter la surface. D'avance elle les coupe en deux, pour en éviter la rapide

usure. Parfois de petits crochets sur les bords leur permettent de

Fig. 94. — Vol de la petite *Libellule* (Caloptéryx).

Les premières vues (clichés du bas) correspondent à la fin de l'abaissement. Entre la troisième et la quatrième on observe le changement de plan de l'aile qui tourne d'environ 90 degrés. Les ailes postérieures suivent les antérieures qu'elles prolongent sensiblement.

se souder provisoirement ensemble pendant le vol, mais cette attache ne subsiste pas au repos.

Il est facile de justifier cette conception, non pas en regardant les insectes à paires d'ailes inégales où la chose apparaît de toute évidence, mais en soumettant à l'examen stroboscopique, des représentants de la famille des névroptères, qui portent souvent les ailes à peu près égales entre elles.

En observant le vol de l'Agrion à ailes noires (*Caloptéryx*) (fig. 94) qui accomplit d'excellents battements à la pince, on voit que la deuxième paire d'ailes suit constamment la première, avec un retard ou décalage qui fait que l'ensemble se comporte à peu près comme une aile unique dont on aurait supprimé la partie centrale, et l'on imagine très bien la surface qui jetterait un pont sur les deux ailes, pour en parfaire la continuité.

Il arrive cependant pour certaines espèces de névroptères à vol rapide (*Anax major*, *L. Depressa*, *agrion sanguinèum*, etc.) que le décalage entre les ailes antérieures et postérieures change complète-

Fig. 95. — Vol de la grande *Libellule* (*Anax Major*).

Les ailes postérieures *précèdent* les antérieures. Les premières vues (clichés du bas) correspondent à l'abaissement. La paire d'ailes postérieures (clichés 1 et 6) est presque au bas de sa course alors que les antérieures commencent à peine leur mouvement de descente. A la vue 7 les antérieures et postérieures se croisent, puis la paire antérieure est rapidement rappelée. — Lire le film de *bas en haut*.

ment de caractère. Les ailes postérieures marchent alors les premières, c'est-à-dire s'abaissent avant que les antérieures aient bougé (fig. 95). Cette façon d'opérer semble se rattacher à une influence mutuelle des surfaces, dont il sera question dans un prochain ouvrage.

Cas de l'Oiseau

Contrairement à l'insecte, l'oiseau ne se prête pas à l'étude stroboscopique au point fixe. Il faudrait avoir recours à un manège du genre de ceux qu'employait Marey, et faire tourner le réflecteur avec lui.

Nous n'avons pas entrepris ce genre d'expérience, qui ne nous aurait pas appris grand'chose. Parfaitement étudiés par la photographie et la cinématographie, les oiseaux ont révélé presque toutes les attitudes qu'ils prennent dans le vol ramé.

Le cinématographe à prises rapides de M. Noguès donne de superbes vues ralenties du vol du pigeon et du goëland, et avec des cinématographes ordinaires, des opérateurs non spécialistes ont enregistré d'excellents films du battement des ailes d'oiseaux à faible fréquence. C'est le cas pour le héron dont nous avons donné plusieurs images dans le cours de ce traité.

Sans aller chercher plus loin des exemples qui nous apporteraient d'identiques conclusions, nous nous contenterons du simple examen de ce film, qui a le double intérêt de nous présenter un oiseau en vol horizontal, et un autre en vol ascendant vertical.

Nous ne nous attarderons du reste pas sur ce sujet, dont il a été précédemment question, et nous n'en retiendrons que la démonstration de l'identité d'action des ailes, chez l'insecte et chez l'oiseau.

Dans le vol horizontal, on voit que les ailes battent normalement, complètement déployées et sans incidence marquée sur l'horizontale. Elles se présentent tout à fait comme celles de l'insecte au même instant. En fin d'abaissement, le retournement du plan des ailes s'obtient par flexion de la main. L'articulation de celle-ci est en effet constituée de telle sorte que sa simple flexion entraîne un changement de plan de l'aile d'environ 90°.

Éléments de l'Aile indispensables au Vol

Il peut être intéressant de rechercher quelles sont, chez l'oiseau, les conditions qui sont indispensables à l'exercice du vol. Cette question a déjà été très étudiée, et tous les auteurs sont tombés d'accord sur l'importance du rôle joué par le fouet de l'aile, c'est-à-dire par son extrémité.

Nous pouvons ajouter à cela quelques constatations qui nous semblent intéressantes. Un robuste pigeon arrive encore à voler

Fig. 96. — Pigeon avec 4 rémiges artificielles.

Ces rémiges sont assujetties sur les canons des anciennes par des ligatures métalliques.

quand on ne lui laisse, à chaque aile, que les quatre premières rémiges. Il se supporte donc et progresse avec huit plumes en tout. Les battements se précipitent, et le vol n'est plus bien long. Mais il a lieu, et l'animal reste même capable de gagner de l'altitude. L'atterrissage devient très difficile et s'accompagne généralement d'une culbute. L'oiseau, n'ayant plus de surface, ne peut plus freiner son mouvement vers l'avant.

La photographie ci-contre (fig. 96) montre un pigeon dont toutes

les plumes, sauf huit rémiges, ont été sectionnées, assez loin de leur encastrement pour ne donner aucune gêne à l'animal et pour lui éviter toute blessure, si légère soit-elle.

Le vol était bruyant et pénible. Le pigeon rentrait directement dans sa case, située à trois mètres du sol, et ne cherchait pas souvent à en sortir.

Plus tard, l'ayant soumis au sommeil hypnotique du capuchon noir, on retira les naissances des rémiges sectionnées, et de nouvelles plumes repoussèrent parfaitement à la place des anciennes.

Fig. 97. — *Pigeon avec une aile munie de rémiges artificielles et une aile ordinaire.*

Toutes les autres plumes ont été sectionnées. Le vol persiste cependant jusqu'à ce que les rémiges artificielles soient brisées.

L'oiseau reprit son vol régulier, sans attendre leur complet rétablissement.

Auparavant, nous avons cherché à déterminer le degré d'importance qu'il convenait d'attribuer à la nature même des plumes, et à leur orientation par rapport au bras et à la main de l'oiseau.

A cet effet, on sectionna les huit rémiges subsistantes, à trois

centimètres environ de leur point d'implantation. Les tronçons de plume restants furent introduits, à frottement dur, dans des rémiges de poules (fig. 97) que l'on ligatura par un fil métallique très fin. L'oiseau, muni de plumes qui ne lui appartenaient pas, fit des vols qui ne furent ni meilleurs, ni moins bons qu'avec ses propres plumes.

Pour vérifier le rôle de l'incidence, on défit les ligatures, on donna aux plumes des orientations variées, et l'on resserra les attaches. Le vol persista encore.

Il fut moins bon, mais se produisit pourtant, quand on eut retourné complètement les plumes sens dessus dessous.

Enfin, on substitua aux plumes de poules des plumes artificielles, constituées chacune par la hampe d'une rectrice de poule, sur laquelle était fixée une petite surface en bristol, que dépassait une frange en taffetas.

Le vol, qui avait commencé par se produire, s'interrompit, et l'oiseau vint doucement à terre. L'ayant relevé, on constata que le taffetas avait été, en quelques secondes, réduit à l'état d'une véritable charpie, comme le serait la mèche d'un fouet, que quelques coups, bien appliqués, suffisent à effiloche.

La plume résiste à merveille à ces actions violentes, et c'est là une des causes pour lesquelles nous avons dit, au début, que la réalisation mécanique du vol battant nous paraissait liée, de la façon la plus étroite, à la qualité même de l'ossature et de la surface à employer pour construire les ailes.

Celles-ci doivent unir le maximum de résistance au maximum de légèreté, et rien ne peut, à ce double point de vue, supporter la comparaison avec la plume.

Nous avons fait, pour déterminer les éléments indispensables au vol, une longue série d'expériences que nous ne croyons pas utile de citer ici, car elles ne nous ont pas appris grand'chose de nouveau.

Ce qu'il en faut retenir est que le fouet joue le rôle principal. La partie voisine du corps, ou manteau de l'aile, sert dans le plane-ment, facilite les changements de direction, et fait office de frein lors de l'atterrissage. Privé du manteau, l'oiseau culbute ou glisse, en arrivant au sol ou dans sa case.

Rôle de la Queue

La queue n'est qu'un empennage mobile, de direction et de stabilisation. Elle sert toutefois de plan d'opposition, pour lutter contre les effets de renversement, produits par la réaction des coups d'ailes. Dans ce but, elle se déploie très largement au départ, quand le corps est droit et que l'animal, en vol ascendant vertical, développe de grands efforts obliques, qui tendraient à le faire basculer sur lui-même.

Elle s'ouvre de même à l'atterrissage, pour éviter le renversement, quand l'oiseau vient à augmenter l'attaque de ses ailes.

Nous n'insisterons pas davantage sur ce sujet, car l'oiseau n'a pas besoin de sa queue pour voler. Il se tire parfaitement d'affaire sans elle. Nous avons constaté d'excellents vols avec une pie que nous en avions complètement privée. Nous ne croyons donc pas devoir nous attacher spécialement au rôle qu'elle peut jouer, et qui n'est certainement que secondaire.

Système Musculaire du Vol chez l'Insecte

Pour terminer ce rapide exposé de quelques-unes de nos principales expériences, nous citerons les résultats que nous ont fournis, simultanément, la dissection et l'examen stroboscopique, dans l'étude de la machine motrice de la libellule.

Fig. 98. — Schéma du thorax de la Libellule.

Au centre : muscles éleveurs.

Sur les bords et inclinés : muscles abaisseurs.

Ici, nous trouvons deux paires d'ailes, que nous examinerons séparément.

Le thorax de la bête présente la forme d'une carlingue d'avion.

grosse à l'avant et fuyant un peu vers l'arrière. Sa section est celle d'une sorte de nacelle ou d'embarcation, à fond rond et à parois droites, bien maintenues par des nervures très résistantes, qui en font une coque légère et solide (fig. 98).

L'intérieur contient les faisceaux musculaires qui constituent le moteur d'aviation de l'insecte.

La carcasse, en forme de barque, reçoit, sur ses bords, de petites extrémités cornées et arrondies, sur lesquelles s'appuient les ailes, à la manière des avirons sur les tolets d'un canot.

Pour chaque aile, il y a deux tolets distincts, correspondant chacun à un faisceau de nervures. Pour schématiser à l'extrême, on pourrait considérer l'aile comme constituée par deux avirons parallèles et posés à plat, réunis ensemble par une toile élastique, représentant la membrane ou « voile ». Chaque aviron repose sur le tolet correspondant, et l'emboîte dans un creux qu'il possède.

Une toile souple empêche l'aviron de s'échapper, mais lui laisse

Fig. 99. — Schéma du thorax de la Libellule (*Anax major*).

On aperçoit la toile dorsale et les coupoles qui y sont fixées. Chaque aile reçoit deux faisceaux distincts de nervures.

toute latitude de s'élever ou de s'abaisser. De très courtes poignées prolongent les rames vers l'intérieur de l'embarcation (fig. 99).

Ceci étant, pour obtenir l'abaissement de l'ensemble, il suffit de tirer les rames vers le bas, en faisant effort sur elles à l'extérieur de l'embarcation ; pour l'élévation, l'effort de traction vers le bas devra s'exercer sur les poignées, c'est-à-dire sur la partie des rames située à l'intérieur.

C'est ainsi qu'est constituée la libellule. Les muscles, qui n'ont ici rien de spécial et qui ne peuvent agir naturellement que par traction, sont fixés, à un de leurs bouts, dans le fond de la carcasse. Ils aboutissent, à l'autre extrémité, dans une sorte d'embouchure cornée, de teinte noire, ressemblant, en très petit, au champignon vulgairement nommé chanterelle noire ou trompette de la mort.

Pour saisir les rames à l'extérieur afin de les abaisser, la terminaison musculaire sort de la carcasse, par un trou pratiqué latéralement, et vient s'attacher sur l'aviron correspondant.

Un petit cache-poussière, en tissu très souple et très résistant, ferme le trou, pour empêcher toute entrée de corps étrangers, et vient se coller sur la terminaison cornée, à l'endroit où elle rejoint l'aviron. Et voilà pour l'organisation du mécanisme de l'abaissement.

Pour l'élévation, il s'agit maintenant de tirer sur les poignées d'avirons, pour les ramener vers le bas. Les muscles élévateurs sont, comme les abaisseurs, fixés, par l'une de leurs extrémités, dans le fond de la barque. Leurs extrémités supérieures ne s'assemblent pas directement, toutefois, aux poignées correspondantes.

Il y a une certaine conjugaison entre les deux ailes d'une même paire. A cet effet, un tissu souple, de même nature que celui dont est fait le cache-poussière, réunit ensemble les quatre poignées d'une même paire d'ailes. Ce tissu s'ajuste également sur les bords de la carcasse, formant une toile qui réunit le tout, et sur laquelle est assujettie, au beau milieu, une espèce de coupole cornée, à bords très résistants. C'est sur le bord de cette coupole, et vers l'avant, que se trouvent les embouchures cornées, auxquelles aboutissent les muscles élévateurs.

Le fonctionnement se saisit tout de suite. Si les élévateurs tirent la coupole, la toile sur laquelle elle est fixée se creuse, et les poignées d'avirons sont entraînées vers le bas. Les ailes se relèvent alors, et l'élévation est obtenue.

En tirant alternativement sur les abaisseurs et sur les élévateurs, on obtient un battement d'ailes complet.

Si les attaches étaient symétriques, et si les muscles de même espèce tiraient exactement de la même quantité, on aurait un battement simple, sans torsion ni changement de plan. L'aile garderait sa forme plane, et ne ressemblerait jamais à une pale d'hélice.

Il ne pourrait apparaître aucun effort axial, tendant à accomplir la propulsion. La sustentation elle-même aurait peu de chances d'être obtenue. Le changement de plan est donc obligatoire. Il faut que l'aile descende à peu près à plat, ou mieux avec une certaine inclinaison, donnant à la fois la sustentation et un léger effort axial, et qu'elle remonte en se tenant à peu près verticalement, pour obtenir la véritable poussée, par récupération de l'onde de suite.

Rien n'est plus facile à réaliser.

Pour l'abaissement, si les muscles, au lieu de marcher tout à fait en même temps, ont leurs actions un peu décalées l'une sur l'autre, de telle sorte que les muscles avant précèdent un peu les muscles arrière, les deux avirons ne s'abaisseront pas en même temps non plus. Celui de tête marchera le premier, et la surface, au lieu de rester plane, se tordra légèrement en hélicoïde.

Pour l'élévation, l'attache musculaire principale est unique pour chaque aile, mais comme elle se trouve placée sur le bord antérieur de la coupole, il en résulte toujours une descente dissymétrique de celle-ci. Son avant plonge davantage que son arrière, ce qui a pour effet d'actionner plus fortement le faisceau de nervures avant le faisceau d'arrière. L'aile à l'élévation est donc toujours fortement gauchie et se place plus ou moins transversalement à la trajectoire décrite par l'insecte sans que la volonté de celui-ci paraisse capable de modifier grandement un semblable état de choses.

La structure véritable des ailes s'écarte peu de la disposition schématique pure, indiquée précédemment. On peut ramener les

nervures, au point de vue du mécanisme, à deux groupes distincts, assimilables chacun à l'un des avirons dont nous venons de parler, et tout se passe, à peu de chose près, de la façon que nous venons d'exposer.

Examen Stroboscopique

Il nous a été possible de suivre au stroboscope les mouvements des plaquettes dorsales, ou coupôles de la libellule serpentine, en même temps que les mouvements d'articulation des ailes sur leurs tolets.

Une libellule étant mise au synchronisme dans le faisceau éclairant, nous avons pu, à maintes reprises, suivre, avec une loupe spéciale, l'enfoncement des coupôles au moment de l'élévation, et leur émergence à l'abaissement.

On constate alors que la coupole correspondant à la paire d'ailes de devant a généralement un mouvement décalé sur la coupole arrière. La petite plaquette intermédiaire oscille entre les deux.

Le décalage des ailes est d'environ 90 degrés. Nous avons vu qu'il atteint près de 180 degrés chez les grandes libellules et pour certaines espèces d'agrions à vol très rapide. L'aile postérieure s'abaisse alors *avant* l'aile antérieure.

A la lenteur apparente du stroboscope, on voit les plaquettes se comporter comme les parties successives du dos d'une chenille en marche, qui se soulèvent les unes après les autres. Il y a là une curieuse analogie, très intéressante à constater.

A l'abaissement l'aile descend avec une inclinaison plus ou moins marquée, selon qu'il s'agit du vol vertical ou du vol horizontal. Vers la fin de la course, les muscles élévateurs entreront en jeu. Nous venons de voir que ces muscles viennent s'assembler sur la coupole dans sa partie antérieure, ce qui a pour effet de faire descendre celle-ci de travers. L'avant descendra plus que l'arrière. Aussi l'aviron de devant est-il immédiatement relevé, tandis que celui d'arrière peut encore obéir un peu à l'action des abaisseurs dont les contractions chevauchent avec celles des élévateurs.

Il se produit alors un rapide *retournement de l'aile*, une torsion ou changement de surface brusque et bien marquée, qui a pour effet de renverser le pas de l'hélice et de la présenter convenablement pour recevoir l'impulsion de l'onde de suite.

L'aile est alors presque perpendiculaire au corps, et l'on voit que la simple disposition des attaches suffit pour obtenir le résultat qu'énonce la théorie.

Comme cette disposition *existe* chez la libellule, on peut en conclure que le changement de plan, attribué par Marey à l'action de l'air, s'accomplit en réalité par la construction même de l'in-

Fig. 100. — *Libellule (Anax Major)*.

Les plaquettes dorsales sont visibles sur le thorax.

secte, et que c'est un acte résultant de l'action musculaire elle-même.

Nous avons entrepris la dissection, pour nous assurer de ce fait que nos théories nous amenaient à considérer comme indispensable. La dissymétrie des attaches à l'élévation et le dédoublement du système musculaire à l'abaissement nous apportèrent la confirmation cherchée.

En résumé, les examens anatomiques et stroboscopiques s'accordent pour démontrer que le changement de plan de l'aile, ou

retournement, s'accomplit par construction. Le fait est conforme à nos idées, puisque c'est en opérant ainsi que l'insecte peut pratiquer la récupération. Si le voile était simplement tenu par le faisceau des nervures avant, et que l'action de l'air seule en fit changer l'inclinaison, l'animal perdrait tout le bénéfice de la poussée de l'onde, dont le rôle se bornerait à basculer une sorte de portière élastique, pour passer sous elle. Toute l'énergie serait alors perdue.

Nous avons vu qu'il faut, au contraire, que l'aile prenne de l'avance sur son onde, pour se retourner ensuite et lui opposer une surface ferme, convenablement tenue, et orientée de manière à ce que l'onde puisse venir s'y heurter, en lui donnant la poussée qu'elle est capable de fournir.

CONCLUSION

Le vol animal peut s'accomplir avec une faible dépense d'énergie motrice, puisqu'il est possible à l'oiseau et à l'insecte de reprendre, pour l'utiliser à son soutien et à sa progression, une certaine quantité, non encore déterminée, de l'énergie contenue dans les courants de remous qui l'accompagnent, ou se forment autour de lui.

Nous ne pouvons dire jusqu'où va cette reprise d'énergie. Il est certain que le cycle présente des pertes, mais quoiqu'il en soit, et si petite que puisse être la quantité d'énergie récupérée de la sorte, il en résulte toujours un bénéfice pour l'animal, qui se traduit finalement par une diminution de la fatigue musculaire dans l'exercice du vol.

Aucun de nos appareils d'aviation ne pratique cette récupération. Pas une seule hélice, pas une seule aile, ne sont actuellement capables de reprendre une portion, si minime soit-elle, de l'énergie dépensée dans la constitution de ces courants, considérés jusqu'ici comme des courants parasites.

Quelles perspectives s'ouvriraient alors pour l'aviation future, s'il devenait possible d'appliquer ces principes aux appareils construits de main d'homme ! Si une machine à voler capable de récupérer l'énergie de ses remous pouvait être établie d'une façon pratique et simple, on conçoit tout de suite l'immense intérêt que présenterait son emploi.

La consommation d'énergie tomberait bien au-dessous de celle qui nous est indispensable aujourd'hui pour voler. Les appareils pourraient donc être munis de moteurs bien plus faibles, et augmenter d'autant leur rayon d'action. En leur conservant une puis-

sance équivalente à celle des engins actuels, on les rendrait capables de développer de tels efforts, qu'ils pourraient se maintenir aisément au point fixe, à la façon d'un hélicoptère, et leur chute serait alors à peu près impossible.

On y gagnerait donc une sécurité considérable et une maîtrise telle, que la navigation aérienne deviendrait certainement le procédé de locomotion le plus sûr, le plus facile et le plus économique qu'il soit possible de réaliser.

Nul doute que l'avenir nous apporte ce progrès, et nous aurons alors conquis, d'une façon complète et définitive, l'empire de l'air où nous parviendrons enfin à égaler, et peut-être à dépasser, nos maîtres les oiseaux.

APPENDICE

Au cours du précédent exposé, nous sommes resté dans le domaine de la généralité, et nous nous sommes borné à l'énoncé sommaire des principes fondamentaux de la récupération de l'énergie dans les fluides.

Dans le but de conserver à notre ouvrage le caractère de facile accessibilité que nous recherchions avant tout, nous avons passé sous silence un très grand nombre de faits expérimentaux.

Ces faits, dont l'importance est capitale, sont malheureusement très difficiles à interpréter convenablement sans qu'il soit fait appel aux ressources de l'analyse mathématique; ils ne peuvent donc trouver place dans un ouvrage de diffusion qui ne vise aucune catégorie spéciale de lecteurs, et nous nous voyons contraint de les réserver pour un prochain traité, d'un caractère à la fois plus spécial et plus complet.

Nous croyons toutefois nécessaire d'ajouter ici quelques notes rapides, sortant du cadre étroit que nous nous étions préalablement tracé.

Elles permettront, à ceux de nos lecteurs que cela pourrait intéresser, de constater que nos théories sont constituées par un ensemble de faits expérimentaux, bien déterminés, mesurables, et que l'on peut aisément soumettre au calcul. On arrive de la sorte à en préciser les conditions d'application, et il devient possible de prévoir des faits nouveaux, que l'expérience doit venir confirmer par la suite.

Fig. 1. — Appareil enregistreur des efforts exercés par l'eau sur une plaque animée d'un mouvement varié.

Le schéma ne reproduit pas l'appareil inscripteur des déplacements du chariot.

Détermination des éléments d'un cycle à récupération

La seule quantité d'énergie qu'il soit possible de récupérer dans les masses fluides est celle qui correspond à un *travail d'accélération* de ces mêmes masses. Ce travail se retrouve en entier, sous forme d'énergie cinétique, dans les courants de remous. Il va de soi que le *travail de frottement*, qui se transforme immédiatement en chaleur, n'est pas pratiquement récupérable. La reprise d'éner-

Fig. 2. — Appareil enregistreur à plaques.

L'appareil est hors de la cuve d'expérience pour permettre d'apercevoir les plaques.

gie ne peut donc être que partielle; elle sera toutefois d'autant plus complète que le coefficient de frottement du fluide sur le corps qui le traverse sera plus faible. C'est ce que l'on exprime en disant que le corps est glissant.

On sait du reste qu'il en est ainsi pour tous les animaux appelés

à se déplacer rapidement dans un milieu fluide résistant (oiseaux, insectes, poissons).

Ceci posé, nous nous proposerons de déterminer l'ordre de grandeur des phénomènes qui caractérisent cette reprise d'énergie cinétique. Nous avons réalisé, dans ce but, un appareil à mouvements alternatifs, muni de dispositifs enregistreurs capables d'indiquer, en fonction du temps, les efforts qui s'exercent sur une plaque rigide déplacée normalement dans l'eau.

Une plaque rectangulaire en aluminium (fig. 1), rendue indéformable par des nervures et des contreforts, est assujettie sous un léger chariot, pouvant rouler sur deux rails disposés parallèlement

Fig. 2 bis. — Appareil enregistreur.

Le châssis est en place et les plaques sont immergées.

au-dessus d'une cuve à eau, dans laquelle la plaque plonge aux deux tiers de sa hauteur environ.

Le chariot reçoit un mouvement alternatif, par l'intermédiaire d'une bielle qui lui est liée par deux ressorts antagonistes soigneusement tarés. Ces ressorts servent de dynamomètres, et les dépla-

cements relatifs du chariot porte-plaque, par rapport à la bielle, sont ainsi proportionnels aux efforts exercés par l'eau sur la plaque.

Ces déplacements sont enregistrés par un fin stylet fixé sur le chariot, et dont la pointe repose sur un tambour à noir de fumée. Ce tambour, entraîné par la tête de bielle au moyen d'une fourchette, coulisse le long d'un arbre carré parallèle aux rails et animé d'un mouvement de rotation régulier.

Les déplacements de la tête de bielle sont inscrits sur le tambour par un appareil pantographique à point fixe. Enfin les temps sont enregistrés sur un second tambour, placé sur l'arbre longitudinal, et sur lequel un diapason lent, entretenu électriquement, trace une sinusoïde. Divers dispositifs d'enclenchement électrique y sont ajoutés pour empêcher les inscriptions de se superposer (fig. 2 et 2 bis).

a) *Expériences sur des surfaces isolées.*

Si l'on met la bielle en mouvement et qu'on l'arrête net quand elle arrive à fin de course, on observe à cet instant un renversement des efforts. Il se produit une réimpulsion prolongée de la part de l'eau, tendant à faire persister le mouvement de la plaque dans le sens primitif (Tracé n° 1, fig. 3).

Dans la partie de gauche, la courbe est au-dessous de l'axe des x . Elle correspond à la résistance à l'avancement éprouvée par la plaque. A l'instant de l'arrêt, la courbe traverse l'axe des x , et indique l'impulsion *motrice*. Cette dernière est de plus faible intensité que l'effort résistant précédemment éprouvé par la plaque, mais elle dure fort longtemps.

Il est à remarquer que l'inertie du chariot donne des effets qui sont *exactement pareils*. Toutefois ceux-ci sont négligeables à côté des efforts dus à l'eau, comme on peut s'en assurer en faisant l'expérience après avoir vidé la cuve. L'inertie du chariot ne suffit pas à produire, sur les ressorts dynamométriques qui sont fort durs, un commencement de flexion qui puisse être apprécié.

Supposons maintenant qu'au lieu de freiner le chariot de façon à obtenir un arrêt complet en fin de course, on se contente de couper le courant à ce même instant, de manière à laisser la pla-

que revenir en arrière, sous l'influence des effets d'inertie de l'appareil moteur. On constate alors une augmentation considérable des effets de pression.

Fig. 3. — Trace n° 1.

Fac-similé d'un relevé de l'appareil enregistreur. La plaque animée d'une certaine vitesse est brusquement arrêtée en fin de course (partie horizontale de la courbe I). La courbe des efforts traverse à cet instant l'axe des x et une impulsion récupératrice d'assez faible intensité mais de longue durée apparaît aussitôt.

En se reportant au tracé n° II (fig. 4), on observe un relèvement très important dans la courbe des efforts, immédiatement après l'instant d'arrêt du chariot à la fin de la course. Chose remarquable, les ordonnées de cette portion de la courbe, au lieu de *grandir* quand la vitesse de retour du chariot s'accroît, en viennent assez vite à *diminuer*. Il s'agit donc bien d'une action de récupération, due à la continuation d'un intense courant d'eau dans le sens initial, et non pas d'un simple effet de résistance du fluide, qui devrait s'accroître en même temps que la vitesse et proportionnellement à la seconde puissance de celle-ci.

Sous l'influence du mouvement inverse de la plaque, la surpression finit par s'éteindre, puis se renverse, donnant lieu à une détente dont l'effet est de diminuer la résistance offerte au déplacement de la plaque elle-même. Il résulte de là que les différences de pression maxima tendent à se manifester du côté des fins de courses, c'est-à-dire aux instants où la vitesse a les plus faibles valeurs. Les fonctions pression et vitesse ne sont donc pas en phase, mais présentent entre elles un décalage qui, s'il pouvait atteindre 90°, correspondrait à un mouvement à énergie interne, c'est-à-dire susceptible de se prolonger sans appel d'énergie motrice extérieure.

Dans les expériences que nous venons de décrire, le décalage est moins accentué, mais il n'en existe pas moins, et il y a tendance marquée vers le fonctionnement type. En comparant l'ordonnée moyenne de la portion de courbe négative qui correspond au simple déplacement de la plaque dans l'eau, à celle de la portion de courbe positive, où s'effectue la contre-impulsion par inertie, on voit que l'on y gagne en même temps un accroissement dans les réactions subies par la plaque.

Il est à remarquer que dans le cas du mouvement aller et retour de la plaque, la courbe des pressions présente une ordonnée moyenne élevée, pendant une durée relativement courte; si la plaque avait été arrêtée en fin de course, l'effet récupérant serait d'intensité beaucoup plus faible (tracé I), mais se prolongerait pendant un temps beaucoup plus considérable.

En désignant par F la valeur moyenne de la force qui s'exerce

Courbe des temps . 1 oscillation = $\frac{1}{17}$ cm^e de seconde

Fig. 4. — Tracé n° II.

Fac-similé d'un relevé de l'appareil enregistreur. La plaque n'est plus arrêtée définitivement en fin de course mais revient en arrière (mouvement alternatif). L'effort sur la plaque augmente beaucoup d'intensité. Toutefois cet effort, au lieu de suivre la variation de vitesse, décroît beaucoup plus vite que la vitesse elle-même. Il y a décalage entre la courbe des vitesses et celle des pressions.

sur la plaque pendant la période de retour t (II) et par f la valeur moyenne de la force qui s'exerce sur la plaque pendant le temps T où se manifeste l'impulsion en récupération (I), on a sensiblement $F \cdot t = f \cdot T$. (Ici l'impulsion se produit sur une plaque complètement immobile ; il n'y a donc *aucun* travail à dépenser pour en recueillir l'effet total).

b) *Influence mutuelle des surfaces.*

Disposons maintenant sur les rails un second chariot porte-plaque, placé à petite distance du point d'élongation maximum du premier, et calé entre deux ressorts dynamométriques, dont les flexions peuvent être marquées sur le tambour enregistreur des temps. On peut vérifier et mesurer les phénomènes d'influence mutuelle des surfaces, tels qu'ils se produisent quand les ailes d'un oiseau se rapprochent face à face au-dessus du dos de l'animal, pour s'éloigner ensuite. Nous avons annoncé qu'il apparaissait alors un effet de vide intense. Le tracé n° III (fig. 5) le démontre complètement.

Pour faire l'expérience, le chariot mobile reçoit de la bielle un mouvement d'aller et retour complet, avec arrêt de durée nulle en face de la surface fixe ; on voit se produire un intense relèvement de la courbe au-dessus de l'axe des x au moment de l'arrêt, prouvant l'existence d'un effort intense dans le sens primitif du mouvement. La plaque fixe, d'abord légèrement refoulée (tracé III), est ensuite énergiquement appelée, et tend à suivre la plaque mobile qui à présent recule.

L'ordonnée moyenne des portions de courbe relatives à la plaque fixée et dirigées vers le bas est supérieure à celle des portions de cette même courbe situées au-dessus de l'axe des x . Cela se traduit, en fin de compte, par un effet prédominant dirigé du côté de la plaque mobile, et tout se passe comme si cette dernière attirait la plaque fixe. On constate de même un accroissement des efforts sur la plaque mobile ; le rôle de la seconde plaque a donc été d'intensifier les effets de pression et d'en développer de nouveaux.

L'ensemble de ces effets constitue un système attractif très intense. Le phénomène s'accroîtrait encore si la plaque fixe était

Fig. 5. — Tracé n° III.

Fac-similé d'un relevé de l'appareil enregistreur. Vers l'extrémité de la course de la plaque mobile est placée une plaque fixe. Les efforts sont considérablement accrus et l'attraction sur la plaque fixe s'observe nettement.

remplacée par une plaque mobile, se déplaçant d'un mouvement alternatif synchrone du premier et en opposition avec lui, c'est-à-dire s'approchant et s'éloignant en même temps que la première du point 4 4' qui constitue le centre du mouvement général.

Fig. 6.

Schéma des positions successives prises par deux plaques rapprochées l'une de l'autre puis éloignées.

C'est là ce qui se passe dans le cas du mouvement des ailes de l'oiseau, lorsque celles-ci sont rapprochées presque au contact l'une de l'autre au-dessus du corps, puis ensuite énergiquement écartées. La similitude est complète au voisinage de la fin de la course. Toutefois, pour obtenir un effort portant, il est indispensable que le mouvement alternatif rectiligne (fig. 6), soit remplacé par un alternatif à trajectoire circulaire (fig. 7).

Fig. 7

Schéma des positions successives prises par deux surfaces formant une charnière fermée puis ouverte. Ce dispositif qui est celui des ailes de l'oiseau est rendu nécessaire pour faire apparaître des composantes verticales ou de sustentation.

En outre, les ordonnées négatives des courbes d'efforts sont modifiées à cause du changement de plan de l'aile en fin

d'abaissement. Elles sont remplacées par d'autres ordonnées, beaucoup plus petites, qui ne représentent plus les efforts eux-mêmes, mais leurs composantes verticales ou traînées des ailes. Le choc récupérateur en fin d'abaissement, au lieu de donner un effet nuisible tendant à diminuer l'effet de soutien vertical, a lieu contre une surface inclinée, et lui communique l'impulsion de progression dont la direction est voisine de l'horizontale.

Il résulte de toutes ces expériences que l'action du fluide sur la plaque donne des effets semblables à ceux que produirait l'inertie de la plaque elle-même. Il y a toujours tendance à la continuation du mouvement dans le sens primitif, et résistance à la remise en marche en sens opposé.

Il est donc permis de supposer qu'il existe un *régime* de marche spécial à chaque mouvement, et pour lequel les maximum de pression correspondent rigoureusement aux instants de vitesse nulle. A ce régime, si l'on désigne par p la racine carrée de la moyenne des carrés des pressions, et par v la racine carrée de la moyenne des carrés des vitesses, la puissance W est donnée par $W = p v \cos \varphi$ où $\varphi = 90^\circ$. Cette puissance est alors rigoureusement nulle.

c) *Mesures des effets de récupération par la méthode des courants de fluide.*

Il est possible de reproduire les mêmes phénomènes en intervertissant les rôles du corps et du fluide, pourvu que les effets relatifs restent les mêmes, c'est-à-dire qu'on laisse, cette fois, le corps fixe dans un courant de fluide variable. C'est de cette manière que nous procédons actuellement aux mesures, en ce qui concerne *l'air*.

Pour ce genre particulier d'expériences, les effets de l'inertie propre des surfaces jouent, en effet, un rôle prépondérant dans les arrêts brusques, à cause des vitesses élevées qu'il faut nécessairement donner à ces surfaces. Les effets de l'air qui sont de même sens que ceux des masses mobiles, ne peuvent être que difficilement séparés de ces derniers, et on ne peut pas tirer de conclusions suffisamment sûres.

Nous allons donner un exemple de cette façon d'opérer. Un ventilateur est muni d'une plaque de garde, formant une très large collerette à sa buse de refoulement. Un obturateur à guillotine peut fermer instantanément cette buse, supprimant toute émission d'air (fig. 8). L'obturateur étant ouvert, on dispose une plaquette

Fig. 8. — *Expérience du ventilateur et de la plaque.*

Quand l'obturateur est déclenché, la plaque est attirée vers le ventilateur.

Un dynamomètre permet d'enregistrer les efforts qui s'exercent alors sur la plaque.

rigide face à la buse, et appuyée sur des supports également rigides dégageant bien son arrière. On met le ventilateur en marche ; la plaquette est appuyée, par la chasse d'air, sur ses supports, avec plus d'énergie que précédemment. Comme elle est rigide, elle ne prend aucune flexion, et les supports, pas davantage. Si, quand le régime est établi, on déclanche brusquement la guillotine, la pla-

quette est projetée vers le ventilateur et tombe, alors qu'il semblerait qu'elle devrait, tout simplement, voir diminuer la pression exercée sur ses appuis.

L'explication en est toute simple par nos théories. La plaque, soumise au vent relatif voit se développer autour d'elle des circulaires et une onde de suite. Celle-ci est représentée par un courant d'arrière, *s'éloignant* de la plaque à une vitesse *beaucoup plus faible*, que celle du courant d'air lui-même. Pour un observateur placé sur la plaque, rien ne se trouve modifié.

Au moment où joue l'obturateur, toute cause de surpression sur la face avant et de dépression sur la face arrière se trouve brusquement supprimée.

L'inertie des masses d'air provoque la continuation des courants de remous. Les circulaires font le vide sur la face avant; la dépression dorsale est brusquement comblée par un courant de sens inverse au courant principal, qui donne à la plaque une impulsion dont l'effet s'ajoute à celui que produit le pompage des circulaires. La plaque est alors projetée.

Il est possible de reproduire de la sorte la totalité des phénomènes décrits précédemment. Nous n'en donnerons pas le détail. Il suffit d'appliquer convenablement les principes de la relativité, pour passer d'un des procédés d'essais à l'autre. Celui que nous employons actuellement a l'avantage, comme nous l'avons dit, d'éliminer complètement les phénomènes d'inertie de la plaque, et d'apurer tout à fait les mesures.

Pour procéder à ces déterminations, il faut simplement lier la plaque à un dynamomètre capable d'inscrire, sur un tambour, les efforts auxquels elle se trouve soumise. Il est difficile d'évaluer la vitesse variable du courant d'air. Nous essayons présentement d'y parvenir, en enregistrant photographiquement, au moyen de l'étingelle, les variations de niveau d'un tube de Pitot placé dans le courant d'air.

Sustentation par impulsions périodiques

D'après ce que nous avons vu, la sustentation d'un animal au vol s'obtient, non pas sous l'effet d'une poussée continue, mais par

une succession d'impulsions verticales de courte durée, dans l'intervalle desquelles le corps du volateur est abandonné à la seule action de la pesanteur. L'animal se comporte donc dans l'air à la manière d'une balle rebondissant régulièrement sur une raquette qui la relance verticalement à chaque coup frappé.

L'oiseau, l'insecte, exécutent donc des oscillations verticales dont l'amplitude dépend de la fréquence des impulsions subies et de la durée de chacune d'elles.

Nous allons soumettre le problème au calcul qui, comme on va le voir, vient confirmer l'exactitude de notre point de vue en montrant que les effets de pression sont des effets de fin de course.

A. — Sustentation par efforts périodiques d'intensité constante.

Considérons un corps de poids $p = -mg$ qu'il s'agit de maintenir en l'air à une altitude moyenne invariable par une succession d'impulsions verticales d'intensité constante, toutes égales entre elles et régulièrement espacées dans le temps.

Portons en abscisses les temps et en ordonnées les efforts résultants qui sollicitent le corps.

Pour cela désignons par $t = \overline{OB}$ la durée d'une période complète, par $T = \overline{OA}$ la fraction de cette période pendant laquelle se produit l'impulsion, et par $n \cdot T = \overline{AB}$ la fraction de cette même période pendant laquelle le corps se trouve privé de soutien.

On a nécessairement :

$$T + n \cdot T = t$$

Soit F l'effort de soutien que l'on applique au corps pendant l'intervalle $\overline{OA} = T$. La résultante des forces pendant cet intervalle de temps sera :

$$R = F - mg$$

Pendant la fraction de temps $\overline{AB} = n \cdot T$, le corps est abandonné à lui-même ; la force qui le sollicite se réduit alors à son poids

$$p = -mg$$

On peut en conséquence tracer le diagramme des forces qui s'exercent sur le corps, en fonction du temps (fig. 9).

Ceci posé, nous allons déterminer les conditions du mouve-

ment vertical d'oscillation que prendra le corps, en examinant séparément ce qui se passe dans chacun des deux intervalles de temps $\overline{OA}$ et $\overline{AB}$.

Fig. 9. — *Sustentation par efforts périodiques d'intensité constante.*

Diagramme des efforts de soulèvement.

a) *Intervalle $\overline{OA}$.*

Soit V_o la vitesse initiale du corps suivant la verticale. Pendant l'intervalle $\overline{OA}$, l'intensité de l'accélération est

$$\gamma = \frac{F}{m} - g.$$

La vitesse verticale au bout du temps $T = \overline{OA}$ sera

$$V_A = V_o + \left(\frac{F}{m} - g \right) T \quad (1)$$

L'espace parcouru suivant la verticale pendant cette même durée de temps sera

$$e_{\overline{OA}} = V_o T + \left(\frac{F}{m} - g \right) \frac{T^2}{2} \quad (2)$$

en prenant comme origine des espaces la position du corps au temps $t = 0$.

b) *Intervalle $\overline{AB}$.*

L'accélération est ici celle de la pesanteur. Au début de l'intervalle en question, le corps possède une vitesse égale à V_A .

La vitesse au bout du temps nT sera

$$V_B = V_A - g \cdot nT = V_o + \left(\frac{F}{m} - g\right) T - g \cdot nT \quad (3)$$

L'espace parcouru pendant l'intervalle considéré sera

$$e_{\overline{AB}} = \left[V_o + \left(\frac{F}{m} - g\right) T \right] nT - g \frac{n^2 T^2}{2} \quad (4)$$

c) *Equations du mouvement.*

Comme, après la période considérée de durée ϑ , il doit en venir une autre tout à fait semblable, les conditions initiale et finale doivent être nécessairement les mêmes. En particulier la vitesse V_B doit être égale à V_o ce qui donne, en égalant ces deux grandeurs

$$\left(\frac{F}{m} - g\right) T - nT = 0$$

D'où l'on tire

$$F = mg(n + 1) \quad (5)$$

Si $\vartheta = T + nT$ est supposé constant, lorsque n augmente $\overline{AB} = nT$ augmente au détriment de $\overline{OA}$, la durée de l'effort de soutien diminue. L'effort à fournir est donc d'autant plus grand que sa durée d'application est plus courte ce qui était à prévoir *a priori*.

D'autre part pour que le corps se maintienne à une altitude moyenne constante, c'est-à-dire sans s'élever ni s'abaisser d'une période à l'autre, il faut que la somme algébrique des espaces parcourus pendant les deux intervalles de temps $\overline{OA}$ et $\overline{AB}$ soit égale à zéro, ce qui revient à dire que le corps repasse par les mêmes points de l'espace aux mêmes instants de deux périodes quelconques.

En remplaçant F par sa valeur dans les seconds membres des équations (2) et (4) et annulant la somme de ces seconds membres, il vient :

$$V_o T + g n \frac{T^2}{2} + \left[V_o + g n T \right] nT - g \frac{n^2 T^2}{2} = 0$$

D'où l'on tire

$$V_o = -gn \frac{T}{2} \quad (6)$$

Cette expression est *toujours négative*. Le corps sera donc toujours en train de tomber au début de l'impulsion.

La vitesse au temps $T = \overline{OA}$ sera d'après (1) et en remplaçant F et V_o par leurs valeurs respectives :

$$V_A = gn \frac{T}{2}$$

Elle est égale et de signe contraire à V_o .

On a vu d'autre part que la vitesse à la fin de l'intervalle $\overline{AB}$ devait être égale à V_o .

$$V_B = -gn \frac{T}{2}$$

Il en résulte que dans chacun des deux intervalles d'accélération constante $\overline{OA}$ et $\overline{AB}$ les vitesses initiale et finale sont égales entre elles et de sens contraire. La vitesse varie donc symétriquement dans chaque intervalle, ce qui l'oblige à s'annuler aux milieux de ceux-ci. Cela signifie que le corps parvient à ces deux instants aux extrémités respectives de son oscillation verticale (diagramme fig. 10).

Fig. 10. — *Sustentation par efforts périodiques d'intensité constante.*

Diagramme donnant les altitudes du corps en fonction du temps. — Les maximum d'altitude ont lieu au milieu du temps pendant lequel le corps est abandonné à lui-même (intervalle $\overline{AB}$). — Les minimum ont lieu au contraire au milieu du temps pendant lequel l'effort s'exerce (intervalle $\overline{OA}$).

Comme V_0 est négatif, l'extrémité de course qui est atteinte pendant l'intervalle $\overline{OA}$ est nécessairement l'extrémité *inférieure* ; celle qui est atteinte au milieu de l'intervalle $\overline{AB}$ est l'extrémité *supérieure*.

Le corps se trouve donc au point le *plus bas* de son oscillation verticale au milieu du temps pendant lequel *l'effort s'exerce*, et au point le *plus haut* au milieu du temps pendant lequel il est *abandonné à lui-même*.

Cette conclusion, d'apparence première un peu paradoxale, était presque évidente *a priori* en se reportant à l'exemple de la balle rebondissant sur la raquette.

Il n'a cependant été tenu aucun compte de ce décalage des effets sur les altitudes dans les interprétations données par Marey relativement aux courbes qu'il avait relevées sur les oscillations verticales des oiseaux. Le raisonnement a été conduit comme si les efforts étaient en concordance avec les altitudes observées, alors que c'est le contraire qui a lieu (1).

d) *Amplitude de l'oscillation verticale.*

Cherchons maintenant à déterminer l'amplitude totale de l'oscillation verticale. Elle est égale à la somme des valeurs absolues des espaces parcourus pendant les demi-intervalles $\frac{OA}{2}$ et $\frac{AB}{2}$.

$$a = \frac{e_{OA}}{2} + \frac{e_{AB}}{2}$$

(1) Au moment de mettre sous presse, nous apprenons qu'une interprétation rationnelle des courbes de Marey a déjà été donnée par M. De Labouret, par une méthode différente. Procédant par analyse directe, l'auteur a calculé pour chaque point de la courbe des altitudes les forces instantanées correspondantes. Il a opéré de même pour les courbes représentant la variation de vitesse horizontale. Il en a conclu, en particulier, à la production d'un effort de poussée vers l'avant au moment de l'élévation, ce qu'indiquent *a priori* nos théories. Toutefois les idées de l'auteur diffèrent entièrement des nôtres en ce qui concerne la théorie du vol. Pour évaluer le travail dépensé, il applique aux mouvements alternatifs les lois des courants d'air continus (proportionnalité des effets aux surfaces et aux carrés des vitesses); et l'on a vu, par les expériences de la cuve à eau, que cela n'était pas possible.

ce qui donne après substitutions

$$a = g \frac{n^2 T^2}{8}$$

en exprimant T en fonction de θ , il vient

$$a = \frac{g \theta^2}{8} \cdot \frac{n^2}{(n+1)^2}$$

Quand la durée pendant laquelle s'exerce l'effort tend vers zéro, n augmente indéfiniment, l'amplitude a augmente alors et tend vers la valeur limite

$$a = \frac{g \theta^2}{8}$$

On voit que l'amplitude *maximum* de l'oscillation verticale, sous l'influence des forces extérieures dépend exclusivement du nombre d'impulsions par seconde $n = \frac{1}{\theta}$.

Elle est plus grande chez les oiseaux à battements lents que chez les rameurs à battements précipités. Elle est absolument négligeable chez l'insecte. Chez la mouche commune en particulier qui fait à peu près 300 battements par seconde, si l'on admet un seul effet sustentateur par battement, la limite supérieure de l'oscillation est

$$a = \frac{9810}{8 \times 300^2} = \text{un centième de millimètre environ.}$$

B. — *Sustentation par efforts périodiques d'intensité variable.*

Supposons maintenant que l'effort périodique de soulèvement, au lieu de rester constant pendant toute la durée de l'impulsion, parte de zéro au début de celle-ci puis passe par un maximum et retombe à zéro en fin de la période de soutien.

Nous prendrons, comme courbe représentative de l'effort appliqué, une parabole d'axe vertical passant par les points O et A. L'ordonnée maximum est atteinte au temps $t = \frac{T}{2} = a$.

Nous la désignerons par b (fig. 11).

L'équation de la parabole de paramètre p rapportée aux axes ot et oy sera

$$(t - a)^2 = 2p(b - y).$$

Partant de là, nous allons déterminer comme précédemment

les conditions du mouvement vertical dans chacun des deux intervalles de temps $\overline{OA} = T$ et $\overline{AB} = nT$.

a) *Intervalle $\overline{OA}$.*

Fig. 11. — *Sustentation par efforts périodiques d'intensité variable.*

Diagramme des efforts de soulèvement en fonction du temps.

Au temps quelconque t de l'intervalle OA , la force d'impulsion est représentée par l'ordonnée correspondante de la parabole

$$F = b - \frac{(t - a)^2}{2p}$$

La résultante des forces sur le corps est alors

$$f_t = b - \frac{(t - a)^2}{2p} - mg$$

Or on a

$$a^2 = 2p b.$$

D'où

$$f_t = b \left[1 - \frac{(t - a)^2}{a^2} \right] - mg$$

L'accélération à ce même instant t est

$$\gamma_t = \frac{b}{m} \left[1 - \frac{(t - a)^2}{a^2} \right] - g.$$

ou en remplaçant a par sa valeur $\frac{T}{2}$

$$\gamma_t = \frac{4b}{mT} \left(t - \frac{t^2}{T} \right) - g.$$

Or on a pour expression de la vitesse au temps t

$$V_t = \int v_t \cdot dt$$

ce qui donne

$$V_t = \frac{4b}{mT} \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3T} \right) - g \cdot t + V_o,$$

où V_o est la constante d'intégration déterminée par les conditions initiales ($t = 0$).

La vitesse en fin de la période d'impulsion s'obtient en faisant $t = T$. Ce qui donne après simplification

$$V_A = T \frac{(2b - 3mg)}{3m} + V_o \quad (8)$$

D'autre part l'espace parcouru au temps t de l'intervalle $\overline{OA}$ est donné par

$$e_t = \int V_t \cdot dt$$

D'où

$$e_t = \frac{4b}{mT} \left(\frac{t^3}{6} - \frac{t^4}{12T} \right) - \frac{g t^2}{2} + V_o \cdot t$$

La constante d'intégration est nulle si l'on prend la position du corps au temps $t = 0$ comme origine des espaces.

L'espace parcouru en fin de la période d'impulsion s'obtient en faisant $t = T$ ce qui donne après réductions

$$e_{\overline{OA}} = T^2 \frac{(2b - 3mg)}{6m} + V_o \cdot T \quad (9)$$

b) *Intervalle $\overline{AB}$.*

La vitesse du corps au temps $t = T$ origine de la nouvelle période est donnée par l'équation (8). La vitesse W_t au temps quelconque t de cette même période d'origine A est

$$W_t = V_A - g \cdot t$$

Au temps $t = n \cdot T$ c'est-à-dire en fin de période, cette vitesse est

$$W_{nT} = T \frac{(2b - 3mg)}{3m} + V_o - g \cdot n \cdot T \quad (10)$$

c) *Equation du mouvement.*

La première condition de périodicité du mouvement est comme précédemment :

$$W_{nT} = V_o,$$

En remplaçant W_{nT} par sa valeur dans cette égalité il vient finalement

$$b = \frac{3}{2} mg (n + 1). \quad (11)$$

D'autre part, l'espace parcouru au temps $t = nT$ fin de l'intervalle AB est

$$e_{\overline{AB}} = V_A \cdot nT - g \frac{n^2 T^2}{2}$$

Or, en remplaçant b par sa valeur on a d'après l'équation (8) :

$$V_A = ngT + V_o$$

En portant cette valeur de V_A dans l'équation précédente on obtient

$$e_{\overline{AB}} = [ngT + V_o] nT - g \frac{n^2 T^2}{2}$$

ou

$$e_{\overline{AB}} = V_o nT + g \frac{n^2 T^2}{2} \quad (12)$$

La condition de constance de l'altitude moyenne est

$$e_{\overline{OA}} + e_{\overline{AB}} = 0.$$

En remplaçant $e_{\overline{OA}}$ et $e_{\overline{AB}}$ par leurs valeurs tirées des égalités (9) et (12), on obtient

$$T^2 \frac{(2b - 3mg)}{6m} + V_o T + V_o nT + g \frac{n^2 T^2}{2} = 0.$$

En remplaçant b par sa valeur $\frac{3}{2} mg(n+1)$ et opérant les réductions nécessaires, cette équation nous donne

$$V_o T(n+1) + g \frac{nT^2}{2} (n+1) = 0$$

D'où l'on tire la valeur de V_o

$$V_o = -g \frac{nT}{2} \quad (13)$$

Il est à remarquer que cette valeur est la même que celle que nous avons déjà trouvée dans le cas de l'effort constant.

On vérifierait de même que la vitesse V_A en fin de la période OA est égale à $g \frac{nT}{2}$. Elle ne diffère donc que par le signe de la vitesse initiale V_o . Enfin en faisant $t = \frac{T}{2}$ dans l'expression de la vitesse V_t on trouve que cette vitesse est alors égale à zéro.

Les conditions sont donc rigoureusement les mêmes que dans le cas de l'effort constant. Les vitesses ont les mêmes valeurs au commencement et à la fin de l'intervalle d'impulsion et, comme dans le cas précédent, le corps passe au point le plus bas de son oscillation au milieu du temps pendant lequel s'exerce l'effort de soutien.

La valeur $-V_0$ de la vitesse au début de la période d'abandon $\overline{AB}$ montre que le corps atteint de même son point culminant au milieu de cet intervalle de temps.

Les conclusions sont donc identiques aux précédentes.

En cherchant, comme nous l'avons fait dans le cas de l'effort constant, à déterminer l'amplitude totale de l'oscillation, on trouve :

$$a = g T^2 \frac{4n - 3}{32n}$$

ce qui donne comme valeur limite quand n augmente indéfiniment c'est-à-dire quand la durée de soutien tend vers zéro :

$$A = \frac{g T^2}{8} \quad (14)$$

Cette limite est la même que celle que nous avons trouvée dans le cas précédent.

C. — *Sustentation à deux efforts inégaux par période.*

Supposons maintenant qu'il s'exerce deux efforts inégaux dans le cours d'une même période. Ce cas présente un intérêt tout particulier car c'est celui du vol animal.

Nous admettrons que les temps pendant lesquels ces efforts sont appliqués au corps sont égaux entre eux, de même que les temps pendant lesquels le corps reste sans soutien.

Soient F et $\frac{F}{p}$ les valeurs respectives des deux efforts de sustentation. Ces hypothèses sont exprimées par le diagramme ci-contre (fig. 12). Nous procéderons comme dans les cas précédents pour établir les conditions de l'oscillation en séparant la période entière en quatre intervalles respectivement égaux à T_1 , $n T_1$, T et $n T$ avec la condition

$$T(n+1) = \frac{\theta}{2}$$

Calculons dans chaque intervalle d'accélération constante, les valeurs respectives de la vitesse finale et du chemin parcouru.

Fig. 12. — *Sustentation par efforts périodiques d'intensité inégale.*

Diagramme des efforts en fonction du temps.

Si V_o est la vitesse à l'origine, les quantités désignées ci-dessus sont exprimées de la façon suivante :

a) *Intervalle OA.*

$$\left\{ \begin{aligned} V_A &= V_o + \left(\frac{F}{m} - g \right) T \\ e_{OA} &= V_o T + \left(\frac{F}{m} - g \right) \frac{T^2}{2} \end{aligned} \right.$$

b) *Intervalle AB.*

$$\left\{ \begin{aligned} V_B &= V_o + \left(\frac{F}{m} - g \right) T - g n T \\ e_{AB} &= \left[V_o + \left(\frac{F}{m} - g \right) T \right] n T - g \frac{n^2 T^2}{2} \end{aligned} \right.$$

c) *Intervalle $\overline{BC}$.*

$$\left\{ \begin{aligned} V_C &= V_o + \left(\frac{F}{m} - g \right) T - g n T + \left(\frac{F}{p m} - g \right) T \\ e_{BC} &= \left[V_o + \left(\frac{F}{m} - g \right) T - g n T \right] T + \left(\frac{F}{p m} - g \right) \frac{T^2}{2} \end{aligned} \right.$$

d) *Intervalle CD.*

$$\begin{cases} V_D = V_o + \left(\frac{F}{m} - g\right) T - g n T + \left(\frac{F}{pm} - g\right) T - g n T \\ e_{CD} = \left[V_o + \left(\frac{F}{m} - g\right) T - g n T + \left(\frac{F}{pm} - g\right) T \right] n T - \frac{g n^2 T^2}{2} \end{cases}$$

La première condition de périodicité est

$$V_D = V_o$$

Ce qui donne

$$\left(\frac{F}{m} - g\right) T - g n T + \left(\frac{F}{pm} - g\right) T - g n T = 0$$

ou

$$\frac{F}{m} \frac{p+1}{p} - 2g(n+1) = 0.$$

D'où l'on tire

$$F = \frac{p}{p+1} 2mg(n+1) \quad (15)$$

ce qui donne pour

$$\frac{F}{m} - g \text{ et } \frac{F}{pm} - g \text{ les valeurs suivantes}$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{F}{m} - g &= \frac{g}{p+1} (2pn + p - 1) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{F}{pm} - g &= \frac{g}{p+1} (2n - p + 1) \end{aligned} \right. \quad (17)$$

La seconde condition de périodicité est que la somme des espaces parcourus pendant les quatre intervalles soit égale à zéro

$$e_{OA} + e_{AB} + e_{BC} + e_{CD} = 0.$$

Nous donnerons immédiatement le résultat de cette sommation pour éviter au lecteur de fastidieux calculs sans aucun intérêt; il vient après les substitutions nécessaires :

$$gT \left[\frac{2pn + p - 1}{p+1} \cdot \frac{4n+3}{2} + \frac{2n - p + 1}{p+1} \cdot \frac{2n+1}{2} - n(2n+1) \right] + V_o(2n+2) = 0.$$

D'où l'on tire en fin de compte :

$$V_o = gT \frac{1 - (2n+1)p}{2(p+1)} \quad (18).$$

Cette expression est toujours négative si $p > 1$.

En portant cette valeur dans l'expression de V_A et remplaçant $\frac{F}{m} - g$ par sa valeur, il vient :

$$V_A = gT \frac{1 - (2n+1)p}{2(p+1)} + \frac{g}{p+1} (2pn + p - 1) T.$$

D'où l'on tire après réduction :

$$V_A = -gT \frac{1 - (2n + 1)p}{2(p + 1)}$$

C'est-à-dire

$$V_A = -V_o.$$

Les vitesses initiale et finale pour la période $O\bar{A}$ sont donc encore égales et de sens contraire comme dans les deux cas précédents.

Si l'on cherche la valeur de V_B on trouve de même

$$V_B = V_o + \left(\frac{F}{m} - g \right) T - gnT$$

ce qui donne

$$V_B = - \frac{gT}{2(p + 1)} (2n - p + 1).$$

Cette fois la valeur n'est plus la même que celle trouvée pour V_B dans les deux cas précédents, et qui était alors V_o .

On ne peut avoir

$$V_B = V_o \text{ que si } p = 1.$$

Les deux efforts $\frac{F}{m}$ et $\frac{F}{p m}$ sont alors égaux et l'on retombe exactement sur le premier cas.

Si $p > 1$, c'est-à-dire si la seconde impulsion est plus faible que la première, la valeur de V_B est plus faible que V_o , car $2n - p + 1 < 2n$.

Pour toutes les valeurs de p comprises entre 1 et 3, $2n - p + 1$ est positif quand n lui-même est supérieur à l'unité, et $V_B = - \frac{gT}{2(p + 1)} (2n - p + 1)$ est négatif; le corps est alors en chute à l'instant $t = OB$. Comme les efforts de sustentation sont généralement de courte durée, n a des valeurs très supérieures à l'unité. On peut donc dire que dans la plupart des cas le corps sera en chute en fin de l'intervalle AB .

Si l'on remarque que dans l'expression V_B le terme $\frac{g}{p + 1} (2n - p + 1)$ représente précisément la valeur de l'accélération $\gamma_{\overline{BC}} = \frac{F}{p m} - g$ pendant l'intervalle de temps $B\bar{C}$, V_B peut se mettre sous la forme :

$$V_B = - \gamma_{\overline{BC}} \frac{T}{2}.$$

Or la vitesse en c , fin de l'intervalle $\overline{BC}$ d'accélération $\gamma_{\overline{BC}}$ est donnée par

$$V_C = V_B + \gamma_{\overline{BC}} T$$

ou

$$V_C = -\gamma_{\overline{BC}} \frac{T}{2} + \gamma_{\overline{BC}} T = \gamma_{\overline{BC}} \frac{T}{2}$$

Il en résulte que cette vitesse est égale et de signe contraire à V_B . Le corps passera donc par un *nouveau minimum* d'altitude au milieu de l'intervalle de temps $\overline{BC}$.

Ce nouveau minimum a évidemment une valeur supérieure au premier lorsque $p > 1$ et n'introduit qu'un léger enfoncement dans l'oscillation verticale.

Fig. 13. — *Sustentation par efforts périodiques d'intensité inégale.*

Diagramme des altitudes prises par le corps en fonction du temps.

Le corps passe toujours par un minimum d'altitude au milieu des périodes d'impulsion. Les courbes restent *symétriques*. À mesure que le second effort se réduit la courbe passe de la forme 1 à la forme 3.

Il ne reste plus qu'à remarquer que dans la période $\overline{CD}$, le corps retombe symétriquement à sa montée dans l'intervalle $\overline{AB}$ puisque les périodes sont égales entre elles, de même que les accélérations, et qu'enfin les vitesses initiale et finale sont respectivement égales et de signes contraires.

Si donc on représente par une courbe l'oscillation verticale, en portant les temps en abscisses et les altitudes en ordonnées, comme nous l'avons déjà fait, on obtient une courbe symétrique par rapport au milieu de l'intervalle $\overline{BC}$ et présentant la forme ci-contre (fig. 13).

Si $p = 1$ on obtient la courbe a_1 relative au premier et au second cas traités. Si $p \neq 1$ on obtient des courbes telles que a_2 ou a_3 dont la forme reste toujours entièrement symétrique.

Comme on le voit, *le milieu de chaque période d'impulsion correspond toujours à un minimum d'altitude.*

Les *maximum* se produisent toujours dans les périodes où le corps est abandonné à lui-même.

Ces faits qui, croyons-nous, n'avaient pas été exactement chiffrés jusqu'à maintenant, malgré leur extrême simplicité, sont de la plus haute importance pour l'interprétation des courbes relatives aux oscillations verticales dans l'exercice du vol animal.

Avant d'aborder toutefois l'étude de ces dernières, il est indispensable de connaître le rôle joué par la masse des ailes au cours de chaque battement.

Influence de la masse des ailes *Oscillation apparente. — Oscillation réelle*

Le centre de gravité du corps d'un oiseau en équilibre dans l'air ne peut se déplacer que sous l'influence *de forces extérieures*.

Il semblerait donc que l'on soit en droit de négliger le rôle de la masse des ailes, puisque les déplacements de celles-ci par rapport au corps s'effectuent sous l'action des forces musculaires de l'oiseau, qui sont des *forces intérieures*.

Il n'en est rien cependant ; car, si les mouvements des ailes ne peuvent changer la position du centre de gravité dans l'espace, ils ont pour conséquence *un déplacement relatif* de ce même centre par rapport *au corps* de l'oiseau.

Quand les ailes sont élevées au-dessus du dos, le centre de gravité de l'animal entier est plus haut placé dans son corps lui-même que quand elles sont en bas.

Si donc le centre de gravité de l'ensemble reste immobile, *le corps* de l'oiseau est obligé d'osciller de part et d'autre de ce centre qui ne bouge pas. Il doit *s'élever* quand les ailes baissent et *descendre* quand les ailes montent.

Quand on relève la courbe des oscillations verticales d'un oiseau, on est forcé de viser un point déterminé de son *corps*. Les déplacements dont il vient d'être question interviennent donc dans les relevés que l'on peut faire et il faut en tenir sérieusement compte, car ce sont généralement des mouvements très importants. Ils constituent à peu près à eux seuls toute l'oscillation du corps chez les insectes.

Il est toutefois très facile d'en déterminer l'amplitude *a priori*. Il suffit pour cela de connaître :

- 1° Le poids de chaque aile = p ;
- 2° La distance du centre de gravité de chaque aile au point d'articulation de celle-ci sur le corps = d ;
- 3° L'angle décrit par l'aile dans un battement complet ;
- 4° Le poids du corps sans les ailes = P .

On détermine la position du centre de gravité de l'ensemble pour les positions haut et bas des deux ailes et en supposant le corps maintenu à la même place.

Le déplacement de ce centre, par rapport au corps de l'oiseau, donne précisément celui que le corps effectuerait lui-même de part et d'autre d'un centre de gravité fixe.

Il donne donc l'amplitude de l'oscillation correspondante (1).

Nous appellerons celle-ci *oscillation apparente*, pour la distinguer de l'oscillation *réelle* qui correspond à un déplacement véritable du centre de gravité sous l'influence des *forces extérieures* qui ne sont autres que les réactions de l'air.

L'oscillation *totale* observée en enregistrant les déplacements

(1) En admettant pour l'angle de battement la valeur $\alpha = 120^\circ$, ce qui correspond à peu de chose près à la généralité des cas, nous avons trouvé pour ce déplacement la valeur :

$$GG' = \frac{3pd}{2p + P}$$

verticaux d'un point du corps de l'oiseau est la *somme algébrique* de l'oscillation apparente et de l'oscillation réelle.

*Tracé a priori de la courbe des oscillations totales
d'un oiseau au vol*

Considérons un canard sauvage au vol. On a vu que cet animal donne deux oscillations verticales par battement complet. La première est due à l'effet d'influence mutuelle des ailes rapprochées puis écartées l'une de l'autre au-dessus du dos au *début de l'abaissement* (expérience des plaques mobiles).

La seconde est due à la récupération de l'onde de suite et des circulaires au *début de l'élévation* après le changement de plan inférieur. Elle est sustentatrice à cause de l'exagération de ce changement de plan qui développe une composante verticale intense.

Nous sommes donc dans le cas de deux impulsions par battement (cas n° 3).

En supposant que ces impulsions soient peu différentes l'une de l'autre, la courbe des oscillations réelles se rapprochera de la forme a_1 (fig. 13). Si la seconde impulsion, qui correspond à l'élévation, est plus faible que la première, qui correspond à l'abaissement, on se rapprochera davantage de la forme a_2 .

Comme l'animal donne 5,5 battements aller et retour par seconde, on a

$$T + nT = t = \frac{1}{2 \times 5,5} = 0,091 \text{ seconde.}$$

L'amplitude *maximum* de l'oscillation réelle est donc :

$$A = \frac{g t^2}{8} = 10 \text{ millimètres environ.}$$

D'autre part, nous avons trouvé sur un sujet normal les résultats suivants : pour le poids de chaque aile p , pour le poids du corps sans aile P , et pour la distance d du centre de gravité de chaque aile à l'articulation sur le corps.

$$p = 65 \text{ grammes.}$$

$$P = 850 \text{ grammes.}$$

$$d = 85 \text{ millimètres.}$$

En appliquant la formule de la note :

$$GG' = \frac{3pd}{2p + P}$$

on a

$$GG' = 16,5 \text{ millimètres.}$$

L'oscillation apparente est donc plus grande que l'oscillation réelle ; on voit l'importance de l'erreur que l'on commettrait en la négligeant.

Fig. 14

Essai de tracé *a priori* de la courbe des oscillations verticales d'un canard sauvage en supposant assez longs les temps pendant lesquels s'exercent les efforts d'impulsion. — Cette courbe ne correspond pas à la réalité.

Supposons d'abord que la durée de l'impulsion soit égale au temps pendant lequel le corps est sans appui. Cela revient à faire $n = 1$. Dans la formule qui donne l'amplitude de l'oscillation réelle, on a

$$A = \frac{g \cdot t^2}{8} \cdot \frac{n^2}{(n+1)^2} \quad \text{où } t = 0,091$$

D'où

$$a = 2,5 \text{ m/m.}$$

En traçant la courbe correspondante *a*, et en lui ajoutant les ordonnées de la courbe d'oscillation apparente *b*, dont l'amplitude est 16,5 m/m, on obtient le tracé *c* (fig. 14), qui indique bien deux

remontées par battement complet aller et retour, l'une correspondant à l'élévation et l'autre à l'abaissement.

Si, maintenant, la durée de l'impulsion diminue et n'atteint plus que le quart du temps pendant lequel le corps est sans appui, l'amplitude réelle augmente ; on a

$$n = 4.$$

$$a = 6,5 \text{ m/m.}$$

L'oscillation apparente reste la même et la courbe prend l'aspect de la figure 15, où chacune des oscillations d'abaissement et d'élévation s'accuse davantage. En outre, les deux oscillations tendent à devenir égales entre elles.

Fig. 15

Essai de tracé *a priori* de la courbe des oscillations verticales d'un *canard sauvage* en supposant *très courts* les temps pendant lesquels s'exercent les efforts d'impulsion. — Cette courbe se rapproche beaucoup de celles qu'a relevées Marey.

Le tracé n'a pas encore le caractère très accentué des courbes relevées par Marey, sur le canard au vol, mais il s'en rapproche.

Si les courbes de Marey sont exactes et ne sont pas faussées par des erreurs de méthode ou d'instruments, la portion de courbe entre l'abaissement et l'élévation doit descendre au niveau de l'axe des x . Il est alors indispensable d'admettre :

Ou bien que la courbe b , relative à l'oscillation apparente, est décalée sur la courbe de l'oscillation réelle a , de telle sorte que le minimum de celle-ci corresponde au maximum de la première ;

Ou bien qu'il existe, en fin de course d'abaissement, un effet négatif de la part de l'air, effet nuisible, par conséquent, et tendant à faire baisser le centre de gravité de l'oiseau.

Nous penchons vers la seconde hypothèse, car la première est insuffisante à expliquer les faits. La portion négative de la courbe α des oscillations réelles a des ordonnées bien plus faibles que celles de la courbe des oscillations apparentes. Un décalage entre les deux courbes, quelle que soit son importance, n'arriverait pas à ramener la courbe jusqu'à toucher l'axe des x .

Les courbes de Marey nous conduisent donc à admettre qu'en fin d'abaissement l'aile est légèrement prise par en-dessus, avant le changement de plan. Nous avons constaté quelque chose d'à peu près semblable dans les ailes artificielles à changement de plan commandé, mais nous aurions pensé, toutefois, que l'oiseau saurait éviter cet inconvénient.

Quoi qu'il en soit, la présence de deux oscillations presque égales à l'abaissement et à l'élévation, très nettement accusées, nous conduit à conclure que les effets périodiques de soutien s'effectuent avec de grandes valeurs de n , puisque les faibles valeurs de ce terme ne conduisent qu'à des renflements à peine marqués dans la courbe des altitudes.

Les effets de soutien sont donc de durée très courte et ont le caractère de *chocs très violents* semblables à des coups de fouet, comme l'a du reste montré le déchiquèment rapide des plumes artificielles adaptées au pigeon. Nous allons d'ailleurs voir, dans le dernier paragraphe, que c'est là la condition nécessaire de la sustentation à faible puissance.

Il ne nous a pas été donné, faute de sujets, de pouvoir mesurer les caractéristiques des ailes d'un héron, en ce qui concerne leur centre de gravité, la distance de celui-ci à l'axe d'articulation, etc. Nous ne pouvons donc tracer, *a priori*, la courbe des oscillations de cet oiseau. Mais nous en possédons une que nous avons relevée nous-même sur l'écran cinématographique.

Cette courbe (fig. 43) montre un gain d'altitude à l'abaissement et une perte à l'élévation. Elle se rapproche, à l'échelle près, des ordonnées de la courbe (fig. 14). Mais on en obtient encore une

meilleure représentation en admettant que l'effet sustentateur, au début de l'élévation, est plus faible que l'effet sustentateur au début de l'abaissement. En supposant respecté, dans le cas du héron, le rapport qui existe, chez le canard, entre la durée du battement et l'oscillation apparente, et en admettant que l'effet sustentateur, en début d'élévation, soit la moitié de l'effet sustentateur en fin d'abaissement, on obtient le tracé approximatif (fig. 16) qui correspond, très sensiblement, à ce que nous avons relevé. On y observe notamment le renflement qu'indique l'expérience. De toutes façons, les courbes observées révélant toutes des *maximum d'altitude* soit au milieu, soit en fin de l'abaissement, il est permis de conclure, d'après ce que nous avons démontré, *que les maximum d'efforts* ont toujours lieu *au début* de l'abaissement et non en son milieu.

Fig. 16. — Essai de tracé a priori de la courbe des oscillations verticales d'un héron.

Cette courbe se rapproche beaucoup de celle que nous avons relevée (fig. 43)

Ce sont donc des actions *de fin de course* qu'utilise l'oiseau pour son vol, ce qui fait de l'animal un alternateur à air à *grand décalage*, et pratiquant par conséquent la récupération d'une portion notable de l'énergie contenue dans ses propres courants de remous.

Nous n'avons eu à notre disposition qu'un très petit nombre d'oiseaux, et il resterait à faire une très grande quantité d'expé-

riences. Nous ne savons s'il nous sera permis d'en exécuter au moins les plus importantes, étant donné la faiblesse de nos ressources. Contraint de construire nous-même nos appareils, par raison d'économie, nous ne pouvons aller très loin dans le domaine de l'investigation scientifique, qui demande du temps et de puissants moyens matériels. Mais la route est tracée : en employant les procédés de calcul et les méthodes établis par nous, d'autres expérimentateurs, mieux outillés, parviendront, nous en sommes certain, à faire les vérifications et les études qui nous manquent encore.

Sustentation à puissance nulle

Nous terminerons ces quelques notes par un calcul fort simple démontrant que la sustentation, par battements alternatifs, peut être obtenue à puissance théoriquement nulle.

Fig. 17. — Schéma des positions prises par la plaque hypothétique à retournement brusque.

Considérons une palette animée d'un mouvement alternatif horizontal rectiligne. Cette palette est supposée se mouvoir de telle sorte qu'elle marche avec une inclinaison constante sur l'horizontale pendant toute la durée d'une course.

A chaque extrémité elle se retourne brusquement, de façon à renverser son attaque, et elle revient avec une incidence symétrique de la première, par rapport à la verticale (fig. 17). Les positions d'une course « aller » sont donc représentées par les traits 1, 2, 3,

4, 5 ; les positions « retour » par les traits 6, 7, 8, 9, 10. (On a séparé ici, comme dans le cours de cet ouvrage, les silhouettes « aller » des silhouettes « retour », pour ne pas embrouiller la figure. En réalité, tout se passe dans un même plan horizontal).

Supposons que les pressions sur la plaque ne se manifestent que pendant une portion du temps total de la course. Portons en abscisses les temps, en ordonnées les vitesses de la plaque, que nous supposerons être celles d'une sinusoïde $y = \sin t$ (fig. 18).

OB représente une course entière. OA = t représente le temps pendant lequel il y a impulsion, par pression sur la plaque. On peut exprimer à chaque instant le travail à fournir.

Fig. 18. — Diagramme sinusoïdal des vitesses de la plaque en fonction du temps.

Nous avons vu précédemment que pour soutenir par impulsion un corps de poids p , l'effort à développer varie dans le rapport de OB à OA, quand OA = t diminue. On a donc :

$$F = \frac{t}{T} \cdot p$$

Dans l'intervalle OA prenons un instant quelconque OM = t .

La vitesse, à cet instant, est MP = $\sin t$.

L'effort sur la plaque, supposé constant, est égal à

$$\frac{F}{\cos \alpha} \text{ où } \alpha \text{ désigne l'angle d'attaque.}$$

L'effort résistant ou traînée de la plaque est :

$$F \operatorname{tg} \alpha$$

Le travail résistant pendant le temps dt est :

$$F \operatorname{tg} \alpha \cdot V_t \cdot dt = F \operatorname{tg} \alpha \sin l \, dl$$

Le travail pendant la période OA est donc

$$T = \int_0^T F \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin l \, dl$$

ou

$$T = F \operatorname{tg} \alpha (1 - \cos T)$$

or

$$F = \frac{T}{\operatorname{tg} \alpha} p$$

on a donc

$$T = \frac{T}{\operatorname{tg} \alpha} p \operatorname{tg} \alpha (1 - \cos T)$$

Quand T tend vers zéro, T prend la forme indéterminée $\frac{0}{0}$. Pour lever l'indétermination, il suffit de prendre le rapport des dérivées des quantités variables $\frac{1 - \cos T}{T}$.

Ce rapport est $\frac{\sin T}{1}$ qui tend vers 0 quand T tend lui-même vers zéro.

Le travail résistant tend donc vers zéro, lorsque la durée de l'impulsion décroît, de manière à lui donner le caractère d'un choc ou d'une percussion.

Il est d'ailleurs évident que, dans ce cas, les hypothèses un peu étroites qui ont présidé à l'établissement de ce raisonnement n'ont plus besoin d'être maintenues ; il suffit d'en retenir la nécessité d'un changement de plan *très rapide* tel que le font les volateurs animés.

Nota. — Nous nous proposons de décrire, dans notre prochain ouvrage, les applications pratiques qu'il nous a été donné de faire de nos théories. D'importants résultats, autorisant de grands espoirs, ont été obtenus déjà dans l'air comme dans l'eau.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.

I. LA QUESTION DU VOL ANIMAL

Pages

Etat actuel de la question.	1
Incompatibilité des lois connues de la résistance de l'air avec le vol animal.	2
Origine des erreurs.	12
Phénomènes d'inertie dans les courants alternatifs ou intermittents.	13
Vérification expérimentale des phénomènes d'inertie dans les mouvements alternatifs ou intermittents.	15
Intervention des phénomènes d'inertie dans le vol animal.	18

II. LES COURANTS DE REMOUS

Circulaires antéro-postérieurs.	22
Onde de suite.	28
Application au cas des plans minces.	31
Phénomènes d'inertie dans les remous.	36
Impulsions récupératrices sur des surfaces isolées.	42

III. THÉORIE DU VOL

Le coup d'aile.	47
Théorie du coup d'aile dans le vol ramé.	55
Vol ascendant vertical.	64
Vol plané.	68
Vol ondulé.	73
Vol en orbes courtes.	78

IV. PROCÉDÉS D'INVESTIGATION. — EXPÉRIENCES

1° <i>Méthode stroboscopique</i>	81
Stroboscope électrique.	83
Production de la décharge électrique.	87
Enregistrement photographique.	96
Enregistrement cinématographique.	96

	Pages
<i>2° Vérifications expérimentales relatives aux courants de remous :</i>	
Circulaires dans l'air.	103
Circulaires dans l'eau.	106
Circulaires dans les hélices.	108
Circulaires et onde de suite dans une aile battante alternative. . . .	112
<i>Expériences sur des animaux volants :</i>	
Positions successives de l'aile au cours d'un battement.	121
Etude du mouvement des ailes et des remous produits.	126
Sens des courants de remous.	131
Rôle des ailes multiples.	133
Cas de l'oiseau.	138
Système musculaire du vol chez l'insecte.	142
Examen stroboscopique.	146
CONCLUSION.	149
APPENDICE.	
Détermination des éléments d'un cycle à récupération.	153
Sustentation par impulsions périodiques.	164
Sustentation à puissance nulle.	186

Imprimerie E. DURAND, 18, Rue Séguier, Paris

EE
Günichen, Etienne
nos lettres Les Oise

AMNH LIBRARY

100113008