

*Bibliothèque numérique*

**medic@**

**Marey, Etienne-Jules. - Mémoire sur le vol des insectes et des oiseaux de Marey**

*In : Annales des sciences naturelles. (Zoologie et paléontologie), 1869, 5è série, 12, n° 1*



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)  
Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/hist/med/medica/cote?90021x05x1969x12>

## MÉMOIRE

SUR

# LE VOL DES INSECTES ET DES OISEAUX;

Par M. MAREY.

### AVANT-PROPOS.

Le mécanisme du vol, chez les Insectes comme chez les Oiseaux, est jusqu'ici un des points de la physiologie les moins connus. Et pourtant c'est un problème qui a eu le privilège de piquer au plus haut degré la curiosité des chercheurs. Il est facile, je crois, de montrer la cause du peu de succès de tant d'efforts, et de prouver aussi que la solution de ce problème est possible aujourd'hui, grâce aux ressources nouvelles dont les expérimentateurs peuvent disposer.

Les mouvements de l'aile, chez les Insectes, sont tellement rapides que l'œil ne peut les suivre ; chez la plupart des Oiseaux, s'ils sont en général moins rapides, ils le sont encore trop pour qu'on puisse, par la simple observation du vol, saisir les phases diverses de chaque révolution de l'aile. Assurément, les observateurs nous ont légué des notions importantes : les uns, sur la vitesse du vol chez différentes espèces d'Oiseaux ; les autres, sur l'influence que la direction du vent exerce sur lui. D'autres nous ont fait connaître les différents types qu'affecte le vol, selon la forme et l'étendue des ailes de chaque espèce, ce qui fait que certains Oiseaux semblent, comme le Condor, planer les ailes immobiles, tandis que d'autres battent de l'aile d'un mouvement incessant et régulier. Toutes ces notions ont une grande importance, car elles correspondent à des faits dont l'exactitude est bien établie, mais elles ne prendront toute leur valeur que lorsque nous aurons résolu cette question qui se pose la première : Comment un Oiseau ou un Insecte prend-il son point d'appui sur

l'air, et quel travail doit-il exécuter pour s'y soutenir et pour s'y transporter ?

Les physiiciens étaient-ils en mesure de donner la théorie du mécanisme du vol ? S'ils ont pu l'espérer, comme le prouvent leurs nombreuses tentatives pour mesurer la force déployée par l'Oiseau, ils ont dû reconnaître, à leur insuccès même, que la question n'était pas soluble dans les termes où elle était posée, et que le calcul ne trouvera son application que le jour où seront exactement connus les mouvements que l'oiseau imprime à ses ailes. En effet, la résistance de l'air varie suivant la vitesse de l'aile qui le frappe, suivant la forme de cette aile, suivant l'inclinaison de son plan ; toutes choses qu'il faut connaître avant d'aborder le calcul du travail effectué par l'Insecte ou par l'Oiseau.

La physiologie expérimentale peut acquérir aujourd'hui les notions indispensables à l'étude du mécanisme du vol : c'est ce que je veux entreprendre de démontrer en peu de mots.

Un exemple récent montre bien qu'il ne faut pas désespérer d'élucider les plus obscures questions de la physiologie, et que ce qui est mystérieux aujourd'hui pourra demain être facile à étudier par quelque nouvelle méthode.

En 1845, J. Müller, qui a tant contribué au progrès de la physiologie, écrivait ces lignes : « Nous n'aurons probablement » jamais les moyens d'évaluer la rapidité de l'action nerveuse ». Cinq ans après, Helmholtz donnait la mesure de cette vitesse en recourant à une méthode qui avait déjà permis aux physiiciens de mesurer la vitesse des projectiles de guerre, et, en général, des phénomènes dont la durée échappe à nos sens.

Le physiologiste expérimentateur n'a donc qu'à s'inspirer des méthodes si exactes que les physiiciens emploient ; il doit, comme eux, créer des appareils dont la précision soit en rapport avec la délicatesse du phénomène qu'il veut saisir et mesurer. Dans ces conditions, le mécanisme du vol peut être analysé dès maintenant. Si la complexité du problème rend la marche un peu longue avant qu'on arrive à la solution, du moins n'aura-t-on pas à craindre de s'égarer en route, si l'on n'emploie que des mé-

thodes rigoureuses, ainsi que j'ai essayé de le faire dans les expériences qu'on va lire.

Depuis plusieurs années, l'étude des mouvements qui accompagnent les fonctions de la vie m'avait forcé à recourir à des moyens exacts d'analyse et de mesure. L'emploi des instruments enregistreurs, des chronographes, des appareils qui transmettent les mouvements à distance sans les altérer, m'était devenu familier. J'avais appris à varier la construction de ces instruments suivant le but à atteindre ; aussi l'étude du vol s'est-elle présentée à moi comme un cas particulier du problème plus général de la fonction musculaire et du mouvement chez les êtres vivants.

Pour éviter les redites, j'aurai souvent occasion de renvoyer le lecteur à des publications antérieures, soit pour la description détaillée de certains appareils, soit pour l'exposé des faits relatifs à la production du mouvement dans le tissu musculaire.

## CHAPITRE PREMIER.

### DU VOL DES INSECTES.

Fréquence des mouvements de l'aile des Insectes. — Des différentes positions que prend l'aile d'un Insecte à chacune de ses révolutions pendant le vol. — Changements du plan de l'aile.

La marche naturelle dans une pareille étude est d'acquérir d'abord, sans idée préconçue, la connaissance exacte des mouvements que l'aile de l'insecte exécute pendant le vol, et de chercher ensuite comment ces mouvements agissent pour produire la locomotion aérienne de l'animal. Les questions à résoudre se posent donc dans l'ordre suivant :

1° Quelle est la fréquence du mouvement de l'aile chez les Insectes?

2° Quelles sont les différentes positions successives que l'aile occupe en exécutant sa révolution complète ?

3° Comment se développe la force motrice qui transporte le corps de l'animal ?

**FRÉQUENCE DES MOUVEMENTS DES AILES DES INSECTES.** — La fréquence des mouvements de l'aile varie avec l'espèce d'Insecte qu'on étudie. L'oreille entend un son aigu pendant le vol des Moustiques et de certaines Mouches ; le son est plus grave pour le vol de l'Abeille et du Bourdon ; plus grave encore pour les Macroglosses et les Sphynx. Quant aux autres Lépidoptères, ils ont en général un vol silencieux par suite de la rareté des battements de leurs ailes.

Plusieurs naturalistes ont essayé de déterminer la fréquence des battements de l'aile des Insectes, d'après la tonalité du son qu'ils produisent en volant.

Si ces bourdonnements vibratoires sont dus aux battements de l'aile, et s'ils résultent de son va-et-vient alternatif, comme le son de l'anche résulte du va-et-vient d'une lame métallique, alors, en appréciant la tonalité du son, on connaîtra le nombre de vibrations pendulaires auxquelles il correspond ; en un mot, on connaîtra la fréquence des battements. Il suffira pour cela d'un monocorde, d'un piano, d'un diapason, avec lequel on prendra l'unisson de son produit par l'Insecte. Cette méthode serait très-concluante, si le principe sur lequel elle repose était admis sans conteste.

Mais sur ce point il y a débat entre les naturalistes.

Chabrier et Lacordaire rapportent que l'on a pu détruire une portion des ailes d'un Insecte, sans que le bruit ait cessé par suite de cette ablation : « A mesure qu'on retranche de nouvelles » portions de ces organes, le son devient plus aigu, et il s'affaiblit sensiblement lorsqu'on n'en laisse qu'un tronçon. Si l'on » enlève ce dernier, ce qui ne peut se faire sans une dilacération » considérable des muscles qui l'attachent au thorax, le bourdonnement cesse entièrement. »

Si, conclut l'auteur, le bourdonnement était entièrement dû aux ailes, on ne pourrait retrancher impunément les trois quarts de ces organes. — Cette objection confirme l'hypothèse qu'elle a la prétention d'ébranler. En effet, puisque le son s'élève à mesure que l'aile vibrante diminue de longueur, ce phénomène n'est-il pas entièrement comparable à celui qu'on observe

lorsqu'on vient à raccourcir une verge vibrante et sonore ? La modification imprimée au son étant la même dans l'un et l'autre cas, le mécanisme de sa production ne doit-il pas être identique ? Au moins, les choses ne se passeraient-elles pas autrement si la vibration alaire était bien réellement la cause du bourdonnement entendu.

Les auteurs que nous venons de citer ont indiqué une toute autre cause à ce phénomène acoustique : ils l'ont attribué à l'air qui entrerait dans les trachées et qui en sortirait rapidement, mettant en vibration les petits organes écailleux qui entourent la base des stigmates. Et ils citent à l'appui de leur manière de voir ce fait, que le bourdonnement cesse aussitôt si l'on vient à enduire de gomme la surface du corps de l'animal, et à empêcher ainsi l'accès de l'air dans les canaux respiratoires. Les lèvres des stigmates se comporteraient alors comme se comportent chez les animaux supérieurs les lèvres de la glotte ; et le bourdonnement de l'Insecte serait une *voix véritable*. Quelle que soit la fortune de cette explication, le résultat qu'il nous faudra retenir sera toujours le même ; en effet, dans le mouvement de l'aile, il semble n'y avoir qu'une seule période active, celle de l'abaissement ; le relèvement se ferait en vertu de l'élasticité des pièces du thorax fortement tendues par la contraction des muscles abaisseurs. En même temps que se produit cette tension, le volume du thorax se trouve amplifié, et l'appel de l'air est le résultat immédiat de cette ampliation de volume. L'air doit donc entrer dans les trachées et en sortir à chaque battement ; et les vibrations du son produit (qu'elles proviennent de la membrane alaire ou des stigmates) correspondent exactement aux mouvements de l'aile.

Le phénomène acoustique, s'il n'est pas la conséquence du frémissement des ailes, est au moins un phénomène synchrone à celui-ci ; il peut donc nous renseigner dans tous les cas sur la fréquence des battements.

Mais lorsqu'on observe le bourdonnement d'un Insecte qui vole avec une rapidité uniforme, on s'aperçoit que la tonalité ne reste pas la même ; quand l'Insecte se rapproche de l'oreille, la

tonalité s'élève; elle s'abaisse quand il s'éloigne. Il se passe quelque chose d'analogue lorsqu'on fait rapidement passer devant l'oreille un diapason en vibration : le son rendu s'élève, puis s'abaisse, et la différence peut atteindre un quart de ton et même un demi-ton. Il faudrait donc que l'insecte sur lequel on expérimente fût toujours à la même distance de l'observateur. Ce phénomène perturbateur ne présente du reste aucune difficulté d'interprétation; il est aujourd'hui parfaitement expliqué. Sans doute, les vibrations se reproduisent toujours après le même intervalle de temps; lorsque la lame vibrante reste à la même distance de l'oreille, il leur faut le même temps pour y parvenir, et le phénomène, uniforme pour l'instrument, est uniforme aussi pour notre organe. Au contraire, si l'instrument se rapproche brusquement, la vibration qui se produit à cet instant a moins de chemin à parcourir pour venir frapper notre tympan : elle est donc plus rapprochée de celle qui la précède, et le son gagne en acuité. Si l'instrument s'éloigne, les vibrations s'espacent davantage et le son devient plus grave. Tout le monde a pu remarquer, en voyageant en chemin de fer, que si une locomotive marchant en sens inverse passe en sifflant, l'acuité du son de cette locomotive s'élève à l'instant où la machine se rapproche, tandis que le son devient plus grave quand le croisement s'est effectué et que le sifflet s'éloigne rapidement.

En somme, il est bien difficile d'estimer, d'après la tonalité du son que produit un Insecte en volant, la fréquence absolue des battements de ses ailes. Cela tient, d'une part, au peu de fixité de la tonalité du son qui se produit alors, et qui, suivant la rapidité ou la direction du vol, passe à chaque instant du grave à l'aigu. D'autre part, il est difficile d'assigner la part qui revient à chacune des ailes dans la production du son. Les mouvements des deux ailes sont-ils synchrones et se confondent-ils dans un unisson parfait? ou bien sont-ils alternants, et s'ajoutent-ils pour donner comme tonalité résultante l'*octave aiguë* du son rendu par chacune des ailes? Enfin, l'aile d'un insecte, dans sa révolution, ne subit-elle pas, par son frôlement sur l'air

dans lequel elle s'agite, des vibrations sonores beaucoup plus nombreuses que chacune des révolutions complètes qu'elle accomplit ?

La *méthode graphique* fournit une solution simple et précise de la question qui nous occupe, et permet d'évaluer, à un battement près, le nombre des mouvements que l'aile d'un Insecte produit à chaque seconde.

*Expérience.* — Sur un cylindre de 42 centimètres de circonférence, on étend une feuille de papier que l'on noircit à la fumée d'une bougie. Ce cylindre, mû par un mouvement d'horlogerie muni d'un régulateur de Foucault, tourne uniformément sur lui-même avec une vitesse d'un tour en une seconde et demie.

On prend alors, avec une pince délicate, l'Insecte dont on veut étudier les mouvements alaires au point de vue de la fréquence, et, saisissant l'animal par la partie inférieure de l'abdomen, on le place de telle sorte que l'une des ailes, à chacun de ses mouvements, vienne légèrement frôler contre le papier noirci. Chacun de ces contacts enlève le noir de fumée qui recouvrait le papier, et comme le cylindre tourne, des points nouveaux se présentent sans cesse au contact de l'aile. On obtient ainsi une figure d'une régularité parfaite si l'Insecte a été maintenu dans une position bien fixe. Ces figures, dont nous donnons quelques spécimens, diffèrent suivant que le contact de l'aile avec le papier a été plus ou moins étendu. Si le contact est très-léger, on obtint une série de points ou de courtes hachures comme dans la figure 1.

Un contact plus étendu de l'aile laisse une trace plus compliquée, dans laquelle, toutefois, on reconnaît d'une manière évidente que le même rythme se reproduit sans cesse; de sorte que si l'on regarde les points homologues, par exemple les longues hachures de la figure 2 ou les petits points qui la dominent, on voit que ces signes sont de même nombre pour une longueur donnée du graphique; qu'ils sont équidistants entre eux et que chacun d'eux est manifestement produit par le retour de l'aile à une même position après une révolution complète.

Il serait donc facile, sachant que le cylindre fait un tour en une seconde et demie, de voir combien de révolutions de l'aile sont ainsi notées sur la circonférence totale du cylindre. Mais il est encore plus commode et plus sûr de se servir du diapason

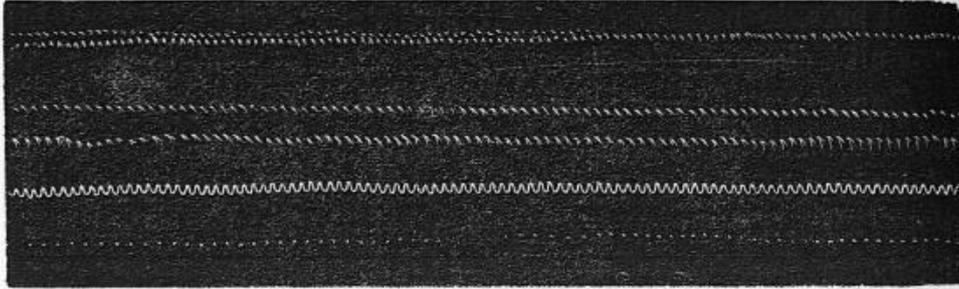


FIG. 1. — Montrant la fréquence des battements de l'aile chez un Bourdon (les trois lignes supérieures); et chez une Abeille (la ligne ponctuée inférieure). — La quatrième ligne est produite par les vibrations d'un diapason muni d'un style qui exécute 250 vibrations doubles par seconde.

chronographe, et d'enregistrer, à côté de la figure tracée par l'Insecte, les vibrations du style dont ce diapason est muni.

La figure 1 montre, à côté du graphique produit par l'aile d'un Bourdon, celui des vibrations d'un diapason qui, 250 fois



FIG. 2. — Graphique produit par l'aile d'un Bourdon frottant un peu plus fortement sur le papier que dans l'expérience précédente.

à chaque seconde, exécute une double oscillation. Le diapason servant à évaluer les durées qui correspondent à une longueur quelconque du graphique, permet de déterminer que l'aile du bourdon exécutait de 240 à 260 révolutions complètes par seconde.

*Causes qui modifient la fréquence des mouvements alaires.*  
**Frottements.** — Ce qu'on sait de l'influence des résistances sur la rapidité des mouvements que produisent les animaux devait faire penser que l'aile qui frotte sur le cylindre n'a pas la rapidité normale de ses mouvements, et que ses révolutions sont

d'autant moins nombreuses que le frottement est plus fort. L'expérience a confirmé ces vues. Un Insecte exécutant les mouvements du vol en frottant assez fortement son aile sur le papier a fourni 240 mouvements par seconde; en diminuant de plus en plus les contacts de l'aile avec le cylindre, j'ai obtenu des nombres de plus en plus grands: 282, 305 et 321. Ce dernier chiffre doit exprimer sensiblement la vitesse de l'aile qui se meut en liberté, car le graphique ne s'accusait plus que par une série de points à peine visibles. Au contraire, en frottant plus fortement j'ai vu retomber la fréquence des mouvements de l'aile à 240 et même au-dessous.

Une autre cause de modification, dans la fréquence des mouvements alaires des insectes, c'est l'*amplitude* même de ces mouvements. Je rapproche cette cause de la précédente, car il est naturel d'admettre que les grands mouvements rencontrent dans la résistance de l'air plus d'obstacle que les petits.

Quand on tient une Mouche ou un Bourdon au bout de sa pince de la façon que j'ai indiquée, on voit que l'animal exécute parfois de grands mouvements de vol: on entend alors un son grave; tandis que d'autres fois son aile n'est animée que d'un très-léger frémissement qui rend au contraire un son fort aigu. Ce que l'oreille révèle sur la différence de fréquence des battements que l'animal peut imprimer à ses ailes, lorsque rien n'entrave leurs mouvements, est entièrement confirmé par les expériences que j'ai faites par la méthode graphique. Saisissant tantôt les moments de grand vol, tantôt ceux de petit vol ou de frémissement alaire, j'ai enregistré ces deux sortes de mouvements et j'ai trouvé que la fréquence varie dans des limites très-étendues, à peu près dans le rapport de 1 à 3, la moindre fréquence appartenant aux mouvements de grande amplitude.

Les *différentes espèces* d'Insectes sur lesquelles j'ai expérimenté m'ont présenté aussi de très-grandes variations dans la fréquence des mouvements alaires. J'ai cherché autant que possible à comparer ces espèces entre elles dans des conditions semblables, c'est-à-dire pendant le grand vol, avec peu de frottement de l'aile sur le cylindre. Voici les chiffres que j'ai obtenus

comme expression de la fréquence des révolutions alaires par seconde dans différentes espèces :

Mouche commune.....	330
Bourdon.....	240
Abeille.....	190
Guêpe.....	110
Macroglosse du caille-lait.....	72
Libellule.....	28
Papillon (Piéride du chou).....	9

Des pluies abondantes et la saison déjà avancée ne m'ont pas permis d'expérimenter sur de plus nombreuses espèces ; on voit pourtant, par ce tableau, quels écarts considérables présentent entre elles les différentes espèces d'Insectes. Il sera intéressant de reprendre ces expériences sur un grand nombre d'espèces bien déterminées.

J'ajoute que, pour une même espèce, la fréquence des mouvements a peu varié, sauf le cas où l'animal était fatigué par une expérience très-prolongée ; les mouvements de ses ailes se ralentissaient alors, et leur fréquence tombait au quart ou au cinquième de son chiffre normal. Si l'on rendait alors la liberté à l'Insecte, il tombait à terre ou n'exécutait plus qu'un vol lent et de courte durée.

*Synchronisme des mouvements des deux ailes.* — Dans le vol des Insectes, les ailes s'élèvent très-fortement et viennent presque au contact l'une de l'autre au-dessus de la région dorsale de l'animal. On peut donc, en orientant convenablement l'Insecte, de façon que le plan antéro-postérieur qui le diviserait soit bien perpendiculaire à l'axe du cylindre, obtenir un graphique simultané des mouvements des deux ailes. Ces graphiques sont particulièrement faciles à obtenir dans le cas de simple frémissement alaire. Dans tous les cas, on y trouve la preuve du parfait synchronisme des révolutions des deux ailes, chacune



FIG. 3. — Graphique simultané des mouvements des deux ailes d'un Bourdon dans le petit vol. (On voit le synchronisme parfait du mouvement des deux ailes.)

arrivant au sommet de sa course en même temps que l'autre. La figure 3 fournit un spécimen des tracés ainsi obtenus.

Du reste, on peut se convaincre qu'il existe une sorte de solidarité nécessaire entre les mouvements des deux ailes. Si on lance violemment un insecte contre le sol, de manière qu'il soit étourdi par cette commotion violente et ne puisse plus exécuter de mouvements volontaires, on voit, en imprimant des mouvements à l'une des ailes, que celle de l'autre côté suit jusqu'à un certain point les mouvements imprimés à sa congénère ; si l'on écarte une aile du corps de l'animal, l'autre s'écarte aussi ; si on la porte en haut, l'autre s'élève. Certaines espèces, la Guêpe, par exemple, m'ont paru se prêter très-bien à cette expérience.

Toutefois, dans le vol captif, certains Insectes peuvent exécuter de grands mouvements de l'une de leurs ailes, tandis que l'autre n'exécute que de petites vibrations. La Mouche carnassière, par exemple, affecte ordinairement ce genre de vol alternatif ; rarement ses deux ailes se meuvent à la fois. La brusquerie et l'imprévu de ces alternatives, les déviations violentes qu'elles impriment à l'axe du corps de l'animal, m'ont empêché de recueillir le graphique simultané du mouvement des deux ailes et de savoir si, malgré l'inégale amplitude des mouvements, le synchronisme persiste dans ces conditions. Sauf cette exception, qui n'existe peut-être que dans les conditions artificielles où j'avais placé l'animal, les mouvements des deux ailes symétriques des Insectes m'ont toujours paru coïncider exactement entre eux.

DES DIFFÉRENTES POSITIONS QUE PREND L'AILE D'UN INSECTE A CHACUNE DE SES RÉVOLUTIONS PENDANT LE VOL. — Les figures que l'on vient de voir montrent la périodicité régulière des mouvements du vol de l'Insecte ; mais elles font voir aussi que le graphique ne saurait représenter la totalité du parcours de l'aile, car celle-ci ne saurait être tangente à une assez grande partie de la surface du cylindre. Quels que soient les mouvements que l'aile décrive, sa pointe se meut évidemment sur la surface d'une sphère qui aurait pour rayon la longueur de l'aile et dont le centre serait placé au point d'attache de cet organe avec le mésothorax. Or, une sphère ne peut être tangente qu'en un point avec une surface plane ou convexe ; aussi n'obtient-on,

pour une série de révolutions de l'aile, qu'une série de points, si le cylindre tournant n'est que tangent à la pointe de l'aile. Les graphiques plus compliqués ne sont obtenus que par des contacts plus étendus dans lesquels l'aile se plie et frotte par une partie de ses faces ou de ses bords.

Je dirai plus tard comment j'ai tiré parti de la méthode graphique pour déterminer les mouvements de l'aile ; mais je vais indiquer d'abord, pour la clarté de l'exposition, les résultats obtenus par une autre méthode.

1. *Méthode optique pour la détermination des mouvements de l'aile.* — Une fois bien convaincu de la périodicité régulière des mouvements de l'aile des Insectes, d'après les expériences précédentes, je pensai qu'on pouvait, par la vue, déterminer la nature du mouvement. En effet, si l'on pouvait attacher à l'extrémité de l'aile une paillette brillante, cette paillette, parcourant sans cesse les mêmes points de l'espace, laisserait une trace lumineuse qui devrait reproduire une figure régulière complète et dépourvue de la déformation que peut donner le frottement à la surface du cylindre. Cette méthode optique a du reste été déjà employée pour un usage analogue par Wheatstone qui, terminant par des boules métalliques brillantes des verges à vibrations complexes, obtenait des figures lumineuses variant avec les différentes combinaisons des mouvements vibratoires.

J'eus d'abord quelques difficultés à agglutiner à l'aile des Insectes des corps brillants, même très-légers ; la brusquerie des mouvements est telle qu'elle projetait au loin ces petites masses. Toutefois, je réussis à fixer au bout de l'aile des parcelles de cire à cacheter blanche, préalablement fondues sur une pointe d'aiguille ; le refroidissement de la cire est assez rapide pour que l'Insecte ne puisse pas décoller ce petit corps. La cire, par sa blancheur, fournit, lorsqu'on se place au soleil et sous une incidence convenable, une figure saisissable du mouvement de l'aile. Mais il faut avoir soin de ne mettre que très-peu de cire, sans quoi l'aile est trop chargée et n'exécute que des mouvements faibles ou très-déformés. Les images lumineuses sont encore plus nettes si l'on réussit à fixer, au moyen de vernis, une paillette

d'or battu à la pointe de l'aile. Dans ces conditions, j'obtins l'image représentée figure 4 :

Cette figure montre que la pointe de l'aile décrit un huit de chiffre très-allongé, parfois même l'aile semble se mouvoir absolument dans un plan, puis, l'instant d'après, on voit s'ouvrir davantage les boucles terminales qui forment le 8. Quand cette

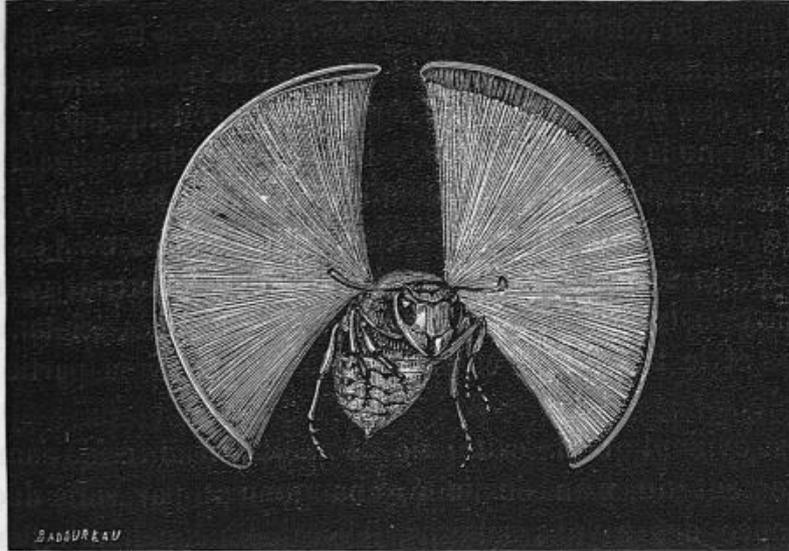


FIG. 4. — Aspect d'une Guêpe à laquelle on a doré l'extrémité des deux grandes ailes. L'animal est supposé placé dans un rayon de soleil.

ouverture devient plus large, en général une des boucles prédomine sur l'autre ; c'est parfois la boucle supérieure qui s'accroît et l'inférieure qui diminue, le plus souvent c'est l'inverse qui a lieu. Enfin, par une ouverture plus large encore, la figure se transforme quelquefois en une ellipse irrégulière, mais à l'extrémité de laquelle j'ai cru reconnaître un vestige de la seconde boucle.

Il m'a semblé que le type elliptique ne s'obtenait que lorsqu'on a trop chargé l'aile de l'Insecte. En effet, l'autre aile qui n'est pas chargée se meut, pendant ce temps, sans présenter une ouverture aussi large. En outre, ces figures elliptiques se produisent surtout quand l'Insecte fait de violents efforts de vol, ce que l'on provoque sur les *Macroglosses* par le contact des antennes ; chez les guêpes par la titillation des pattes, etc.

CHANGEMENTS DE PLAN DE L'AILE PENDANT LE VOL. — La figure lumineuse que donne, dans ses mouvements, l'aile dorée d'un Insecte, montre encore que pendant les mouvements alternatifs du vol, le plan de l'aile change d'inclinaison par rapport à l'axe du corps, et que la face supérieure de cette aile regarde un peu en arrière pendant la période d'ascension, tandis qu'elle regarde un peu en avant pendant la descente.

En effet, si l'on dore une grande étendue de la face supérieure de l'aile d'une Guêpe, en ayant soin que la dorure soit bien limitée à cette face, on voit que l'animal, placé dans un rayon de soleil, donne la figure du 8 avec une intensité très-inégale dans les deux moitiés de l'image, ainsi qu'on le voit figure 4. Le caractère d'imprimerie 8, ici représenté, donne une idée du phénomène qui se produit alors, si l'on considère le trait plein de ce caractère comme correspondant à la partie très-éclatante de l'image et le trait délié comme correspondant à la partie peu brillante.

Il est évident que la cause de ce phénomène réside dans un changement du plan de l'aile, changement par suite duquel l'incidence des rayons solaires, favorable pour leur réflexion pendant la période d'ascension, est défavorable pendant la descente. Si l'on retourne l'animal de façon à observer en sens inverse la figure lumineuse, le huit de chiffre présente en sens inverse l'inégal éclat de ses deux moitiés, devient brillant dans la portion qui tout à l'heure présentait peu d'éclat et réciproquement.

Nous trouverons plus loin, dans l'emploi de la méthode graphique, de nouvelles preuves de ces changements du plan de l'aile des Insectes pendant le vol. Ce changement de plan est d'une grande importance, car c'est en lui que réside la cause prochaine de la force motrice qui déplace le corps de l'animal.

2. *Méthode des contacts.* — Pour contrôler les expériences précédentes et pour m'assurer encore mieux de la réalité des déplacements de l'aile que la méthode optique rend perceptibles, j'ai introduit l'extrémité d'un petit poinçon dans l'intérieur des boucles du huit de chiffre dont je viens de parler, et j'ai constaté

que, dans l'intérieur de ces courbes, il existe réellement des espaces libres en forme d'entonnoirs, dans lesquels le poinçon pénètre sans rencontrer l'aile, tandis que si l'on veut franchir l'intersection où les lignes se croisent, l'aile vient aussitôt battre contre le poinçon et le vol est interrompu.

3. *Méthode graphique.* — Les expériences précédentes simplifient beaucoup l'interprétation des graphiques que l'on obtient par le frôlement de l'aile d'un Insecte contre le cylindre noirci, et bien que les figures ainsi obtenues soient incomplètes le plus souvent, on peut, avec leurs éléments épars, reconstituer la figure que la méthode optique nous a indiquée.

On remarque d'abord que, sans gêner sensiblement les mouvements du vol, on peut obtenir des graphiques de 7 à 8 millimètres de largeur quand l'aile est un peu longue. La flexion légère que subit l'aile lui permet de rester en contact avec le cylindre dans cette étendue; on obtient donc un graphique partiel du mouvement. Or, si l'on prend soin de produire le contact de l'aile avec le cylindre dans des points différents du parcours de l'organe, on obtient une série de graphiques partiels qui se complètent les uns les autres et qui permettent de déduire la forme qu'aurait le graphique complet d'une révolution alaire. Supposons que, dans la figure 4, la courbe décrite par l'aile dorée soit divisée par des lignes transversales en trois zones: l'une supérieure, formée par la boucle du haut; l'autre moyenne, comprenant l'entrecroisement des deux branches du 8 formant une sorte d'X; l'autre inférieure, comprenant la boucle du bas.



FIG. 5. — Graphique de la région moyenne du parcours de l'aile d'une Abeille, montrant l'entrecroisement des deux branches du 8. L'une des branches se prolonge assez bas, toutefois le graphique de la boucle inférieure n'a pas pu se produire.

En enregistrant les graphiques de la zone moyenne, on obtient des figures assez semblables entre elles et dans lesquelles

des lignes obliques se coupent entre elles. Il en est ainsi, dans la figure 5, région moyenne du graphique d'une Abeille, et dans la figure 6, région moyenne du graphique d'un Macroglosse du caille-lait.

Les graphiques de la zone supérieure de la révolution alaire sont analogues à celui de la figure 7, dans lesquels on voit bien les boucles supérieures du huit de chiffre.

Enfin, les graphiques de la zone qui correspond au parcours

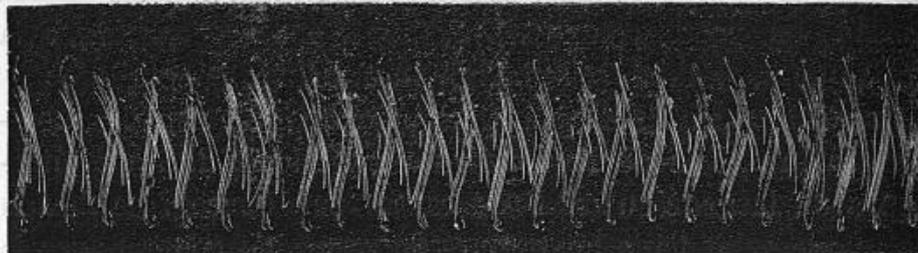


FIG. 6. — Graphique de la zone moyenne du parcours de l'aile d'un Macroglosse du caille-lait. Les traits multiples dont ce graphique est formé tiennent à ce que l'extrémité de l'aile est frangée et présente des pointes multiples.

inférieur de l'aile donnent également des boucles comme celles de la zone supérieure (la figure 8 en montre un spécimen), de sorte que le huit de chiffre peut se reconstruire par le rapprochement des trois fragments de son graphique successivement obtenus.

Si l'on pouvait recueillir tout entier, d'une seule fois, le tracé d'une aile d'insecte, on aurait donc une figure identique avec



FIG. 7. — Cette figure montre, dans le graphique d'une Guêpe, la boucle supérieure et toute l'étendue d'une des branches du 8. La partie moyenne de cette branche est seulement ponctuée à cause du faible frottement de l'aile.

celle que notre savant acousticien Kœnig a obtenue le premier avec une verge de Wheatstone accordée à l'octave, c'est-à-dire

décrivant un huit dans l'espace. Cette forme-type est représentée figure 8.

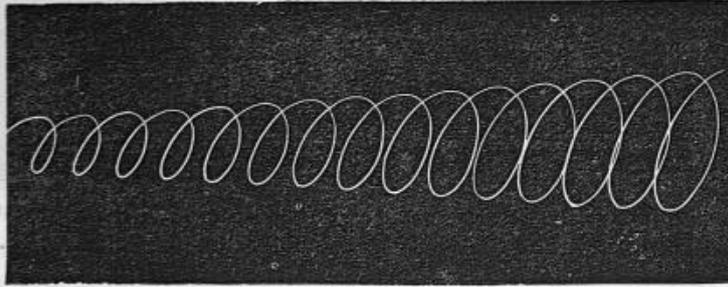


FIG. 8. — Graphique d'une verge de Wheatstone accordée à l'octave, c'est-à-dire vibrant deux fois transversalement pour chaque vibration longitudinale (figure obtenue par la méthode de R. Kœnig).

On va voir que la méthode graphique se prête à d'autres expériences destinées à vérifier celles que nous avons déjà passées en revue. En faisant varier l'incidence de l'aile sur le cylindre tournant, on peut prévoir à l'avance quel sera le graphique obtenu si l'aile décrit réellement un huit de chiffre, et, si la figure

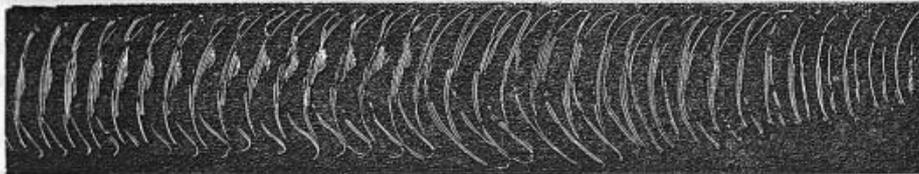


FIG. 9. — Graphique de l'aile d'une Guêpe; on y voit nettement plusieurs des boucles inférieures. (Ce graphique est obtenu en tenant l'Insecte de façon à frotter le cylindre par la partie postérieure de la pointe de l'aile, ce qui donne des courbes très-étendues.)

tracée par l'Insecte volant dans ces différentes attitudes est conforme aux prévisions, on aura une démonstration nouvelle de la réalité de ce mouvement.

Supposons que l'aile de l'Insecte, au lieu de toucher le cylindre par sa pointe, comme nous l'avons vu tout à l'heure, le touche par un de ses bords, et admettons pour un instant que le huit de chiffre décrit par l'aile soit tellement allongé qu'il s'écarte très-peu du plan qui passerait par l'axe vertical de cette figure; alors, pour peu que nous pressions l'aile contre le cylindre, le

contact sera constant et le graphique non interrompu; mais la figure obtenue ne sera plus celle du 8; ce sera, si le cylindre est

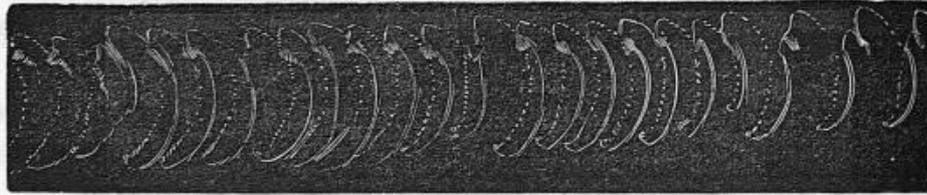


FIG. 10. — Graphique obtenu avec l'aile d'une Abeille oscillant dans un plan sensiblement tangent à la génératrice du cylindre de l'enregistreur.

immobile, un arc de cercle dont la concavité sera tournée du côté du point d'implantation de l'aile, point qui occupera précisément le centre de la courbe décrite. Si le cylindre tourne, la

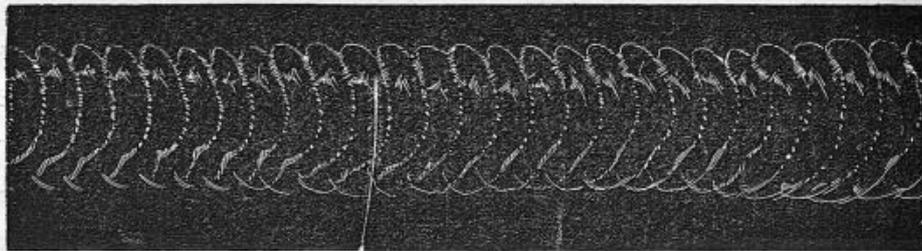


FIG. 11. — Graphique d'une Abeille avec un peu d'inclinaison du plan d'oscillation de l'aile avec la surface du cylindre; le contact est moins parfait que dans la figure précédente. On voit ici la transition qui conduit à la figure 7.

figure se déploiera comme le fait l'oscillation d'un diapason enregistrée dans les mêmes conditions, et l'on obtiendra un graphique plus ou moins approché de celui qui est représenté figures 10 et 11. Cette forme, que la théorie faisait prévoir, se retrouve toutes les fois que le plan dans lequel l'aile se meut est rendu tangent à la génératrice du cylindre.

En examinant ces graphiques, il est facile d'y reconnaître des *changements dans l'épaisseur du trait*, des parties qui semblent faites par une friction plus ou moins forte de l'aile sur le cylindre; c'est la preuve nouvelle de l'existence du mouvement en huit de chiffre, ainsi qu'on le verra plus loin.

Pour dissiper tous les doutes sur la signification des tracés et pour prouver que c'est bien un mouvement en huit de chiffre qui les engendre, nous pouvons recourir à une autre méthode

et reproduire synthétiquement ce tracé avec une verge vibrante semblable à celle qui a donné la figure 8.

Prenons une verge de Wheatstone accordée à l'octave; munissons-la d'une aile d'Insecte en guise de style et traçons sur un



FIG. 12. — Graphique d'une Guêpe; on a orienté l'animal de façon que son aile touche le cylindre par sa pointe et trace surtout la boucle supérieure du 8.

cylindre les vibrations qu'elle exécute. Nous obtiendrons, si le cylindre est immobile, des figures en 8 lorsque l'aile le touche par sa pointe perpendiculairement appliquée sur sa surface et si le cylindre tourne, on aura des 8 déployés.

On peut, avec une verge accordée à l'octave, obtenir des gra-



FIG. 13. — Graphique d'une verge de Wheatstone accordée à l'octave et orientée de manière à enregistrer surtout la boucle supérieure du 8.

phiques identiques avec ceux que donne l'Insecte, ainsi qu'on en jugera par la comparaison des figures 12 et 13.

Il me semble suffisamment établi que dans les grands mouvements du vol, l'aile des Insectes que j'ai eu l'occasion d'étudier décrit dans l'espace un huit de chiffre. De plus nous avons vu, à l'inspection de la figure lumineuse que laisse dans son parcours une aile dont la pointe est dorée, que les périodes d'ascension et de descente de l'aile s'accompagnent de changement du plan de cet organe. On peut trouver dans l'emploi de la méthode graphique une nouvelle preuve de l'existence de ces changements de plan.

Supposons qu'on tienne l'Insecte de telle sorte que ce ne soit plus la pointe, mais le bord de son aile qui frotte sur le cylindre, en d'autres termes, rendons le plan d'oscillation de l'aile parallèle à la génératrice du cylindre. Un nouveau phénomène se produira : ce ne sera plus telle ou telle partie du huit de chiffre

qui viendra s'écrire, mais il se fera, à chaque révolution de l'aile, deux contacts, au moment où les boucles du huit présenteront leur convexité au cylindre. Ces contacts seront alternants, et si l'Insecte est un peu éloigné du cylindre, on verra, entre les contacts supérieurs et inférieurs, un intervalle où le papier n'aura pas subi le frottement de l'aile.

C'est dans ces conditions qu'a été obtenue la figure 14. On y voit en outre que ce n'est pas la même face de l'aile qui a frotté sur le cylindre en haut et en bas. Il est évident que les traits de la moitié supérieure, formés chacun d'une série de hachure, sont produits par le contact d'un bord frangé, tandis que les contacts de la partie inférieure sont produits par une autre partie de l'aile qui présente une région dépourvue de franges, et laisse une trace plus blanche à contours mieux définis.

Ces changements de plan n'existent que dans les grands mouvements de l'aile. C'est un fait important à signaler, car il nous

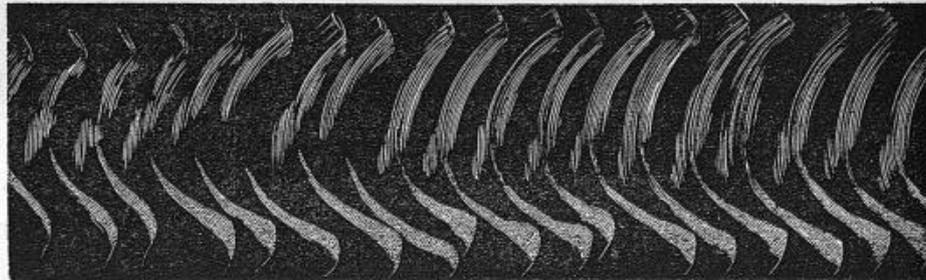


FIG. 14. — Graphique du Macroglosse du caille-lait. L'aile se meut sensiblement dans un plan tangent à la génératrice du cylindre, et l'intermittence des contacts est évidente.

mettra sur la voie du mécanisme de leur production. La figure 15 est fournie comme la figure 14 par les mouvements de l'aile



FIG. 15. Graphique de l'aile d'un Macroglosse fatigué. On n'y voit plus la forme en 8, mais une simple oscillation pendulaire.

d'un Macroglosse ; mais, par l'effet de la fatigue, ces mouvements avaient perdu presque toute leur amplitude.

On ne voit, dans cette figure, qu'une série d'oscillations pendulaires indiquant que l'aile ne fait que s'élever et s'abaisser sans changer de plan. La ligne brillante qui borde les parties ascendantes et supérieures de ces courbes s'explique par les flexions alternatives de l'aile qui frotte contre le papier; elle montre que la face supérieure présentait une aspérité qui laissait une trace prononcée, tandis que la face inférieure ne présentait pas d'aspérité semblable.

## CHAPITRE II.

Détermination du sens des mouvements de l'aile de l'Insecte. — Théorie des mouvements de l'aile. — De l'action propulsive des ailes de l'Insecte. — Reproduction schématique du vol de l'Insecte.

Il manque encore un élément très-important pour avoir la connaissance complète des mouvements que l'aile de l'Insecte exécute pendant le vol. En effet, la méthode optique, en nous montrant tous les points du parcours de l'aile dont la pointe est dorée, ne nous indique pas dans quel sens se fait ce parcours; quel que soit le sens dans lequel l'aile se meuve dans son orbite, la figure lumineuse qu'elle fournit doit toujours être la même.

Un moyen très-simple m'a fourni la solution de cette nouvelle question; voici en quoi il consiste :

Soit (fig. 16) l'image lumineuse que fournissent les mouve-

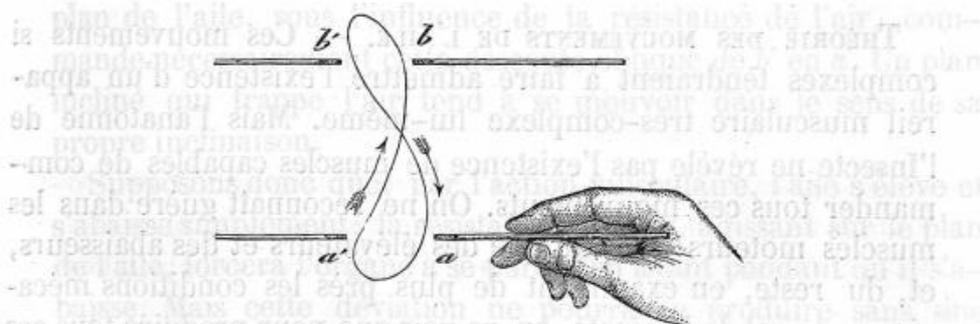


FIG. 16. — Détermination du sens des mouvements de l'aile d'un Insecte.

ments de l'aile droite d'un Insecte. Des flèches indiquent le sens dans lequel s'exécutent ces mouvements que l'œil ne peut

suivre. On prend une petite baguette de verre poli et on la noircit à la fumée d'une bougie; puis, tenant cette baguette perpendiculairement au plan dans lequel l'aile se meut, on en présente la pointe noircie en  $a$ , c'est-à-dire en avant de la boucle inférieure. On tâche de faire pénétrer cette pointe dans l'intérieur du parcours alaire; mais dès qu'elle pénètre dans cette région, la baguette reçoit une série de chocs de l'aile qui frotte à sa surface et enlève le noir qui la recouvrait. En examinant la pointe de verre, on voit que le noir a été essuyé à sa partie supérieure seulement, ce qui montre qu'au point  $a$  de son parcours l'aile est descendante. La même expérience étant répétée en  $a'$ , c'est-à-dire à la partie postérieure du parcours alaire, on trouve que la baguette a été frottée par en bas, c'est-à-dire qu'en  $a'$  l'aile était ascendante. On peut constater de la même façon que l'aile remonte aussi en  $b$  et descend en  $b'$ .

Nous connaissons maintenant tous les mouvements que l'aile d'un Insecte exécute dans son parcours, ainsi que le double changement de plan qui les accompagne. La connaissance de ce changement de plan nous a été donnée par l'inégal éclat des deux branches du 8 lumineux. Or on peut s'assurer que dans le parcours de l'aile descendante, c'est-à-dire de  $b'$  en  $a$  dans la figure 16, la face supérieure de l'aile regarde un peu en avant, tandis que de  $a'$  en  $b$ , c'est-à-dire dans la remontée, cette face regarde un peu en arrière.

**THÉORIE DES MOUVEMENTS DE L'AILE.** — Ces mouvements si complexes tendraient à faire admettre l'existence d'un appareil musculaire très-complexe lui-même. Mais l'anatomie de l'Insecte ne révèle pas l'existence de muscles capables de commander tous ces mouvements. On ne reconnaît guère dans les muscles moteurs de l'aile que des élevateurs et des abaisseurs, et, du reste, en examinant de plus près les conditions mécaniques du vol de l'Insecte, on va voir que pour produire tous ces actes successifs si bien coordonnés, il suffit d'un va-et-vient alternatif imprimé par les muscles; la résistance de l'air entraîne tous les autres mouvements.

Si l'on arrache l'aile d'un Insecte, et, si la tenant par l'espèce de pédicule qui l'attache au thorax, on la soumet à un courant d'air, on voit que le plan de l'aile s'incline d'autant plus que l'on souffle avec plus de force. La nervure antérieure de l'aile résiste, tandis que le voile membraneux qui la prolonge en arrière fléchit à cause de sa plus grande souplesse. En soufflant sur la face supérieure de l'aile, on voit cette face se porter en arrière, tandis qu'en soufflant par dessous, on tourne cette face en avant.

N'est-il pas clair que dans les mouvements de l'aile pendant le vol, la résistance de l'air produira sur ce plan flexible les mêmes effets que les courants d'air que nous venons d'employer tout à l'heure? Du reste, les changements de plan que produirait dans ces conditions la résistance de l'air sont précisément ceux que l'on observe pendant le vol. Nous avons vu, en effet, que l'aile descendante présente sa face antérieure en avant, ce qui s'explique par la résistance de l'air agissant de bas en haut et que l'aile ascendante tourne sa face supérieure en arrière, ce qui tient à ce que la résistance de l'air agit alors de haut en bas.

Il n'est donc pas besoin d'admettre des actes musculaires spéciaux pour opérer les changements de plan de l'aile; ceux-ci, à leur tour, vont nous donner la clef des mouvements obliques et curvilignes qui produisent le parcours en huit de chiffre suivi par l'aile de l'Insecte.

Reportons-nous à la figure 16; l'aile descendante se porte en même temps d'arrière en avant. Or l'inclinaison que prend le plan de l'aile, sous l'influence de la résistance de l'air, commande nécessairement cette descente oblique de  $b'$  en  $a$ . Un plan incliné qui frappe l'air tend à se mouvoir dans le sens de sa propre inclinaison.

Supposons donc que, par l'action musculaire, l'aile s'élève et s'abaisse simplement; la résistance de l'air, agissant sur le plan de l'aile, forcera l'organe à se porter en avant pendant qu'il s'abaisse. Mais cette déviation ne pourra se produire sans une flexion légère subie par la nervure. D'autre part, la force qui dévie l'aile en avant devra nécessairement varier en intensité suivant la vitesse avec laquelle l'organe s'abaisse. Aussi, lors-

qu'à la fin de sa course descendante l'aile s'abaissera d'un mouvement plus lent, on devra voir la nervure, moins énergiquement déviée, ramener l'aile en arrière d'un mouvement curviligne. Ainsi s'explique naturellement la formation de la branche descendante du huit de chiffre parcouru par l'aile.

La même théorie s'applique à la formation de la branche ascendante de cette figure. En somme, une sorte d'oscillation pendulaire exécutée par la nervure de l'aile suffit, avec la résistance de l'air, pour engendrer tous les mouvements que l'observation révèle.

**DE L'ACTION PROPULSIVE DES AILES DE L'INSECTE. —** Les mouvements que je viens de décrire constituent l'essence même du mécanisme du vol chez les Insectes. Chaque coup d'aile frappe l'air obliquement et décompose la résistance de ce fluide de telle sorte qu'il résulte une composante horizontale qui pousse l'Insecte en avant. Cette composante se produit dans la descente de l'aile aussi bien que dans son élévation, de telle sorte que les deux temps de l'oscillation de l'aile ont une action également favorable à la propulsion de l'animal.

Il se produit un effet analogue à celui qu'on obtient dans l'eau par les mouvements de la godille. Chaque coup de cette rame qui présente un plan incliné à la résistance de l'eau, décompose cette résistance en deux forces, l'une qui agit en sens contraire du mouvement de la rame, l'autre dont la direction est perpendiculaire de celle de ce mouvement, c'est celle-ci qui pousse le bateau.

La plupart des propulseurs qui agissent dans l'eau utilisent ainsi la décomposition de la résistance du fluide par le mouvement d'un plan incliné. La queue des Poissons produit une propulsion de ce genre, celle du Castor agit de même, avec cette différence qu'elle oscille dans un plan vertical. L'hélice elle-même peut être considérée comme un plan incliné dont le mouvement serait continu et toujours de même sens.

**REPRODUCTION SCHEMATIQUE DU VOL DES INSECTES. — POUR**

rendre plus saisissable l'action de l'aile de l'Insecte et les effets de la résistance de l'air, voici l'appareil que j'ai construit. Soit,

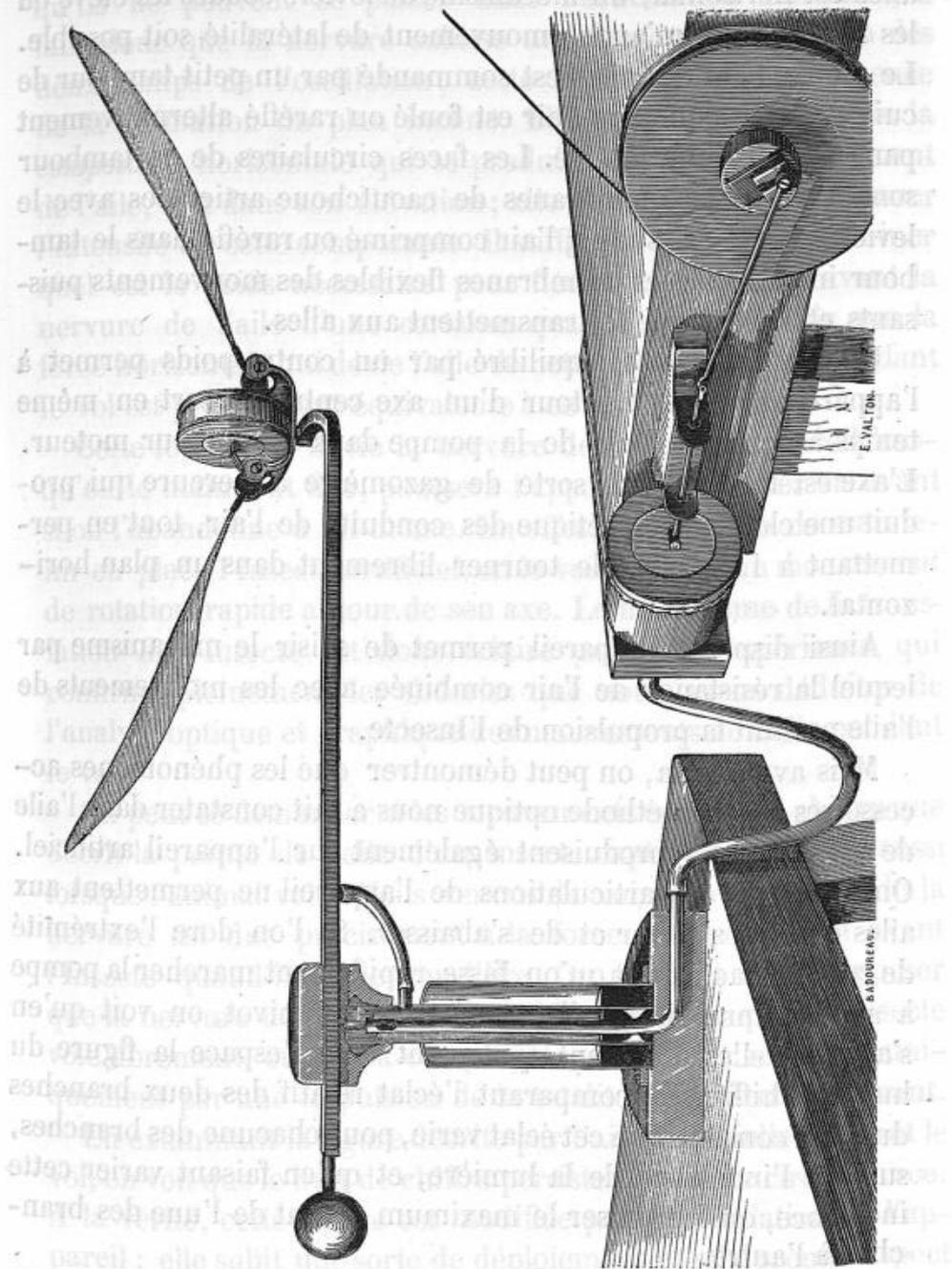


FIG. 17. — Insecte artificiel ou schéma du vol des Insectes.

figure 17, deux ailes artificielles composées d'une nervure

rigide terminée en arrière par un voile flexible formé de baudruche que soutiennent de fines nervures d'acier; le plan de ces ailes est horizontal; un mécanisme de leviers coudés les élève ou les abaisse sans qu'aucun mouvement de latéralité soit possible. Le mouvement des ailes est commandé par un petit tambour de cuivre dans lequel de l'air est foulé ou raréfié alternativement par l'action d'une pompe. Les faces circulaires de ce tambour sont formées de membranes de caoutchouc articulées avec le levier qui meut les ailes; l'air comprimé ou raréfié dans le tambour imprime à ces membranes flexibles des mouvements puissants et rapides qui se transmettent aux ailes.

Un tube horizontal équilibré par un contre-poids permet à l'appareil de pivoter autour d'un axe central et sert en même temps à conduire l'air de la pompe dans le tambour moteur. L'axe est formé d'une sorte de gazomètre à mercure qui produit une clôture hermétique des conduits de l'air, tout en permettant à l'appareil de tourner librement dans un plan horizontal.

Ainsi disposé, l'appareil permet de saisir le mécanisme par lequel la résistance de l'air combinée avec les mouvements de l'aile produit la propulsion de l'Insecte.

Mais avant cela, on peut démontrer que les phénomènes accessoires que la méthode optique nous a fait constater dans l'aile de l'Insecte se reproduisent également sur l'appareil artificiel. On a vu que les articulations de l'appareil ne permettent aux ailes que de s'élever et de s'abaisser. Si l'on dore l'extrémité de ces ailes factices et qu'on fasse rapidement marcher la pompe à air en immobilisant l'appareil sur son pivot, on voit qu'en s'agitant, elles décrivent également dans l'espace la figure du huit de chiffre. En comparant l'éclat relatif des deux branches du 8, on constate que cet éclat varie, pour chacune des branches, suivant l'incidence de la lumière, et qu'en faisant varier cette incidence, on fait passer le maximum d'éclat de l'une des branches à l'autre.

Que se passe-t-il donc pour produire ces phénomènes? Le changement de plan de l'aile artificielle s'explique par l'effet de

la résistance de l'air agissant sur la partie flexible de l'aile artificielle. Quant aux mouvements de latéralité, nous avons vu qu'ils ne peuvent se passer dans l'articulation de l'aile; il faut donc que la nervure subisse une flexion dans chacun des deux temps de l'oscillation; cette flexion est la conséquence de la formation du plan incliné. Elle montre l'existence de la *composante* horizontale qui se produit, soit dans l'abaissement de l'aile, soit dans son élévation; elle permet même de mesurer l'intensité de cette composante. Il suffit, en effet, de déterminer quel est le poids nécessaire pour fléchir et dévier en avant la nervure de l'aile d'une certaine quantité, pour savoir que la force horizontale qui dévie l'aile de cette même quantité pendant le vol est précisément équivalente à ce poids.

Cette force, qui dévie la nervure de l'aile de l'appareil lorsqu'on le maintient fixe, poussera l'appareil tout entier en avant si on l'abandonne à lui-même. En effet, si l'on cesse de maintenir en place l'Insecte artificiel, on le voit prendre un mouvement de rotation rapide autour de son axe. Le mécanisme de la translation de l'Insecte est donc éclairé par cette expérience qui confirme pleinement les théories que nous avons déduites de l'analyse optique et graphique des mouvements de l'aile pendant le vol.

On peut se demander si les mouvements en huit de chiffre que décrit la pointe de l'aile d'un Insecte captif se produisent aussi lorsque l'animal vole. Nous venons de voir que la flexion de la nervure est due précisément à la force qui pousse en avant l'Insecte quand il est devenu libre. On pourrait donc supposer que la nervure de l'aile ne cède pas à cette force quand l'Insecte vole librement, et que la composante horizontale se traduit uniquement par une impulsion de la totalité de l'Insecte en avant.

En examinant la figure décrite par l'aile artificielle pendant le vol, on voit que le huit de chiffre persiste dans cette circonstance. A la vérité, cette figure est modifiée par la translation de l'appareil; elle subit une sorte de déploiement et elle prend l'aspect du huit de chiffre enregistré sur un cylindre tournant, mais elle ne se réduit pas à une simple courbe pendulaire, ce qui arrive-

rait si la nervure restait toujours rigide. On comprend qu'il en soit ainsi à cause de l'inertie de l'appareil qui ne peut subir les mouvements variables que chaque coup d'aile tend à lui imprimer. L'appareil, une fois en mouvement, est tantôt en avance, tantôt en retard sur la force horizontale que développent ses ailes; c'est pourquoi la nervure alaire est obligée de s'infléchir, car la masse à mouvoir ne peut obéir instantanément à la composante horizontale que l'aile emprunte à la résistance de l'air. Le même phénomène doit se passer dans le vol d'un Insecte véritable.

L'appareil schématique dont on vient de voir la description ne donne pas encore une idée exacte du mécanisme du vol de l'Insecte. J'ai dû, pour la facilité de la description des mouvements de l'aile, supposer que son oscillation se fait de haut en bas, c'est-à-dire du dos au ventre de l'animal couché horizontalement sur l'air. Mais il suffit d'observer le vol de certains Insectes, la Mouche commune, par exemple, et la plupart des autres Diptères, pour voir que le plan dans lequel se meuvent les ailes n'est point vertical, mais au contraire très-voisin de l'horizontalité. Ce plan présente un peu sa face supérieure en avant; or, à cette face supérieure répond la nervure de l'aile. C'est donc de bas en haut et un peu en avant que s'exercera la propulsion de l'Insecte. La plus grande partie de la force déployée par l'aile aura pour effet de soutenir l'animal contre l'action de la pesanteur; le reste de cette force le portera en avant.

En changeant l'inclinaison du plan d'oscillation de ses ailes, ce qui peut se faire par des mouvements de l'abdomen qui déplacent le centre de gravité, l'Insecte pourra, suivant le besoin, augmenter sa tendance à voler en avant, perdre la vitesse acquise et rétrograder, ou enfin, se jeter de côté.

Il est facile de voir, quand un Hyménoptère volant à toute vitesse s'arrête sur une fleur, que cet Insecte porte fortement le plan d'oscillation de ses ailes en arrière.

Rien de plus variable, du reste, que l'inclinaison du plan dans lequel les ailes oscillent chez les différentes espèces d'Insectes. Les Diptères m'ont paru avoir ce plan d'oscillation très-voisin de

l'horizontalité ; chez les Hyménoptères, l'aile se meut dans un plan plus voisin de 45 degrés ; enfin les Lépidoptères battent des ailes presque verticalement à la manière des Oiseaux.

Pour rendre saisissable cette influence du plan d'oscillation des ailes et pour montrer que la force empruntée à la résistance de l'air a le double effet de soulever l'Insecte et de le diriger, il faut donner au *schéma* une disposition particulière. Il faut d'abord pouvoir changer le plan d'oscillation des ailes de l'Insecte, ce qui s'obtient par un pivotement du tambour à l'extrémité du tube horizontal au bout duquel il tourne. Enfin, pour rendre sensible la force ascensionnelle qui se développe dans cette nouvelle condition, il faut que l'appareil ne se borne plus à un simple mouvement de rotation dans le plan horizontal, mais qu'il puisse osciller dans le plan vertical comme le ferait le fléau d'une balance.

La figure 18 montre la disposition nouvelle que j'ai donnée à l'appareil pour obtenir ce double résultat.

Dans cet appareil, la pompe à air qui constitue la force motrice est conservée ; il en est de même de la colonne tournante qui pivote sur le gazomètre à mercure. Mais au-dessus du disque qui termine en haut cette colonne, est établie une articulation nouvelle qui permet au tube horizontal équilibré au bout duquel est l'Insecte artificiel, d'osciller dans le plan vertical comme le fléau d'une balance. Pour établir la communication entre la colonne tournante et le tube qui porte l'Insecte, je me sers d'un petit tube de caoutchouc assez flexible pour ne gêner en rien les mouvements oscillatoires de l'appareil.

D'autres modifications tout à fait accessoires se voient encore dans la figure 18 : l'une consiste dans l'emploi d'un tube de verre pour conduire l'air de la pompe motrice à l'Insecte ; l'autre consiste en un changement du mécanisme qui fait mouvoir les ailes. La modification la plus importante est l'existence d'une articulation qui permet de donner au plan d'oscillation des ailes toutes les inclinaisons possibles.

L'appareil étant disposé de telle sorte que le contre-poids, assez rapproché du centre, ne fasse pas équilibre au poids de

l'Insecte et du tube de verre qui le supporte, on oriente l'appareil de façon que les ailes se meuvent dans un plan horizontal, la nervure étant en haut. Alors, toute la force motrice est dirigée de bas en haut, et dès que la pompe marche, on voit l'Insecte s'élever verticalement. On peut estimer facilement le poids soulevé par les battements des ailes, et comme, en déplaçant le contre-poids, on fait varier à volonté le poids de l'Insecte, on peut déterminer l'effort développé suivant la fréquence ou l'amplitude du mouvement des ailes.

En faisant faire un demi-tour à l'Insecte, de façon que ses ailes oscillant toujours dans un plan horizontal tournent leurs nervures en bas, on développe une force verticale descendante qu'on estime en éloignant plus ou moins le contre-poids et en faisant soulever ce contre-poids par la descente de l'Insecte.

Si l'on oriente le plan d'oscillation des ailes verticalement, l'Insecte tourne horizontalement autour de son support de la même façon que dans l'appareil décrit précédemment et représenté figure 17.

Enfin, si l'on donne au plan d'oscillation des ailes la position oblique qu'il présente chez la plupart des insectes véritables, c'est-à-dire si la nervure regarde à la fois en haut et un peu en avant, on voit l'Insecte se soulever malgré l'insuffisance du contre-poids et tourner en même temps autour de l'axe vertical; c'est-à-dire que l'appareil présente le double effet qu'on observe chez un véritable Insecte qui vole, trouvant à la fois dans le battement de ses ailes la force qui le soutient contre la pesanteur et celle qui le dirige dans l'espace.

De ces deux forces, la première est de beaucoup la plus considérable : aussi, lorsqu'un Insecte plane sur une fleur et qu'on l'observe obliquement éclairé par le soleil couchant, peut-on constater que le plan d'oscillation de ses ailes est presque horizontal. L'inclinaison doit évidemment se modifier dès que l'Insecte veut se porter rapidement dans une direction quelconque, mais alors l'œil ne peut plus guère le suivre et constater ce changement de plan dont la théorie et les expériences ci-dessus indiquées autorisent à admettre l'existence.

Un point curieux de l'histoire du vol des Insectes serait l'é-

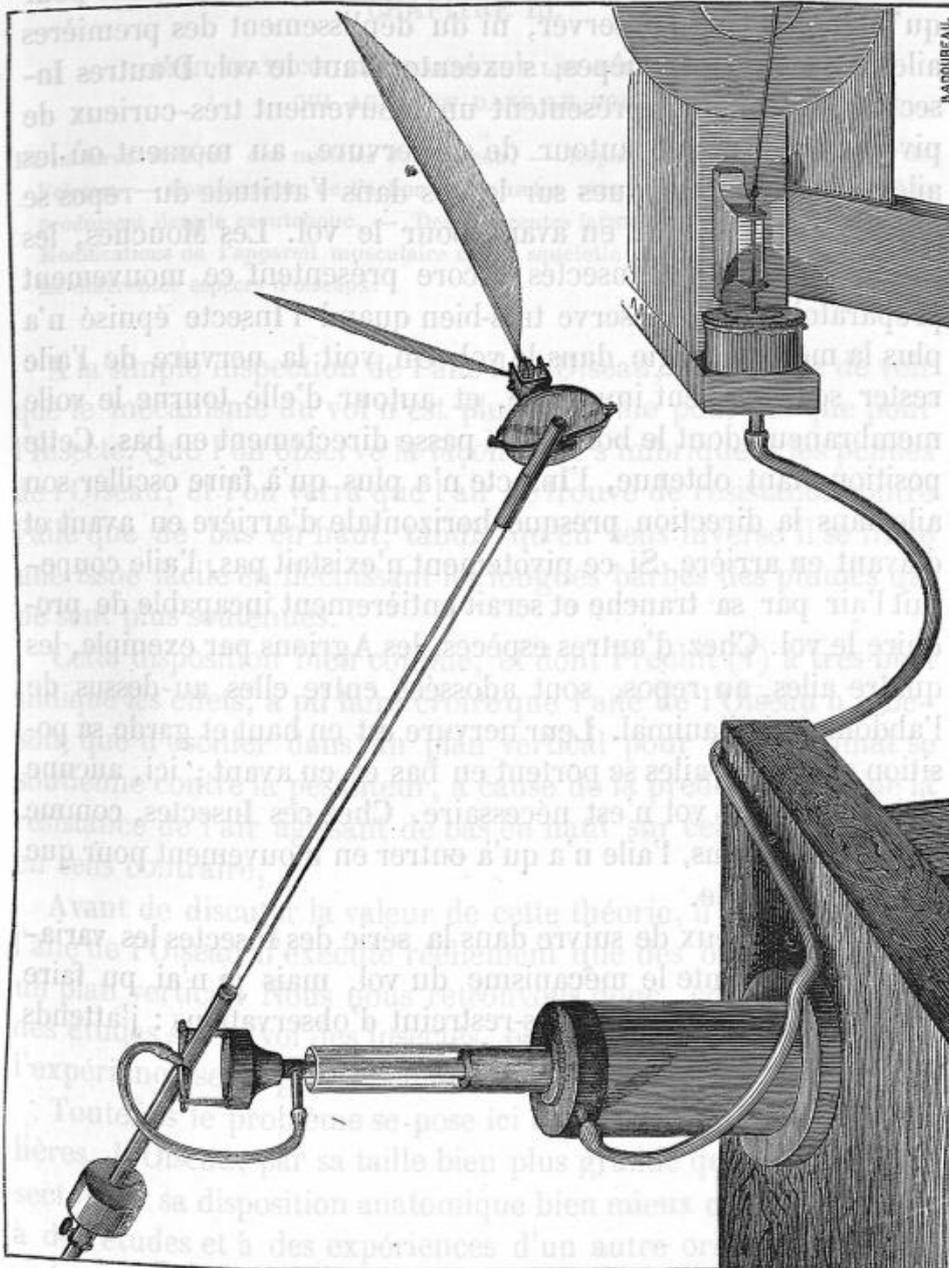


FIG. 18. — Schéma permettant de rendre sensible la force ascensionnelle développée par l'Insecte.

tude des mouvements préparatoires au vol. Je ne parle pas seu-

5<sup>e</sup> série, Zool., T. XII, Cahier n° 2.

lement du déploiement des ailes que les Coléoptères exécutent avant de s'envoler, mouvement qui est parfois assez lent pour qu'on puisse bien l'observer, ni du déplissement des premières ailes qui, chez les Guêpes, s'exécute avant le vol. D'autres Insectes, les Diptères, présentent un mouvement très-curieux de pivotement de l'aile autour de sa nervure, au moment où les ailes qui étaient étendues sur le dos dans l'attitude du repos se portent en dehors et en avant pour le vol. Les Mouches, les Tipules et d'autres Insectes encore présentent ce mouvement préparatoire qui s'observe très-bien quand l'Insecte épuisé n'a plus la même énergie dans le vol. On voit la nervure de l'aile rester sensiblement immobile, et autour d'elle tourne le voile membraneux dont le bord libre passe directement en bas. Cette position étant obtenue, l'Insecte n'a plus qu'à faire osciller son aile dans la direction presque horizontale d'arrière en avant et d'avant en arrière. Si ce pivotement n'existait pas, l'aile couperait l'air par sa tranche et serait entièrement incapable de produire le vol. Chez d'autres espèces, les Agrions par exemple, les quatre ailes, au repos, sont adossées entre elles au-dessus de l'abdomen de l'animal. Leur nervure est en haut et garde sa position quand les ailes se portent en bas et en avant ; ici, aucune préparation au vol n'est nécessaire. Chez ces Insectes, comme chez les Papillons, l'aile n'a qu'à entrer en mouvement pour que l'animal s'envole.

Il serait curieux de suivre dans la série des Insectes les variations que présente le mécanisme du vol, mais je n'ai pu faire jusqu'ici qu'un nombre très-restreint d'observations : j'attends l'occasion de les compléter.

## CHAPITRE III.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES FORCES MOTRICES  
QUI AGISSENT DANS LE VOL.

De la force statique des muscles de l'oiseau. — Rapidité d'action des muscles de l'oiseau. — Comparaison de l'action des muscles avec certains phénomènes qui se produisent dans le caoutchouc. — Des différentes formes du travail musculaire. — Modifications de l'appareil musculaire et du squelette suivant le type du vol, chez les différentes espèces d'oiseaux.

A la simple inspection de l'aile de l'Oiseau, il est facile de voir que le mécanisme du vol n'est plus le même pour lui que pour l'Insecte. Que l'on observe la façon dont s'imbriquent les plumes de l'Oiseau, et l'on verra que l'air ne trouve de résistance contre l'aile que de bas en haut, tandis qu'en sens inverse il se fraye une issue facile en fléchissant les longues barbes des plumes qui ne sont plus soutenues.

Cette disposition bien connue, et dont Prechtl (1) a très-bien indiqué les effets, a pu faire croire que l'aile de l'Oiseau n'a besoin que d'osciller dans un plan vertical pour que l'animal se soutienne contre la pesanteur, à cause de la prédominance de la résistance de l'air agissant de bas en haut sur celle qui s'exerce en sens contraire.

Avant de discuter la valeur de cette théorie, il faudrait voir si l'aile de l'Oiseau n'exécute réellement que des oscillations dans un plan vertical. Nous nous retrouvons donc, comme au début des études sur le vol des Insectes, en présence de questions que l'expérience seule peut résoudre.

Toutefois le problème se pose ici dans des conditions particulières. L'Oiseau, par sa taille bien plus grande que celle de l'Insecte, par sa disposition anatomique bien mieux connue, se prête à des études et à des expériences d'un autre ordre. J'étudierai autant qu'il sera possible la nature de la force musculaire de l'Oiseau et l'influence qu'exercent sur le vol la disposition parti-

(1) *Untersuchungen über den Flug der Vögel*, in-8°. Wien, 1846.

5<sup>e</sup> série, Zool., T. XII. (Cahier n° 2.) <sup>2</sup>

culière de ses muscles et la forme de ses ailes. Les méthodes de myographie, dont l'emploi rend si facile l'analyse des différentes formes du mouvement produit par les muscles, seront, dans ces recherches, d'un précieux emploi.

L'anatomie comparée nous montre, dans l'aile des Oiseaux, l'analogue du membre antérieur des Mammifères. Réduite à son squelette, l'aile présente, comme le bras humain, l'humérus, les deux os de l'avant-bras et une main rudimentaire dans laquelle on retrouve encore des métacarpiens et des phalanges. Les muscles aussi offrent de nombreuses analogies avec ceux du membre antérieur de l'homme; de part et d'autre, quelques-uns ont une telle analogie d'aspect et de fonctions qu'on a pu les désigner sous la même dénomination. En somme, chez l'Oiseau, les muscles les plus développés sont ceux qui ont pour action d'étendre ou de fléchir la main sur l'avant-bras, l'avant-bras sur l'humérus, et enfin de mouvoir l'humérus, c'est-à-dire le bras tout entier, autour de l'articulation de l'épaule.

Chez la plupart des Oiseaux, surtout chez les grandes espèces, l'aile semble rester toujours étendue pendant le vol. Ainsi les muscles extenseurs des différentes pièces de l'aile serviraient à donner à cet organe la position nécessaire pour que le vol soit possible, et à le maintenir dans cette position, tandis que le travail moteur serait exécuté par d'autres muscles beaucoup plus forts que les précédents, les muscles pectoraux.

Toute la face antérieure du thorax est occupée, chez l'Oiseau, par des masses musculaires puissantes, et surtout par un grand muscle qui, d'après ses attaches au sternum, aux côtes et à l'humérus, se montre évidemment l'analogue du grand pectoral de l'homme et des mammifères; son rôle est visiblement d'abaisser l'aile avec force et rapidité, et de prendre sur l'air le point d'appui nécessaire à soutenir ainsi qu'à mouvoir toute la masse de l'Oiseau. Au-dessous du grand pectoral, se trouve le pectoral moyen; sans analogue chez les autres espèces animales, ce muscle a pour action de relever l'aile. Enfin, extérieurement, le petit pectoral se porte du sternum à l'humérus; c'est un accessoire du grand pectoral.

Chacun sait que la force d'un muscle est proportionnelle au volume de cet organe ; aussi, en voyant que les muscles pectoraux représentent chez l'Oiseau  $1/6^e$  environ du poids total de l'animal, comprend-on tout de suite que c'est à ces puissants organes qu'est dévolu le rôle principal dans l'acte du vol.

Borelli a voulu déduire du volume de ces muscles la force dont ils sont capables; il a cru pouvoir conclure que la force que l'Oiseau emploie pour voler égale 10 000 fois son poids. Je ne réfuterai point l'erreur de Borelli que tant d'autres se sont chargés de combattre, cherchant à substituer aux évaluations du physiologiste italien des chiffres dont l'exactitude ne serait guère plus facile à prouver. Les contradictions si grandes qui existent entre les estimations de la force musculaire des Oiseaux tiennent à ce que ces tentatives de mesures étaient prématurées.

Si l'on voulait aujourd'hui faire une évaluation réelle du travail développé par l'Oiseau pendant le vol, il faudrait avant tout demander à l'expérimentation physiologique les données complètes du problème. Cette mesure suppose la connaissance des mouvements de l'aile avec leur forme, leur étendue et leur vitesse à chaque instant ; elle suppose également connus l'étendue de la surface de l'aile, sa courbure et l'angle sous lequel elle frappe l'air. Ce problème sera peut-être le dernier dont nous puissions espérer la solution ; mais nous pouvons dès maintenant étudier, à d'autres points de vue, la force des muscles de l'Oiseau, et apprécier quelques-uns des caractères avec lesquels elle se manifeste.

On peut d'abord obtenir expérimentalement une mesure de l'effort maximum que puissent développer les muscles de l'Oiseau. Cette mesure pourra bien ne pas correspondre à l'effort réel qui est développé dans le vol, mais elle nous empêchera de tomber dans l'exagération qui ferait attribuer à ces muscles une force supérieure à l'effort maximum dont ils sont capables.

**DE LA FORCE STATIQUE DES MUSCLES DE L'OISEAU.** — En physiologie, on mesure la force statique développée par un muscle en cherchant le poids maximum que ce muscle puisse soulever.

Cette détermination a été faite par E. Weber (1) sur les muscles de la Grenouille, par Henke et Knorz (2), puis par Koster (3), sur les muscles de l'Homme; le poids maximum dans ces expériences était de 1 kilogramme environ par centimètre carré de section musculaire d'après Weber; de 5 pour Henke et Knorz; enfin, de 7 pour Koster.

Si les estimations de Borelli et même celles de Navier étaient justes, on devrait trouver aux muscles de l'Oiseau une force statique bien plus considérable; il ne m'a pas paru, au contraire, que cette force surpassât celle des muscles des Mammifères. J'avais déjà constaté qu'un poids d'un kilogramme placé sur l'aile d'un Pigeon, au niveau de l'articulation du bras avec l'avant-bras, ne pouvait être soulevé par les efforts volontaires de l'animal. Aussi, dans certaines expériences, où l'on veut tenir un Oiseau immobile, un excellent moyen de contention consisterait-il à mettre l'animal sur le dos, les ailes étendues, et à charger chaque aile d'un sac de grenaille de plomb pesant un kilogramme.

Je voulus avoir une mesure plus précise de la force des muscles pectoraux. Une Buse chaperonnée fut placée sur le dos dans la position que je viens de décrire. L'application du chaperon plonge ces animaux dans une sorte d'hypnotisme pendant lequel on peut faire sur eux toute espèce d'opérations, sans qu'ils trahissent leur douleur autrement que par des mouvements réflexes. Je dénudai le grand pectoral et la région humérale, je liai l'artère, et désarticulai le coude en faisant l'ablation de tout le reste de l'aile. Je fixai alors une corde à l'extrémité de l'humérus, et au bout de la corde je plaçai un plateau dans lequel on versa de la grenaille de plomb. Le tronc de l'Oiseau étant parfaitement immobilisé, j'excitai le muscle par des courants induits interrompus, et pendant que se produisait le tétanos artificiel, un aide versait la grenaille de plomb jusqu'à ce que la force

(1) *Wagner's Handwörterbuch der Physiologie.*

(2) *Die Grosse der absoluten Muskelkraft*, in Henle und Pfeufer, t. XXIV.

(3) *Archives néerlandaises*, 1866, p. 11.

de raccourcissement du muscle fût surmontée. A ce moment, le poids supporté était de 2<sup>k</sup>,380.

Or le bras de levier au bout duquel ce poids avait été placé était la longueur même de l'humérus : environ 9 centimètres, si l'on mesure la longueur du levier entre l'attache de la corde et le centre du mouvement de l'articulation humérale. Le bras de la puissance, visiblement beaucoup plus court, est plus difficile à mesurer. D'abord, l'attache du grand pectoral s'étend sur une grande longueur, environ 3 centimètres. Si l'on veut supposer la force musculaire appliquée au milieu de cette ligne d'insertion, le bras de levier de la puissance est d'environ 17 millimètres. Le poids soulevé et l'effort musculaire multipliés l'un et l'autre par leurs bras de leviers respectifs s'équilibraient. Il s'ensuit que la valeur réelle de la force de l'Oiseau était  $\frac{2380 \times 90}{17}$ ; ce qui donne 12<sup>k</sup>,600 pour la force du grand pectoral tout entier. Divisant ce nombre par 9<sup>ca</sup>,7 qui représente la surface de section de ce muscle, on obtient pour chaque centimètre carré du muscle de l'Oiseau un effort de 1298 grammes.

La faiblesse du chiffre que j'ai obtenu peut tenir à certaines causes d'erreur : d'abord je n'ai pas coupé le tendon du pectoral moyen (élévateur de l'aile). On peut donc objecter que les courants électriques, s'irradiant jusque dans la région profonde des muscles thoraciques, ont excité l'élévateur de l'aile, dont l'action antagoniste du grand pectoral, c'est-à-dire agissant dans le même sens que le poids, a diminué sensiblement la charge nécessaire pour équilibrer l'effort du muscle abaisseur.

On pourra dire aussi que l'agent électrique dont je me suis servi peut ne pas produire dans le muscle des efforts aussi énergiques que ceux que la volonté provoque.

Admettons que ces objections soient fondées, doublons, quadruplons même la force que je viens d'assigner au muscle, et nous serons encore au-dessous des chiffres que Koster attribue à la force spécifique du muscle de l'Homme. Ainsi, malgré le peu de précision de l'expérience que j'ai faite, on y peut, je crois, trouver la preuve qu'il n'existe pas dans les muscles de l'Oiseau

une puissance notablement plus grande que celle qu'on rencontre chez les autres animaux.

**RAPIDITÉ D'ACTION DES MUSCLES DE L'OISEAU.** — L'une des particularités les plus frappantes de l'action des muscles de l'Oiseau est la rapidité extrême avec laquelle la force s'engendre dans ces muscles. Parmi les différentes espèces animales sur lesquelles j'ai déterminé les caractères de l'acte musculaire, l'Oiseau est celui qui m'a donné les mouvements les plus rapides.

On peut, par la myographie (1), enregistrer la courbe du mouvement que produit un muscle, et apprécier ainsi la durée de son raccourcissement, puis celle de son retour à sa longueur primitive. Si l'on fait agir l'électricité ou un excitant instantané quelconque sur le nerf d'un muscle, ou sur le muscle lui-même, on provoque un mouvement d'une durée très-variable suivant l'espèce animale sur laquelle on agit. Ce mouvement que j'ai appelé *secousse musculaire*, pour le distinguer de la contraction prolongée qui peut se produire en d'autres circonstances, dure une seconde et même plus pour les muscles de la Tortue ; chez l'Homme, il ne dure guère plus de six ou huit centièmes de seconde, et chez l'Oiseau, il s'accomplit en quatre centièmes de seconde.

Cette rapidité est une condition indispensable du vol. En effet, l'aile qui s'abaisse ne peut trouver sur l'air un point d'appui suffisant que si elle se meut avec une grande vitesse. La résistance de l'air, au-devant d'un plan qui le refoule, croît sensiblement en raison du carré de la vitesse avec laquelle ce plan se déplace. Il ne servirait de rien à l'Oiseau d'avoir des muscles énergiques, capables de produire un travail considérable, si ces muscles n'imprimaient à l'aile que des mouvements lents ; leur force ne trouverait pas à s'exercer, faute de résistance, et aucun travail ne pourrait être produit. Il en est autrement des animaux terrestres qui courent ou rampent sur le sol avec une allure plus ou moins rapide suivant la nature de leurs muscles, mais

(1) Voyez Marey, *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 223 à 266.

qui, en définitive, utilisent en travail leur force musculaire à cause de la parfaite résistance du point d'appui. Chez les Poissons déjà, le besoin de rapidité dans les mouvements se faisait sentir; l'eau dans laquelle ils nagent résiste en raison de la vitesse avec laquelle la queue ou les nageoires la repoussent; aussi l'acte musculaire est-il bref chez les Poissons, mais moins que chez les Oiseaux qui se meuvent dans un milieu bien plus mobile encore.

Pour comprendre la production si rapide du mouvement dans les muscles de l'Oiseau, il faut admettre que les actions chimiques qui ont lieu dans la substance même du muscle, et y engendrent, comme dans nos machines, la chaleur et le mouvement; que ces actions, dis-je, naissent et se propagent plus facilement dans les muscles des Oiseaux que chez toute autre espèce animale. C'est ainsi que les différentes poudres de guerre présentent des durées variables dans leur déflagration, et par suite impriment des vitesses très-différentes aux projectiles qu'elles lancent.

Il me semble indispensable d'insister à ce propos sur les phénomènes moléculaires dont les muscles sont le siège; on y trouvera des éclaircissements pour le sujet qui nous occupe.

Les physiologistes modernes, étendant aux êtres organisés le principe de la conservation de la force ainsi que l'équivalence du travail mécanique et de la chaleur, admettent que dans les muscles, comme dans le foyer de nos machines, il se produit une combustion. Cette combustion ou décomposition chimique, rompant certains équilibres moléculaires, met en liberté les forces qui les retenaient et les rend sensibles sous deux formes: la chaleur et le travail mécanique, qui sont en quelque sorte complémentaires l'un de l'autre. De sorte que si un muscle excité se contracte sans soulever de poids et sans faire de travail, il s'échauffera sensiblement; s'il est chargé d'un poids et qu'il fasse du travail, ce muscle s'échauffera moins, et cette perte de chaleur, si l'on pouvait la mesurer, devrait correspondre à l'équivalent mécanique du travail qui a été produit.

Assurément, on ne saurait évaluer exactement la chaleur que

dégage un muscle vivant pendant qu'il se contracte, car la circulation du sang, suivant qu'elle y est plus ou moins active, vient y apporter, en plus ou moins grande abondance, la chaleur qui se produit aux différents points de l'organisme. Toutefois, les expériences de Béclard, de Heidenhain, de Hirn, etc., tendent à prouver que la production de chaleur diminue lorsque la quantité du travail mécanique augmente. C'est assez pour légitimer l'admission, en physiologie, du principe de la conservation de la force, d'autant plus que ce principe est de ceux dont l'existence s'impose le plus impérieusement à la raison.

Toutefois, il reste encore deux manières de comprendre la production du travail par les actions chimiques qui ont lieu dans les muscles. Ou bien l'action chimique que nous avons appelée combustion met en liberté des forces qui se traduisent immédiatement, partie en chaleur et partie en travail mécanique; ou bien, ainsi que cela se passe dans nos machines, la chaleur se produit d'abord pour se transformer partiellement en travail. Certains faits rendent cette dernière hypothèse extrêmement probable.

On peut, en certains cas, surprendre dans un muscle la transformation de la chaleur en travail mécanique. Chargez d'un poids un muscle encore vivant, puis élevez la température du muscle, vous le verrez se raccourcir et soulever le poids : un travail mécanique aura donc été produit aux dépens de la chaleur.

C'est un physiologiste russe, J. Chmoulevitch, qui découvrit, tout récemment, cette action de la chaleur sur les muscles.

Voici dans quelles conditions le phénomène se manifeste.

Lorsqu'on détache un muscle de Grenouille et qu'on provoque en lui des secousses par l'électricité, tout en le soumettant à une élévation graduelle de température, on voit que l'amplitude des mouvements qui se produisent va toujours en décroissant à partir d'un certain point, et qu'il arrive un instant où le muscle ne réagit plus du tout. C'est au delà de 33 degrés centigrades que se produit cette perte d'irritabilité musculaire. Si l'on refroidit

ensuite graduellement le muscle, on le voit peu à peu reprendre son irritabilité. Que s'est-il passé ?

Si l'on a soin d'enregistrer les unes à côté des autres les secousses du muscle graduellement échauffé, on voit que la décroissance de leur amplitude tient à ce que le muscle, après s'être raccourci, ne revient plus à sa longueur normale s'il reçoit de la chaleur. Les minima des courbes s'élèvent de plus en plus, annonçant que le poids soulevé par chaque secousse ne redescend pas complètement; le travail effectué pendant le raccourcissement musculaire ne se défait pas entièrement dans le relâchement incomplet qui suit, et il reste une

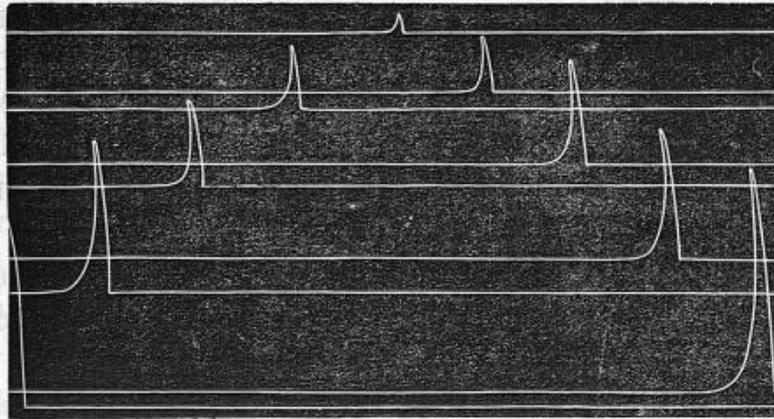


FIG. 19. — Montrant les effets de la chaleur sur le travail musculaire (la figure se lit de droite à gauche). La première secousse a une grande hauteur; la deuxième est moins haute, mais cela tient en partie à ce que l'origine du trait se trouve à un niveau plus élevé, ainsi que le montre la ligne horizontale d'où la deuxième secousse se détache: cette élévation du point de départ de la secousse prouve que le muscle était dans un état de raccourcissement sous l'influence de la chaleur. Le même effet se prononce de plus en plus jusqu'à la cinquième secousse. A ce moment, le muscle est refroidi, et son retour à sa longueur primitive ramène l'amplitude des secousses à leur degré normal.

certaine quantité de travail accompli dont la cause paraît être la transformation de la chaleur dans le muscle. Et quand le muscle chauffé au delà de 33 degrés paraît inerte, c'est qu'il a obtenu par l'action de la chaleur tout le raccourcissement dont il est susceptible: c'est qu'il a exécuté tout le travail dont il est capable.

Dans la période de refroidissement du muscle, l'inverse se produit, la soustraction de chaleur équivalant à un travail négatif, c'est-à-dire au relâchement du muscle et à la chute du poids qu'il avait soulevé.

COMPARAISON DE L'ACTION DES MUSCLES AVEC CERTAINS PHÉNOMÈNES QUI SE PRODUISENT DANS LE CAOUTCHOUC. — Le caoutchouc jouit de propriétés très-analogues à celles du tissu musculaire, au point de vue de la transformation de chaleur en travail mécanique. Prenez un fil de caoutchouc non vulcanisé, chargez-le d'un poids, il s'allonge, un travail négatif se produit, et conformément à la théorie mécanique de la chaleur, vous pourrez percevoir un échauffement très-notable du fil. Inversement, soumettez ce fil chargé d'un poids à une élévation de température, et vous verrez, avec Thompson, le fil se raccourcir et soulever le poids. Mais, dans ces conditions, la quantité de travail produite par le caoutchouc est très-faible ; voici un moyen de la rendre très-considérable.

Il y a deux ans environ, le docteur Ranvier me rendit témoin de l'expérience suivante : Il étirait longuement un fil de caoutchouc de manière à le rendre quinze à vingt fois plus long qu'au repos, et amenait le fil à un état qu'il appelait l'*énervement*, dans lequel le caoutchouc restait allongé, même lorsqu'on cessait d'exercer sur lui des tractions. Si alors on touchait un endroit de ce fil avec un corps chaud, on voyait aussitôt se produire en ce point un renflement considérable formé par le retrait subit du caoutchouc et par son retour à sa forme et à sa longueur primitives. Placé dans le creux de la main, le fil énervé s'y tordait comme un ver et reprenait en quelques instants sa brièveté et sa largeur primitives. L'expérience de M. Ranvier était facile à interpréter dans l'une de ses parties ; la chaleur appliquée au caoutchouc était par lui transformée en travail ; mais qu'était-ce que l'état d'énervement préalable auquel le fil devait avoir été amené pour que le phénomène pût avoir lieu ?

En reprenant cette expérience, je ne tardai pas à m'apercevoir que la durée des tractions auxquelles je soumettais le fil

avait un grand rôle dans la production de l'énervement. Si je me bornais à étendre le fil de manière à lui donner vingt fois sa longueur, et si je le relâchais aussitôt, il revenait sensiblement à sa forme primitive, mais si la traction se prolongeait trente secondes, une minute ou plus encore, le fil abandonné à lui-même ne revenait qu'incomplètement : il avait été en partie énérvé, et d'autant plus complètement que la traction avait été plus prolongée. Or, l'influence de la durée des tractions avait une explication naturelle. Si l'on se souvient que le caoutchouc étiré s'échauffe, il est naturel d'admettre que la chaleur thermométrique qui apparaît à sa surface se perdra peu à peu si la traction se prolonge ; et s'il faut de la chaleur pour que le caoutchouc revienne à ses dimensions, il ne reviendra pas complètement s'il a perdu une partie plus ou moins grande de la chaleur que l'étirement avait dégagée.

Si cette théorie est vraie, il est facile de produire un énervement rapide du caoutchouc en lui enlevant rapidement sa chaleur sensible. C'est précisément ce qui a lieu. Étirez un fil de caoutchouc et plongez-le dans l'eau froide, vous l'en retirerez instantanément énérvé, figé pour ainsi dire en élongation ; rendez-lui de la chaleur, il reviendra à ses dimensions premières en produisant un travail mécanique. Je ne doute pas que la physique ne puisse retrouver dans le travail ainsi obtenu l'équivalent exact de la chaleur restituée.

Nous voici bien loin de notre sujet, mais nous allons y revenir avec des idées nouvelles qui nous permettront une analyse plus complète de l'action des muscles. En effet, nous avons dans l'emploi du caoutchouc une sorte de *schéma* du muscle très-précieux pour l'étude de certains phénomènes qui, chez les êtres vivants, se présentent avec trop de complexité.

**DES DIFFÉRENTES FORMES DU TRAVAIL MUSCULAIRE.** — Le caoutchouc va nous servir à comprendre la manière dont s'effectue le travail du muscle chez les animaux en général, et spécialement chez les Oiseaux dont nous nous occupons ici.

Prenons deux cylindres de caoutchouc de même forme et de

même poids, allongeons-les tous les deux de dix fois leur longueur primitive, et refroidissons-les en cet état ; si nous restituons à ces deux fils la quantité de chaleur qu'ils ont perdue, tous les deux, en se raccourcissant, produiront le même travail sous la même forme, c'est-à-dire qu'ils soulèveront le même poids à la même hauteur.

Prenons maintenant deux fils de même poids, mais de section inégale, dont l'un, par exemple, sera dix fois plus gros, mais dix fois plus court que l'autre. Allongés chacun de dix fois sa longueur et refroidis en cet état, ils seront encore capables, s'ils reçoivent la chaleur perdue, de produire le même travail ; mais ce ne sera plus sous la même forme. Le fil gros et court pourra, par exemple, soulever un poids de 100 grammes à 1 centimètre de hauteur ; le fil long et mince sera absolument incapable de soulever le même poids, mais si on ne le charge que de 10 grammes, il soulèvera ces 10 grammes à 10 centimètres.

Or, la mesure du travail mécanique s'obtient en multipliant le poids soulevé par la hauteur à laquelle il a été porté ; ce produit sera le même dans les deux cas, il y aura donc identité de travail au point de vue de la quantité, mais non au point de vue de la forme sous laquelle il aura été produit.

Ainsi pour les fils de caoutchouc qui ont subi un même allongement proportionnellement à leur longueur et une même soustraction de chaleur, la quantité de *travail* produit par la restitution de cette chaleur sera proportionnelle au poids des fils ; l'*effort*, ou le poids soulevé, sera proportionnel à la section de chaque fil ; enfin, le *parcours* imprimé au poids sera proportionnel à la longueur du fil.

Tout ce qu'on sait de la fonction musculaire tend à prouver que le travail produit par un muscle est soumis aux mêmes lois. En effet, l'étendue du raccourcissement des muscles est fonction de la longueur de leurs fibres, tandis que l'effort maximum qu'ils peuvent développer est proportionnel à la section du faisceau musculaire.

Prenons quelques exemples parmi les muscles de l'Homme. Le deltoïde, muscle gros et court, ne subit que des raccourcis-

sements peu étendus, mais il développe un effort considérable. Le muscle couturier, au contraire, long et grêle, ne saurait exécuter le même effort, mais, grâce à la position de ses attaches osseuses, il subit des raccourcissements bien plus grands. Ces deux muscles, si nous les supposons du même poids, pourront exécuter le même travail, mais sous des formes différentes, ce qui tient à la façon dont est répartie en eux la substance musculaire.

**MODIFICATIONS DE L'APPAREIL MUSCULAIRE ET DU SQUELETTE SUIVANT LE TYPE DU VOL CHEZ LES DIFFÉRENTES ESPÈCES D'OISEAUX.** — Si nous étudions chez les Oiseaux de différentes espèces, la forme du muscle grand pectoral, c'est-à-dire de l'abaisseur de l'aile, nous voyons que ce muscle présente des formes très-variables. Tantôt ce muscle est long et grêle, tantôt il est court et épais. Nous allons voir que cette disposition anatomique correspond à une importante distinction dans le caractère du vol.

Il suffit d'observer le vol d'un Canard et celui d'une Buse pour être frappé d'une différence capitale dans les mouvements de ces deux Oiseaux. Le Canard, en volant, élève et abaisse beaucoup ses ailes, décrivant avec chacune d'elles un angle de plus de 90 degrés. La Buse, au contraire, a les mouvements peu étendus; lorsqu'on l'observe de profil, c'est-à-peine si l'on voit la pointe de son aile dépasser les limites de la silhouette de son corps. Cette différence dans le type du vol a tellement frappé les observateurs que certains d'entre eux ont classé les Oiseaux en rameurs et en voiliers. Les premiers seraient ceux qui volent en frappant l'air de leurs ailes comme le batelier frappe l'eau avec sa rame; les seconds, livrant au souffle du vent la surface de leurs ailes comme la voile d'un navire, voleraient d'une manière en quelque sorte passive, utilisant, pour se soutenir et pour se diriger, la force du vent. Nous verrons plus loin ce qu'il y a de réel dans cette distinction; n'acceptons, pour le moment, que ce fait incontestable: à savoir, que certaines espèces d'Oiseaux impriment à leurs ailes des mouvements d'une grande amplitude, et que certaines autres ne les meuvent que dans un parcours très-peu étendu.

J'ai disséqué différents Oiseaux pour étudier la forme de leurs muscles pectoraux. Chez le Canard, le grand pectoral est extrêmement long, tandis que chez la Buse il est très-court; mais le muscle de la Buse présente une section transversale beaucoup plus grande que celui du Canard. Si nous ne considérons que la longueur relative des muscles pectoraux, nous voyons qu'elle varie dans le sens que la théorie pouvait faire prévoir : elle est plus ou moins grande suivant l'amplitude du mouvement que l'aile de l'Oiseau exécute pendant le vol.

Mais à quoi correspond cet inégal développement des pecto-

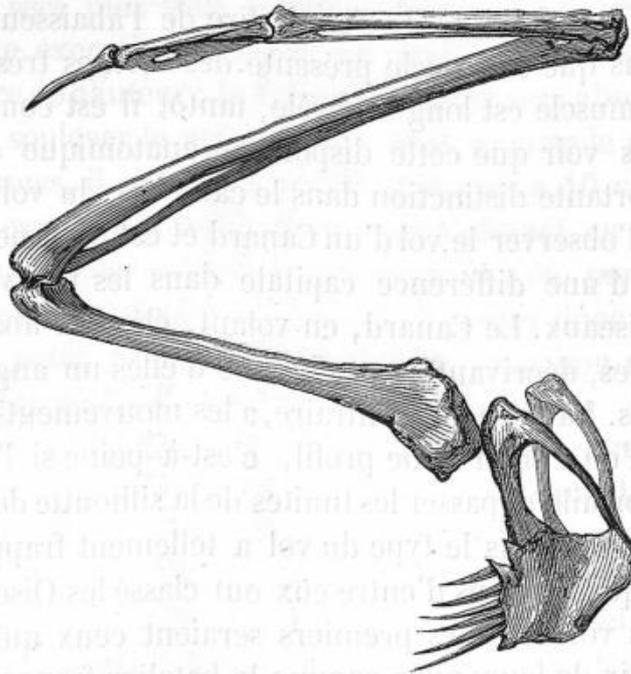


FIG. 20. — Squelette de l'aile et sternum de la Frégate. On y voit l'extrême brièveté du sternum par rapport à la grande étendue de l'aile.

raux dans le sens de l'épaisseur ? Il suppose évidemment un effort musculaire plus grand pour la Buse que pour le Canard ; Comment comprendre cet effort ?

Si nous comparons les différentes espèces d'Oiseaux qui ont le grand pectoral gros et court avec celles qui ont ce muscle long et mince, nous voyons que, chez les premières, la surface des ailes est très-grande, tandis qu'elle est très-faible chez les se-

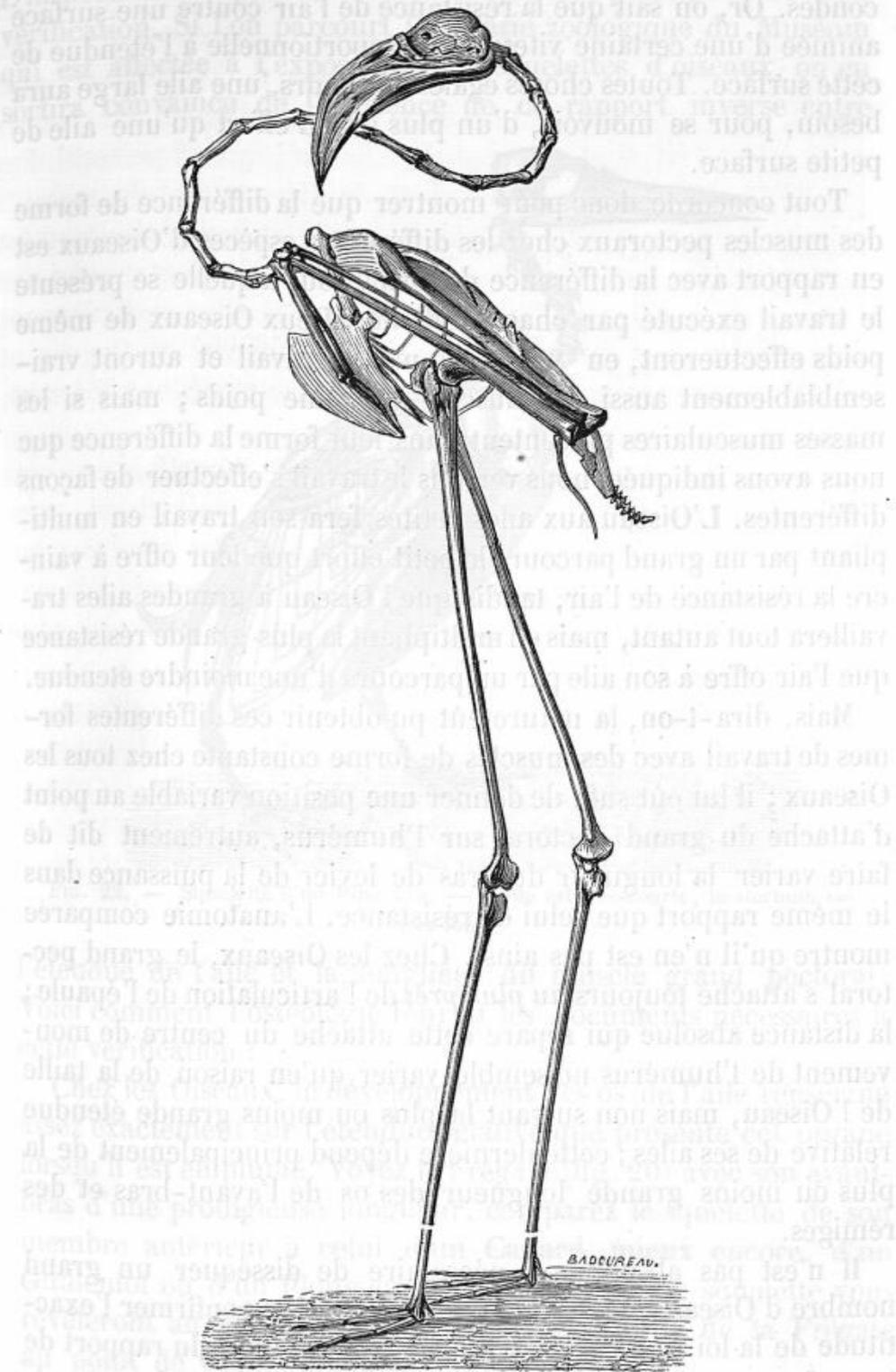


FIG. 21. — Squelette du Flamant (d'après Alph. Milne Edwards). L'aile est très-grande et le sternum très-court.

condes. Or, on sait que la résistance de l'air contre une surface animée d'une certaine vitesse est proportionnelle à l'étendue de cette surface. Toutes choses égales d'ailleurs, une aile large aura besoin, pour se mouvoir, d'un plus grand effort qu'une aile de petite surface.

Tout concorde donc pour montrer que la différence de forme des muscles pectoraux chez les différentes espèces d'Oiseaux est en rapport avec la différence de forme sous laquelle se présente le travail exécuté par chacune d'elles. Deux Oiseaux de même poids effectueront, en volant, le même travail et auront vraisemblablement aussi des muscles de même poids ; mais si les masses musculaires présentent dans leur forme la différence que nous avons indiquée, nous verrons le travail s'effectuer de façons différentes. L'Oiseau aux ailes petites fera son travail en multipliant par un grand parcours le petit effort que leur offre à vaincre la résistance de l'air, tandis que l'Oiseau à grandes ailes travaillera tout autant, mais en multipliant la plus grande résistance que l'air offre à son aile par un parcours d'une moindre étendue.

Mais, dira-t-on, la nature eût pu obtenir ces différentes formes de travail avec des muscles de forme constante chez tous les Oiseaux ; il lui eût suffi de donner une position variable au point d'attache du grand pectoral sur l'humérus, autrement dit de faire varier la longueur du bras de levier de la puissance dans le même rapport que celui de résistance. L'anatomie comparée montre qu'il n'en est pas ainsi. Chez les Oiseaux, le grand pectoral s'attache toujours *au plus près* de l'articulation de l'épaule ; la distance absolue qui sépare cette attache du centre de mouvement de l'humérus ne semble varier qu'en raison de la taille de l'Oiseau, mais non suivant la plus ou moins grande étendue relative de ses ailes ; cette dernière dépend principalement de la plus ou moins grande longueur des os de l'avant-bras et des rémiges.

Il n'est pas absolument nécessaire de disséquer un grand nombre d'Oiseaux de différentes espèces pour confirmer l'exactitude de la loi que j'ai cherché à établir au sujet du rapport de la surface alaire avec la longueur du muscle grand pectoral.

L'inspection du squelette fournit les éléments principaux de cette vérification. Si l'on parcourt la galerie zoologique du Muséum qui est affectée à l'exposition des squelettes d'oiseaux, on en sortira convaincu de l'existence de ce rapport inverse entre

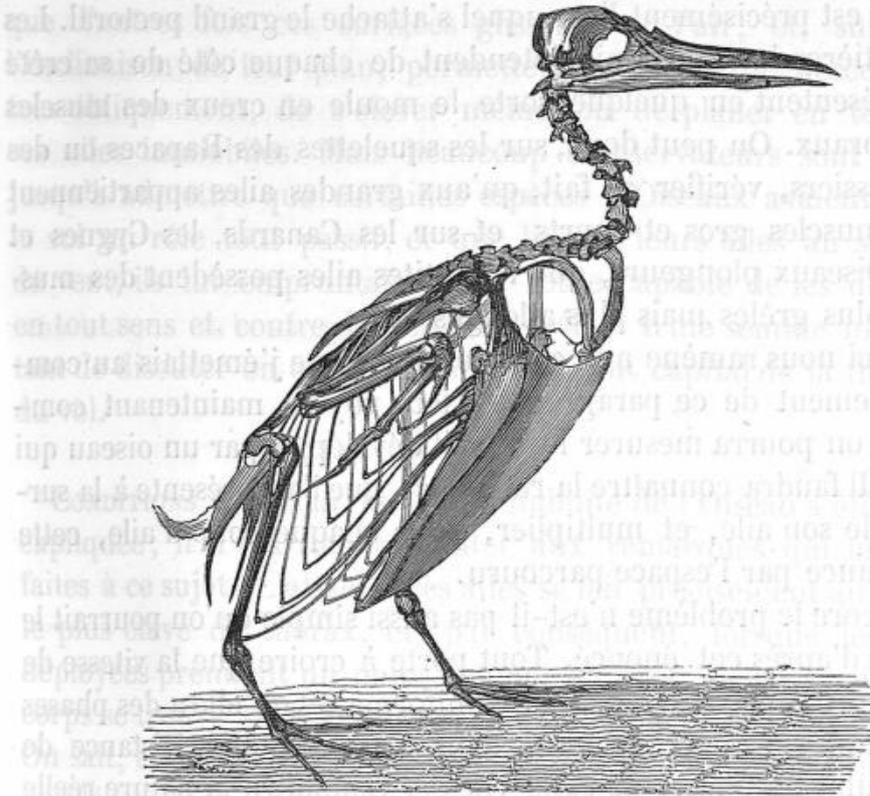


FIG. 22. — Squelette d'un Pingouin. — L'aile est très-courte, le sternum est très-long.

l'étendue de l'aile et la longueur du muscle grand pectoral. Voici comment l'ostéologie fournit les documents nécessaires à cette vérification :

Chez les Oiseaux, le développement des os de l'aile renseigne assez exactement sur l'étendue relative que présente cet organe lorsqu'il est emplumé. Voyez la Frégate (fig. 20) avec son avant-bras d'une prodigieuse longueur, comparez le squelette de son membre antérieur à celui d'un Canard, mieux encore, d'un Guillemot ou d'un Plongeon, les proportions du squelette vous révéleront au premier coup d'œil la supériorité de la Frégate au point de vue de l'étendue des ailes.

Comparez ensuite le sternum chez ces différents Oiseaux, vous le trouverez large chez la Frégate, mais d'une extrême brièveté. Chez le Canard, le Plongeon, le Guillemot, le sternum, plus étroit, offre au contraire une longueur considérable. Or, le sternum est précisément l'os auquel s'attache le grand pectoral. Les gouttières latérales qui s'étendent de chaque côté de sa crête représentent en quelque sorte le moule en creux des muscles pectoraux. On peut donc, sur les squelettes des Rapaces ou des Échassiers, vérifier ce fait, qu'aux grandes ailes appartiennent des muscles gros et courts, et sur les Canards, les Cygnes et les Oiseaux plongeurs, que les petites ailes possèdent des muscles plus grêles mais plus allongés.

Ceci nous ramène aux considérations que j'émettais au commencement de ce paragraphe. Nous voyons maintenant comment on pourra mesurer le travail développé par un oiseau qui vole. Il faudra connaître la résistance que l'air présente à la surface de son aile, et multiplier, pour chaque coup d'aile, cette résistance par l'espace parcouru.

Encore le problème n'est-il pas aussi simple qu'on pourrait le croire d'après cet énoncé. Tout porte à croire que la vitesse de l'aile qui frappe l'air n'est point uniforme, et qu'elle a des phases croissantes et décroissantes, dans lesquelles la résistance de l'air subit les phases de cette vitesse. Connaître la nature réelle du mouvement de l'aile de l'Oiseau est donc la première question qui se pose: ce sera l'objet des expériences qui seront exposé dans les chapitres suivants.

#### CHAPITRE IV.

##### DU TRAVAIL EFFECTUÉ PAR L'OISEAU DANS LE VOL.

De la forme de l'Oiseau. — Conditions de stabilité. — Planement et glissement sur l'air. — Rapport de la surface des ailes ou poids du corps de l'Oiseau. — Rapport du poids des muscles thoraciques au poids de l'animal.

**FORME DE L'OISEAU.** — Tous ceux qui se sont occupés de l'étude du vol des Oiseaux ont insisté avec grande raison sur la forme de ces animaux qui les rend éminemment propres au vol.

Ils y ont vu les conditions de stabilité parfaites dans le milieu aérien. Ils ont bien compris le rôle de ces grandes surfaces qui forment les ailes, et qui peuvent parfois agir comme un parachute pour produire une descente très-lente de l'animal, tandis que d'autres fois ces surfaces glissent sur l'air, et, suivant l'inclinaison de leur plan, permettent à l'Oiseau de descendre très-obliquement, de s'élever même, ou de planer en tenant ses ailes immobiles. Mais beaucoup d'observateurs sont allés jusqu'à admettre que certaines espèces d'Oiseaux avaient dans le vol un rôle tout passif, et que livrant leurs ailes au souffle du vent, ils lui empruntaient une force capable de les diriger en tout sens et contre le vent lui-même. Il me semble important de discuter en quelques mots ce point capital de la théorie du vol.

CONDITIONS DE STABILITÉ. — La stabilité de l'Oiseau a été bien expliquée; il n'y a rien à ajouter aux remarques qui ont été faites à ce sujet. L'attache des ailes se fait précisément au point le plus élevé du thorax, et, par conséquent, lorsque les ailes déployées prennent un point d'appui sur l'air, tout le poids du corps se trouve placé au-dessous de cette surface de suspension. On sait, en outre, que dans le corps lui-même, les organes les plus légers sont en haut : les poumons et les sacs aériens, tandis que la masse intestinale déjà plus dense est située au-dessous. Enfin, les muscles thoraciques, si volumineux et si lourds, occupent le point inférieur du système ; de sorte que la partie la plus lourde est placée le plus bas possible au-dessous de la surface de suspension.

L'Oiseau qui descend les ailes déployées présentera donc toujours en bas sa région ventrale ; sans avoir besoin de faire des efforts d'équilibre, il prendra cette attitude passivement, comme la prend le parachute abandonné dans l'espace, comme la prend aussi le volant qui retombe sur la raquette.

Mais cette chute verticale dont je viens de parler est un cas exceptionnel ; l'Oiseau qui se laisse tomber est presque toujours animé d'une vitesse préalable ; il glisse donc obliquement sur



l'air comme glisse tout corps léger et à grande surface placé dans les conditions de stabilité qui viennent d'être indiquées.

**PLACEMENT ET GLISSEMENT.** — M. J. Pline a très-bien étudié les différentes sortes de glissement qui peuvent alors avoir lieu; il les a même reproduites en construisant des Papillons artificiels de formes les plus variées. Il est préférable d'étudier ces phénomènes au moyen de petits appareils schématiques affectant des formes géométriques très-simples et par conséquent très-faciles à construire.

Que l'on prenne une feuille de papier de forme carrée, et qu'on le ploie par le milieu de manière à former un angle dièdre

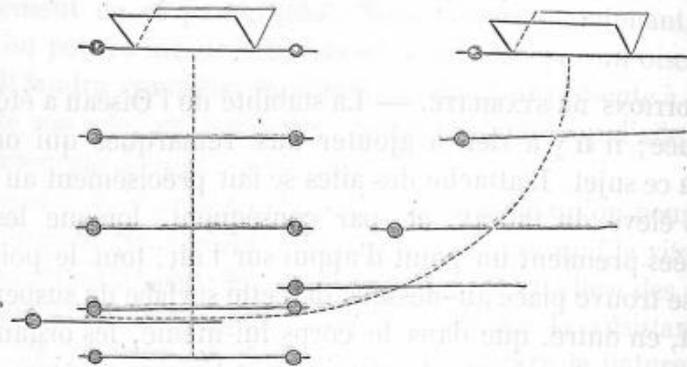


FIG. 23. — Représentant : à gauche, un appareil de planement équilibré par deux masses égales placées aux extrémités de la tige qui est logée dans le fond de l'angle dièdre. Cet appareil tombe verticalement comme l'indiquent les positions successives de la tige munie de deux masses. — A droite, on voit le même appareil muni d'une seule masse. La chute est parabolique, ainsi que le montre la trajectoire ponctuée.

très-obtus (fig. 23); puis, qu'au fond de cet angle, on fixe avec un peu de cire une tige de métal munie de deux masses de même poids ou quelque corps pesant, on aura un système stable dans l'air. Si le centre de gravité passe exactement par le centre de figure, en abandonnant cet appareil dans l'espace, on le verra tomber verticalement, la convexité de son angle étant tournée en bas. Si l'on enlève l'une des deux masses de manière à déplacer le centre de gravité, l'appareil, au lieu de tomber verti-

calement, suivra une trajectoire oblique, et glissera sur l'air d'un mouvement accéléré.

La trajectoire parcourue par ce mobile sera située dans un plan vertical, si les deux moitiés de l'appareil sont bien symétriques; dans le cas contraire, elle s'infléchira du côté où l'appareil coupe l'air en trouvant le moins de résistance. Ces effets, bien faciles à comprendre, sont identiques avec ceux que produit dans la marche d'un navire la résistance du gouvernail. Ils peuvent aussi se produire dans le sens vertical; de sorte que la trajectoire de l'appareil peut être une courbe à concavité supérieure ou inférieure suivant le cas.

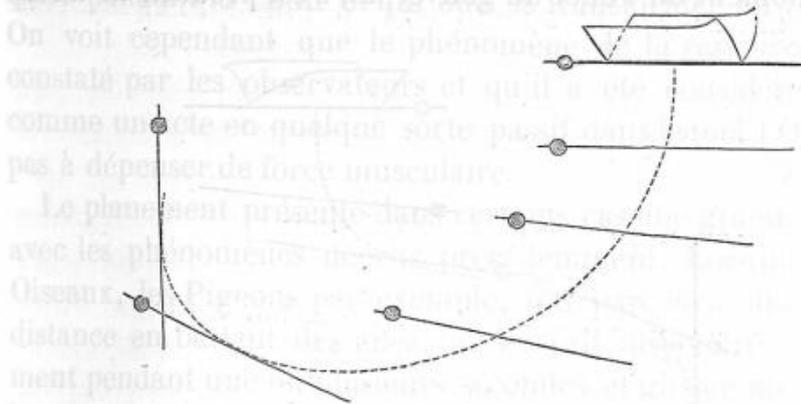


FIG. 24. — On a relevé le bord postérieur de deux plans de l'angle dièdre. Après une chute descendante, parabolique, l'appareil remonte ainsi que la trajectoire ponctuée.

Tout corps mince qui présente une courbure tend à glisser dans l'air dans le sens du rayon de sa propre courbure.

Si, dans notre petit appareil, nous relevons le bord postérieur ou le bord antérieur des plans latéraux, nous verrons, à un moment donné de sa chute oblique, l'appareil remonter contre la pesanteur, mais perdre bien vite son mouvement de translation. Que s'est-il passé?

Tant que le mobile, dans sa chute, n'a eu que peu de vitesse, l'effet de la courbure de sa surface est resté insensible, parce que l'air ne présente de résistance aux surfaces qu'en raison de la vitesse dont elles sont animées. Lors donc que la vitesse a été assez grande, un effet de gouvernail s'est produit qui a relevé

l'extrémité antérieure du mobile et lui a imprimé une direction ascendante. Mais aussitôt, la pesanteur, qui était la force accélératrice du glissement de l'appareil dans l'air, est devenue retardatrice, et à mesure que le mobile s'élevait, il a perdu sa vitesse et est arrivé à l'immobilité. Après cela, une rétrogradation commence, puis une remontée en arrière, de façon que par oscillations successives l'appareil arrive enfin sur le sol.

J'ajoute que si l'on donne au mobile une légère concavité par en bas, l'inverse se produit, et l'on voit (fig. 25), à un certain moment, la trajectoire s'infléchir brusquement en bas et le mobile frapper le sol avec une grande violence. Dans ce second cas, au moment où l'effet du gouvernail s'est produit, la direc-

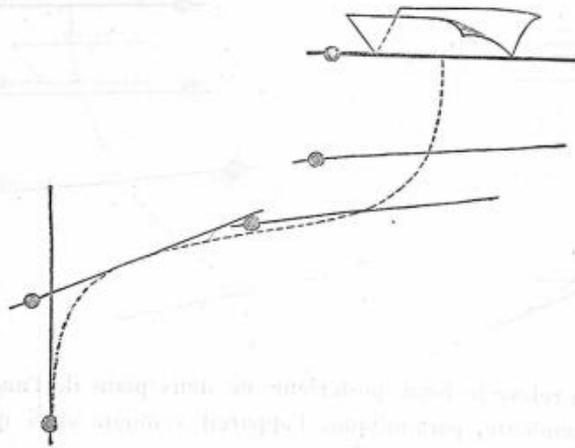


FIG. 25. — La partie postérieure du plan de l'angle dièdre a été recourbée en bas. Après une chute parabolique, le mobile prend une marche descendante très-rapide.

tion nouvelle s'est trouvée favorisée par la pesanteur qui a précipité la chute, tandis que, tout à l'heure, elle ralentissait la remontée.

J'ai insisté sur ces effets, parce qu'ils se produisent fréquemment dans le vol des Oiseaux. Les anciens traités de fauconnerie décrivent les évolutions intéressantes des Oiseaux chasseurs. Sans remonter plus haut, on trouve dans Huber (in-8°, Genève, 1784) la description de ces mouvements curvilignes du Faucon, auxquels on donnait le nom de *passades*, et qui consistaient en une descente oblique de l'oiseau suivie d'une *ressource* ou remontée

(du latin *resurgere*). « L'Oiseau, dit Huber, emporté par sa propre vitesse, irait toucher la terre et s'y fracasser s'il n'usait de certaine faculté qu'il a de s'arrêter au plus fort de sa vitesse et de se porter droit en haut, au degré nécessaire pour être à même de faire une seconde descente. Ce mouvement suffit non-seulement pour arrêter sa descente, mais encore pour le porter, sans qu'il fasse aucun effort, aussi haut que le niveau d'où il est parti. »

Assurément, il y a de l'exagération à dire que l'Oiseau remonte jusqu'au niveau d'où il est parti sans faire d'effort actif; la résistance de l'air doit éteindre une partie de la force qui a été acquise pendant la chute et qui doit se transformer en remontée. On voit cependant que le phénomène de la *ressource* est bien constaté par les observateurs et qu'il a été considéré par eux comme un acte en quelque sorte passif dans lequel l'Oiseau n'a pas à dépenser de force musculaire.

Le planement présente dans certains cas une grande analogie avec les phénomènes décrits précédemment. Lorsque certains Oiseaux, les Pigeons par exemple, ont parcouru une certaine distance en battant des ailes, on les voit suspendre tout battement pendant une ou plusieurs secondes et glisser sur l'air, soit horizontalement, soit en s'abaissant ou en s'élevant. Le planement descendant est celui qui présente la plus longue durée; en effet, ce n'est qu'une chute extrêmement ralentie, mais dans laquelle la pesanteur entretient le mouvement, tandis qu'elle le ralentit dans le planement horizontal ou ascendant. Dans ces deux dernières formes, l'aile, plus ou moins obliquement dirigée, prend son point d'appui sur l'air comme ce jouet d'enfant que l'on appelle le *cerf-volant*; avec cette différence que la vitesse est imprimée au cerf-volant par la traction exercée sur la ficelle lorsque l'air est calme, tandis que l'Oiseau utilise dans le planement une vitesse qu'il a acquise, soit par une chute oblique, soit par des coups d'ailes préalables.

J'ai déjà dit que les observateurs avaient admis que certains Oiseaux qu'ils appellent voiliers pouvaient, par la seule action du vent, se soutenir et se diriger dans l'air. Cette théorie a toute

l'apparence d'un paradoxe ; on ne comprend pas en effet que l'Oiseau immobile dans le vent ne subisse pas l'entraînement de l'air sur lequel il glisse.

Si les passades ou les planements qu'il exécute peuvent le porter parfois en sens contraire de la direction du vent, ce ne sont que des effets passagers compensés à un autre instant par un entraînement plus rapide.

Cependant, la théorie du vol à voile a été soutenue avec un grand talent par certains observateurs, et particulièrement par le comte d'Esterno, auteur d'un remarquable Mémoire sur le vol des Oiseaux.

Tout le monde, dit cet auteur, peut voir certains Oiseaux pratiquer le vol à voile ; le nier, c'est nier l'évidence.

J'ai vu aussi moi-même le vol à voile, mais il m'a semblé qu'il s'exécutait, en général, dans des conditions toutes particulières que voici :

Le long des hautes falaises de la Normandie, j'ai vu les Mouettes et les Goëlands se livrer à leurs évolutions sans agiter leurs ailes. J'ai vu autour des vieilles cathédrales les Choucas et les Corneilles exécuter le même vol. Mais ces mêmes oiseaux, lorsqu'ils quittent ces stations spéciales, m'ont toujours paru se livrer au vol ramé, c'est-à-dire se livrer à des battements d'ailes constants ou à peine interrompus, chez les Choucas, par des temps de planement de courte durée.

J'ai cherché alors à bien déterminer la direction du vent, et voici ce qui m'a semblé se passer.

Lorsqu'un Oiseau se trouve dans le voisinage d'un abri où l'air soit calme ou agité de remous de sens inverse à la direction du vent qui règne, il peut passer tour à tour de l'air calme dans l'air agité, et inversement. Un Goëland qui se livre au cours du vent trouve une impulsion qui l'entraîne avec une certaine vitesse, et si, par un simple mouvement tournant, l'Oiseau rentre dans une région où l'air soit calme, il peut utiliser la vitesse que le vent lui a donnée et s'en servir pour revenir, en sens contraire, jusqu'au niveau d'où il était parti. Se replongeant de nouveau dans la zone agitée, il recommence de nouveau

l'évolution que je viens de décrire, et cela sans agiter ses ailes, mais en leur donnant seulement des orientations différentes. Les Choucas et les Corneilles m'ont paru se comporter de même à l'abri des tours des cathédrales.

Les auteurs qui ont rapporté les cas les plus curieux de vol à voile les ont observés dans des régions montagneuses. C'était un Condor dans les Cordillères, ou un Aigle dans les Pyrénées. On a maintes fois décrit le vol à voile de certains Oiseaux de proie qui, au milieu d'une plaine, s'élèvent en tournoyant sans agiter leurs ailes. J'ai vu moi-même souvent les Buses voler ainsi, mais toujours aussi j'ai constaté que dans son ensemble, la spirale qu'elles décrivent alors est déviée par le vent et que, en définitive, l'oiseau s'en va à la dérive d'un mouvement plus ou moins rapide.

Même en la réduisant à ces limites, l'influence du vent sur le vol des oiseaux est encore difficile à expliquer. Elle se complique en effet de conditions très-multiples, dans lesquelles la vitesse acquise par l'Oiseau rencontrant, sous des angles variables, la direction du vent, donne naissance aux combinaisons de mouvement les plus variées.

On a dit encore qu'il règne dans les hautes régions de l'air des courants de sens variés, parfois même contraires à la direction du vent qui règne à la surface du sol. L'Oiseau, passant alors d'une couche dans une autre, pourrait trouver des forces qui le poussent dans les directions opposées.

En somme, la question du vol à voile me semble une des plus difficiles à résoudre; il serait téméraire de condamner absolument l'opinion des observateurs en s'appuyant sur une théorie et sur des notions aussi vagues que celles que nous possédons sur ce sujet.

RAPPORT DE LA SURFACE DES AILES AU POIDS DU CORPS DE L'OISEAU. — Un des points les plus intéressants de la conformation des Oiseaux consiste dans la détermination du rapport des surfaces alaires avec le poids de l'animal. Existe-t-il un rapport

constant entre ce poids et ces surfaces? Cette question a été l'objet de nombreuses controverses.

Il est déjà démontré que si l'on comparait des Oiseaux d'espèces très-différentes et de poids égal, on pourrait trouver que les uns ont des ailes trois ou quatre fois plus étendues que les autres. Les Oiseaux à grandes surfaces sont ceux qui se livrent le plus ordinairement au *vol plané* et qu'on a appelés voiliers, tandis que ceux dont l'aile est courte ou étroite sont plus ordinairement condamnés au *vol ramé*.

Mais si l'on compare deux Oiseaux rameurs entre eux ou deux Oiseaux voiliers ; si, pour mieux faire encore, on les choisit dans une même famille, afin de n'avoir entre eux que des différences de taille, on trouvera un rapport assez constant entre les poids de ces Oiseaux et la surface de leurs ailes. Mais la détermination de ce rapport doit être basée sur certaines considérations qui ont longtemps échappé aux naturalistes.

M. de Lucy a cherché, pour tous les êtres qui volent, à mesurer la surface des ailes et le poids de l'animal. Puis, afin d'établir une unité commune entre ces animaux d'espèces et de tailles si différentes, il rapportait toutes ces mesures à un type idéal dont le poids était toujours de 1 kilogramme. Ainsi, après avoir constaté que le Cousin qui pèse 3 milligrammes possède des ailes de 30 millimètres carrés de surface, il concluait que dans le type Cousin, le kilogramme d'animal était supporté par une surface alaire de 10 mètres carrés.

Dressant un tableau comparatif des mesures prises sur un grand nombre d'animaux d'espèces et de tailles différentes, il est arrivé aux chiffres suivants :

Espèces.	Poids de l'animal.	Surface des ailes.	Surface pour 1 kilogr.
Cousin . . . . .	3 milligr.	30 mm. carrés.	10 m. carrés.
Papillon . . . . .	20 centigr.	1663 mm. carr.	8 m. 1/3
Pigeon . . . . .	290 gram.	750 c. carr.	2586 c. carr.
Cigogne . . . . .	2265 gram.	4506 c. carr.	1988 c. carr.
Grue d'Australie.	9500 gram.	8543 c. carr.	899 c. carr.

De ces mesures, à travers des variations de détail, ressort ce fait bien saisissable : que les animaux de grande taille et de grand

poids se soutiennent avec une surface alaire beaucoup moindre que les petits.

Un pareil résultat montre déjà que le rôle de l'aile dans le vol n'est pas seulement passif, car un voile ou un parachute doivent toujours avoir des surfaces proportionnelles aux poids sur lesquels ils doivent agir. Considérée au contraire à son point de vue véritable, c'est-à-dire comme un organe qui devra frapper l'air, l'aile de l'Oiseau devra, ainsi qu'on va le voir, présenter une surface relativement moindre chez les Oiseaux de grande taille et de grand poids.

L'étonnement qu'on éprouve en présence du résultat des déterminations faites par M. de Lucy, disparaît en partie lorsqu'on songe qu'il y a une raison géométrique pour laquelle la surface alaire ne saurait croître en raison du poids de l'Oiseau. En effet, si nous supposons deux objets de même forme, deux cubes, par exemple, dont l'un serait deux fois aussi grand que l'autre (en diamètre), chacune des faces du grand cube sera quatre fois aussi grande que celle du petit; enfin le poids du grand cube sera huit fois celui du petit. Pour tous les solides géométriquement semblables, les dimensions linéaires étant dans un certain rapport, les surfaces croîtront comme les carrés et les poids comme les cubes de ce rapport; deux Oiseaux semblables de forme, mais dont l'un sera deux fois plus large d'envergure que l'autre, auront des ailes dans le rapport de 4 à 4 et des poids dans le rapport de 1 à 8. M. P. Demondésir exposant devant moi ces idées, croyait trouver là une raison qui limite la taille des Oiseaux capables de voler. Les plus grandes espèces d'Oiseaux, l'Autruche et le Casoar, ne volent pas, disait-il, et si ces Oiseaux avaient, proportionnellement à leur poids, autant de surface alaire qu'une Hirondelle, ils ne pourraient replier leurs ailes complètement et traîneraient derrière eux ces longs et embarrassants appendices.

Cette objection serait vraie dans la théorie du vol à voile, mais dans le vol ramé, l'amplitude du coup d'aile, croissant comme la taille de l'oiseau, multiplie la résistance que l'aile trouve sur l'air et la ramène à un rapport semblable à celui du poids des Oiseaux eux-mêmes.

Le docteur Hureau de Villeneuve, partant du même principe, a cherché à déterminer la surface d'aile qui pourrait faire voler une Chauve-souris dont le poids serait celui d'un Homme. Il a trouvé que chacune des ailes n'aurait pas 3 mètres de longueur.

Il a paru dans le cours de cette année un remarquable travail de Harting (1) sur l'étendue relative des ailes et le poids des muscles pectoraux chez les différentes espèces d'animaux vertébrés volants. L'auteur montre d'abord que l'on peut, dans la série des Oiseaux, établir l'existence d'un certain rapport entre la surface des ailes et le poids du corps. Mais il faut avoir soin de ne comparer que les éléments comparables, c'est-à-dire les longueurs des ailes, les racines carrées des surfaces alaires, et les racines cubiques des poids chez les différents oiseaux.

Soient  $l$  la longueur de l'aile;  $a$  son aire ou surface, et  $p$  le poids du corps, on pourra comparer entre eux  $l$ ,  $\sqrt{a}$  et  $\sqrt[3]{p}$ .

Opérant sur différents types d'Oiseaux, Harting fit des mensurations et des pesées desquelles on peut extraire le tableau suivant :

Nom de l'espèce.	Poids. $p.$	Surface. $a.$	Rapport. $\frac{\sqrt{a}}{\sqrt[3]{p}}$
1. <i>Larus argentatus</i> .....	565,0	544	2,82
2. <i>Anas nyroca</i> .....	508,0	324	2,26
3. <i>Fulica atra</i> .....	495,0	262	2,05
4. <i>Anas crecca</i> .....	275,5	444	1,84
5. <i>Larus ridibundus</i> .....	197,0	334	3,13
6. <i>Machetes pugnax</i> .....	190,0	164	2,23
7. <i>Rallus aquaticus</i> .....	170,5	104	1,81
8. <i>Turdus pilaris</i> .....	103,4	104	2,14
9. <i>Turdus merula</i> .....	88,8	106	2,31
10. <i>Sturnus vulgaris</i> .....	86,4	85	2,09
11. <i>Bombicilla garrula</i> .....	60,0	44	1,69
12. <i>Alauda arvensis</i> .....	32,2	75	2,69
13. <i>Parus major</i> .....	14,5	31	2,29
14. <i>Fringilla spinus</i> .....	10,1	25	2,33
15. <i>Parus cæruleus</i> .....	9,1	24	2,34

RAPPORT DU POIDS, etc. — Le poids des muscles pectoraux est au contraire dans un rapport simple avec le poids total de l'Oi-

(1) *Archives néerlandaises*, t. IV, 1869.

seau, et malgré les écarts qui correspondent aux divers degrés d'aptitude au vol dont chaque espèce est douée, on voit qu'il est environ de  $1/6$  dans le plus grand nombre des Oiseaux.

En résumé, chaque animal qui se soutient en l'air doit développer un travail proportionnel à son poids; il devra à cet effet posséder des masses musculaires proportionnées à ce poids; car, ainsi que nous l'avons vu, chapitre I<sup>er</sup>, si les actions chimiques qui se passent dans les muscles des Oiseaux sont toujours de même nature, ces actions chimiques et le travail qu'elles engendrent seront proportionnés aux masses musculaires.

Maintenant, comment se fait-il que des ailes dont la surface varie comme le carré des dimensions linéaires des Oiseaux suffisent à mouvoir des poids qui varient dans le rapport des cubes de ces dimensions. C'est ici qu'il faut faire intervenir la notion du *travail*, c'est-à-dire des résistances multipliées par les espaces qu'elles ont parcourus.

Admettons une vitesse uniforme pour l'abaissement de l'extrémité de l'aile chez les deux Oiseaux que nous comparons et qui ont, pour leurs dimensions linéaires, le rapport 1 à 2. La surface des ailes du gros Oiseau sera, nous avons dit, quatre fois plus grande que celle du petit; or, comme la résistance que l'air présente aux surfaces animées d'une même vitesse est proportionnelle à l'étendue de ces surfaces, si nous appelons  $r$  la résistance éprouvée par l'aile du petit Oiseau, elle sera  $4r$  pour le gros. Mais ces deux Oiseaux en abaissant leur aile n'exécuteront pas des battements de même amplitude; chez le gros Oiseau, chaque point de l'aile aura un parcours deux fois plus grand que le point homologue de l'aile du petit. Si donc nous appelons  $g$  l'espace parcouru par la résistance  $r$  que rencontre l'aile du petit Oiseau, on aura  $rg$  pour le travail accompli par lui et  $4r2g$  ou  $8rg$  pour le travail effectué par le gros oiseau. On voit donc que ce travail s'est accru dans les mêmes rapports que les poids des animaux que nous venons de comparer.

Enfin, une autre conclusion ressort des considérations qui précèdent. Si nous admettons que l'aile possède la même vitesse chez l'un et chez l'autre Oiseau, la durée du battement croîtra

avec l'espace parcouru par l'aile, c'est-à-dire qu'elle sera proportionnelle aux dimensions linéaires de l'Oiseau. L'observation justifie cette vue en montrant que les gros Oiseaux ont des battements plus rares que les petits.

On n'a pu, jusqu'ici, déterminer assez exactement le nombre des battements des ailes des Oiseaux pour savoir si leur fréquence présente un rapport exactement inverse de la taille de ces animaux; mais il est facile de voir que c'est dans ce sens que varie la fréquence des battements des ailes chez les Oiseaux de différentes tailles.

## CHAPITRE V.

Fréquence et rythme des mouvements de l'aile de l'Oiseau. — Méthode électrique pour mesurer le nombre et la durée des temps d'élévation et d'abaissement de l'aile. — Méthode myographique appliquée aux muscles pectoraux pendant le vol. — Appréciation, d'après la forme des tracés myographiques, des résistances que l'aile rencontre à chacun de ses mouvements.

La méthode graphique dont l'emploi était si facile pour la détermination de la fréquence des battements de l'aile de l'Insecte ne peut plus s'employer sur l'Oiseau dans les mêmes conditions. Il fallait établir entre l'Oiseau qui vole et l'appareil enregistreur une transmission de signaux.

**MÉTHODE ÉLECTRIQUE.** — La télégraphie électrique m'a servi d'abord; elle fournissait le moyen de résoudre les questions suivantes :

Quelle est la fréquence des battements de l'aile d'un Oiseau ?  
Quelle est la durée relative des temps d'élévation et d'abaissement de l'aile ?

L'expérience consiste à placer à l'extrémité de l'aile un appareil qui, à chacun des mouvements alternatifs qu'il reçoit, rompe ou ferme un circuit électrique. Sur le trajet de ce circuit est placé un appareil électro-magnétique qui écrit sur un cylindre tournant. La figure 26 montre ce mode de télégraphie appliqué à l'étude du vol d'un Pigeon, concurremment avec un autre

moyen de transmission de signaux. Dans cette figure, les deux fils électriques sont séparés l'un de l'autre.

La pointe écrivante tracera une ligne crénelée dont chacun des changements de niveau correspondra à un changement dans la direction du mouvement de l'aile. Pour que l'Oiseau vole le plus librement possible, un câble fin et souple, contenant deux fils conducteurs, établit la communication entre l'Oiseau et le télégraphe écrivant. Les deux bouts des fils sont adaptés à un petit appareil très-léger qui exécute par l'effet de la résistance de l'air une sorte de mouvement de soupape. Quand l'aile s'élève, la soupape s'ouvre, le courant est rompu, et la ligne du tracé télégraphique s'élève. Quand l'aile descend, la soupape se ferme, le courant se ferme aussi, et le tracé télégraphique s'abaisse.

Appliqué à différentes espèces d'Oiseaux, cet appareil permet de constater la fréquence propre aux mouvements de chacun d'eux. Le nombre d'espèces que j'ai pu étudier est encore assez restreint ; voici les chiffres que j'ai obtenus :

	Révolution de l'aile par seconde.
Moineau.....	13
Canard sauvage.....	9
Pigeon.....	8
Busard.....	5 3/4
Chouette effraie.....	5
Buse.....	3

La fréquence des battements varie du reste suivant que l'Oiseau est au départ, en plein vol, ou à la fin de son vol. Quelques Oiseaux présentent, comme on sait, des temps d'arrêt complet de leurs ailes, et planent en utilisant leur vitesse acquise.

La durée relative des deux temps de chaque révolution de l'aile est plus curieuse à étudier.

Contrairement à l'opinion émise par certains observateurs, la durée de l'abaissement de l'aile est plus longue, en général, que celle de l'élévation. L'inégalité de ces deux temps se prononce surtout chez les Oiseaux dont les ailes sont à grande surface et les battements peu fréquents. Ainsi, tandis que ces durées sont presque égales chez le Canard, dont les ailes sont très-étroites,

elles sont inégales chez le Pigeon et bien plus encore chez la Buse. Voici les chiffres réels :

	Durée totale d'une révolution de l'aile.		Ascension.	Descente.
Canard.....	6 2/3 centièmes de seconde.		3	3 2/3
Pigeon.....	7 1/2 —		3	4 1/2
Buse.....	24 1/2 —		8 1/2	13

Il est plus difficile qu'on ne pourrait le prévoir de déterminer l'instant précis où change la direction de la ligne tracée par le télégraphe. Les attractions et les relâchements du fer doux ont une durée appréciable si le cylindre noirci tourne avec la rapidité nécessaire pour la mesure des mouvements rapides qu'il s'agit d'analyser. Les inflexions de la ligne tracée par le télégraphe deviennent alors des courbes dont il est assez difficile de déterminer l'origine précise. Il y a donc une limite à la précision des mesures qu'on peut faire avec la méthode électrique; je crois qu'on ne peut estimer ainsi la durée d'un mouvement avec une approximation de moins de  $1/200^e$  de seconde.

Une autre espèce de signaux permet d'estimer la fréquence des battements de l'aile, en même temps qu'elle fournit l'indication de l'action successive des principaux muscles moteurs de l'aile.

MÉTHODE MYOGRAPHIQUE APPLIQUÉE AUX MUSCLES PECTORAUX. — J'ai indiqué en 1867 (1) une méthode de myographie applicable sans mutilation de l'animal sur lequel on expérimente. Elle consiste dans l'emploi du gonflement d'un muscle pour apprécier ses changements de longueur, c'est-à-dire sa contraction ou son relâchement. Tout muscle, en effet, étant sensiblement incompressible, ne peut changer de longueur sans que son diamètre transversal subisse des modifications de sens inverse. Un raccourcissement rapide ou lent, faible ou énergique du muscle, s'accompagnera donc d'un gonflement qui affectera les mêmes

(1) Voyez *Du mouvement dans les fonctions de la vie*. In-8, Paris, Germer Baillière.

caractères de vitesse ou d'intensité. A chaque abaissement de l'aile d'un Oiseau, le grand pectoral subira donc un gonflement qu'il s'agit de transmettre à l'appareil enregistreur.

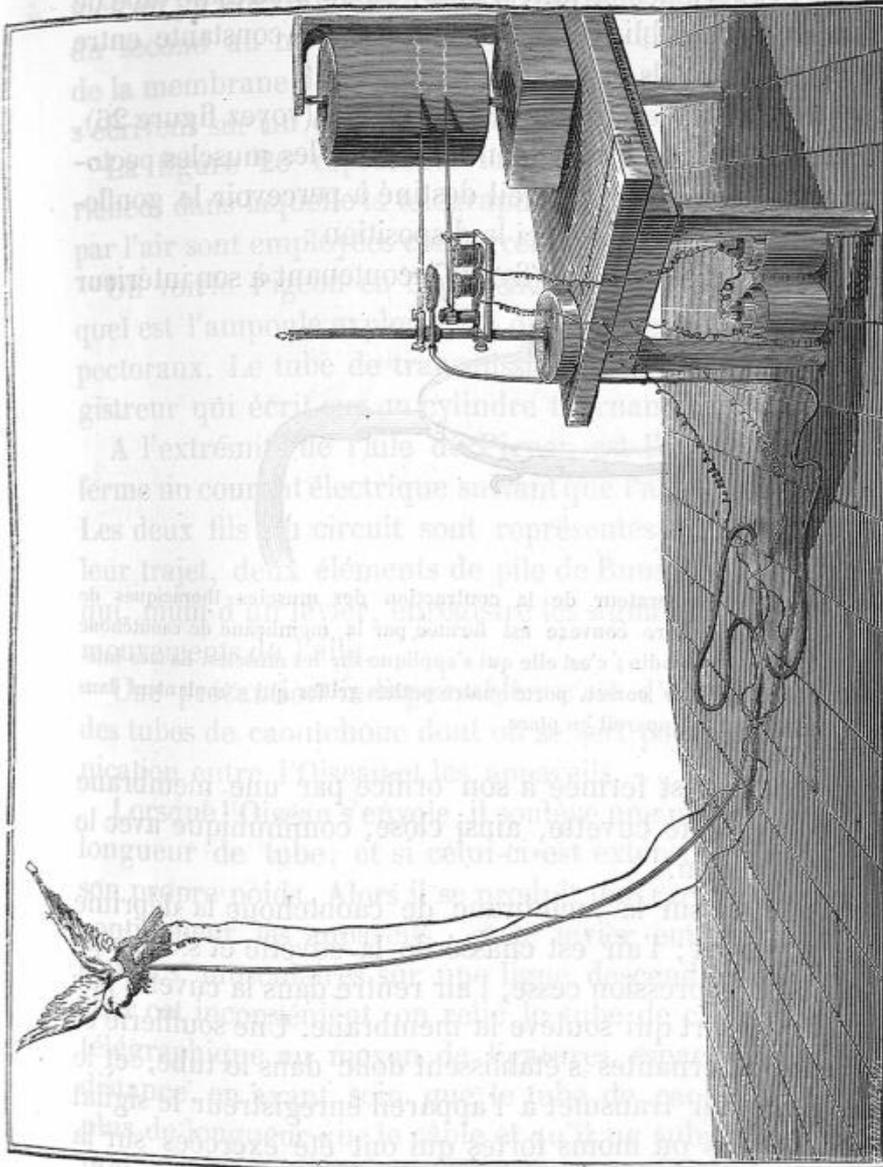


Fig. 26. — Appareil à doubles signaux pour enregistrer les mouvements de l'aile d'un Pigeon. D'une part, un tube transmet l'action musculaire; d'autre part, un signal électrique note, avec leurs durées relatives, les périodes d'élévation et d'abaissement de l'aile.

Je me sers, à cet effet, de la transmission par des tubes à air, moyen qui m'avait permis autrefois de transmettre à un enre-

gistréur placé à distance les battements du cœur, le pouls des artères, les mouvements de la respiration, etc. (1).

L'Oiseau vole dans un espace de 15 mètres carrés et de 8 mètres de hauteur. Les appareils enregistreurs étant placés au centre de la pièce où l'expérience se fait, il suffit de 12 mètres de tube de caoutchouc pour établir une communication constante entre l'Oiseau et les appareils.

Une sorte de corset est appliqué à un Pigeon (voyez figure 26). Sous ce corset, entre l'étoffe bien tendue et les muscles pectoraux, est glissé un petit appareil destiné à percevoir le gonflement des muscles, et dont voici la disposition :

Une petite cuvette de métal (fig. 27) contenant à son intérieur

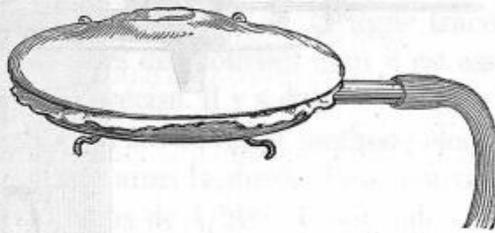


FIG. 27. — Appareil explorateur de la contraction des muscles thoraciques de l'Oiseau. La face supérieure convexe est formée par la membrane de caoutchouc soulevée par le ressort-boudin ; c'est elle qui s'applique sur les muscles. La face inférieure, en contact avec le corset, porte quatre petites griffes qui s'implantent dans l'étoffe et maintiennent l'appareil en place.

un ressort-boudin est fermée à son orifice par une membrane de caoutchouc. Cette cuvette, ainsi close, communique avec le tube de transmission.

Toute pression sur la membrane de caoutchouc la déprime ainsi que le ressort ; l'air est chassé de la cuvette et s'échappe par le tube. Si la pression cesse, l'air rentre dans la cuvette par l'élasticité du ressort qui soulève la membrane. Une soufflerie et une aspiration alternantes s'établissent donc dans le tube, et le mouvement de l'air transmet à l'appareil enregistreur le signal des pressions plus ou moins fortes qui ont été exercées sur la membrane de la cuvette.

(1) Voyez, pour les détails de la construction de ces appareils, *Du mouvement dans les fonctions de la vie*.

L'enregistreur est celui qui me sert dans toutes mes expériences. Il se compose également d'une cuvette fermée par une membrane de caoutchouc. L'intérieur de cette cuvette communique avec le tube de transmission (1). Les mouvements imprimés au premier appareil se transmettent donc à la membrane du second au moyen du va-et-vient de l'air. Les mouvements de la membrane de l'appareil récepteur, amplifiés par un levier, s'écrivent sur un cylindre enfumé.

La figure 26 représente la disposition générale de l'expérience, dans laquelle la télégraphie électrique et la transmission par l'air sont employées concurremment.

On voit le Pigeon en expérience muni de son corset, sous lequel est l'ampoule exploratrice des mouvements de ses muscles pectoraux. Le tube de transmission aboutit à un appareil enregistreur qui écrit sur un cylindre tournant.

A l'extrémité de l'aile du Pigeon est l'appareil qui ouvre ou ferme un courant électrique suivant que l'aile s'élève ou s'abaisse. Les deux fils du circuit sont représentés séparés ; on voit, sur leur trajet, deux éléments de pile de Bunsen et l'électro-aimant qui, muni d'un levier, enregistre les signaux télégraphiques des mouvements de l'aile.

Une précaution indispensable : c'est d'empêcher l'extension des tubes de caoutchouc dont on se sert pour établir la communication entre l'Oiseau et les appareils.

Lorsque l'Oiseau s'envole, il soulève une plus ou moins grande longueur de tube, et si celui-ci est extensible, il s'allonge par son propre poids. Alors il se produit une raréfaction de l'air que contiennent les appareils, et le levier enregistreur trace les courbes musculaires sur une ligne descendante. Pour empêcher cet inconvénient, on relie le tube de caoutchouc au câble télégraphique au moyen de ligatures espacées de distance en distance, en ayant soin que le tube de caoutchouc ait un peu plus de longueur que le câble et qu'il ne subisse jamais de traction. Ces précautions prises, rien ne s'oppose à la bonne trans-

(1) Voyez figure 26, l'appareil posée sur la table, et dont le levier est placé en haut.

mission des signaux. Il n'y a pas lieu de s'occuper de l'élasticité du tube de caoutchouc dans le sens transversal; les parois de ce tube sont assez épaisses pour que leur élasticité ne soit jamais mise en jeu par les faibles changements de pression que subit l'air intérieur.

*Expérience.* — On lâche l'Oiseau à l'une des extrémités de la salle, la volière dans laquelle on le tient d'ordinaire étant placée à l'extrémité opposée. L'Oiseau s'envole en se dirigeant habituellement vers sa volière sur laquelle il va se reposer. Pendant la durée du vol, on obtient les tracés représentés par la figure 28.

On voit que le tracé diffère suivant l'espèce d'Oiseau sur laquelle l'expérience a été faite. Toutefois, dans chacun des tracés, on observe le retour périodique de deux mouvements *a* et *b* qui se produisent à chaque révolution de l'aile.

A quoi tiennent ces deux actes musculaires?

Il est facile de reconnaître que l'ondulation *a* correspond à l'action du muscle élévateur de l'aile, et l'ondulation *b* à l'action de l'abaisseur.

On peut le prouver d'abord en recueillant, en même temps que le tracé musculaire, celui des mouvements d'ascension et de descente de l'aile transmis par l'électricité. Ces deux tracés superposés l'un à l'autre (fig. 29) montrent que le temps d'élévation de l'aile concorde avec la durée de l'ondulation *a*, et le temps d'abaissement avec l'ondulation *b*. Mais pour établir cette concordance, il faut tenir compte de l'inégale vitesse de transmission des signaux électriques et aériens. On peut considérer comme instantanée la transmission électrique, tandis que la transmission aérienne se fait sensiblement avec la vitesse du son dans l'air (334 mètres par seconde). Si les deux pointes des leviers enregistreurs sont verticalement placées l'une au-dessus de l'autre, les signaux ne seront pas exactement superposés, le signal électrique précédera l'autre d'une distance qui correspondra à une certaine fraction de seconde suivant la longueur de tube qu'on aura employée.

On pourrait déduire, de la longueur même du tube à air, le retard de sa transmission, mais il est plus sûr de le déterminer

spécialement pour le tube dont on se sert. Dans une expérience préalable, on enregistre un mouvement transmis à la fois par

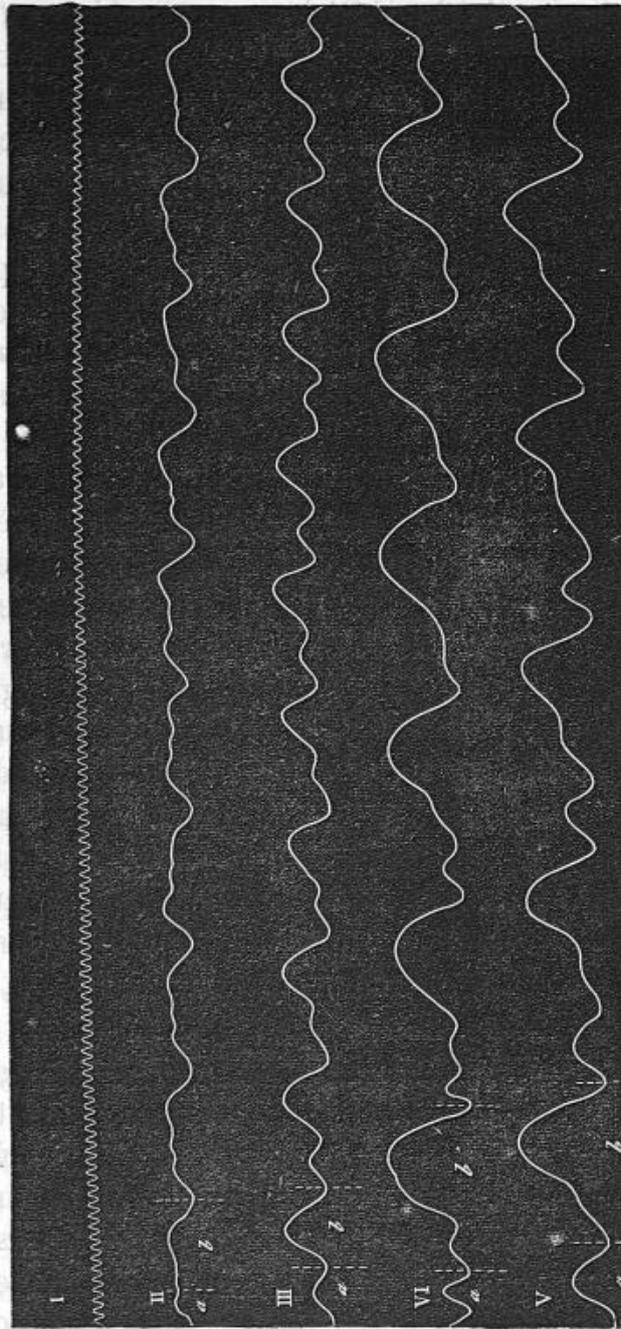


Fig. 28. — Tracés myographiques des pectoraux obtenus sur différentes espèces d'Oiseaux pendant le vol. — Ligne I, diapason chronographe destiné à mesurer la durée absolue de chaque mouvement musculaire ; ce diapason vibre 200 fois par seconde. — Ligne II, tracé des muscles du Pigeon ; ce tracé a été recueilli dans les conditions représentées figure 96. — Ligne III, tracé du Canard sauvage. — Ligne IV, tracé du Busard. — Ligne V, tracé de la Buse.

l'électricité et par le tube à air, et l'on mesure l'écart des deux signaux. Dans l'appareil dont je me suis servi, cet écart constant

était de  $4/100^{\text{es}}$  de seconde ; j'ai dû, en conséquence, faire rétrograder chacun des signaux électriques d'une même longueur pour qu'il concorde avec le signal aérien correspondant.

La figure 29 montre la superposition des deux signaux après la correction. Ces tracés sont recueillis sur la base.

Il est facile de comprendre comment se produisent les ondulations *a* et *b* dans tous les tracés musculaires des Oiseaux. En effet, au niveau de la région explorée et près de l'arête du sternum, il existe deux plans musculaires distincts : le plus superficiel est formé par le grand pectoral, ou abaisseur de l'aile ; le plus profond par le pectoral moyen, ou élévateur de l'aile, dont le tendon passe derrière la fourchette du sternum pour s'attacher à la tête de l'humérus. Les deux muscles superposés agiront par leur gonflement sur l'appareil qui est appliqué sur eux ; l'élévateur de l'aile, se gonflant lorsqu'il se contracte, signale son action par l'ondulation *a* ; le grand pectoral signale

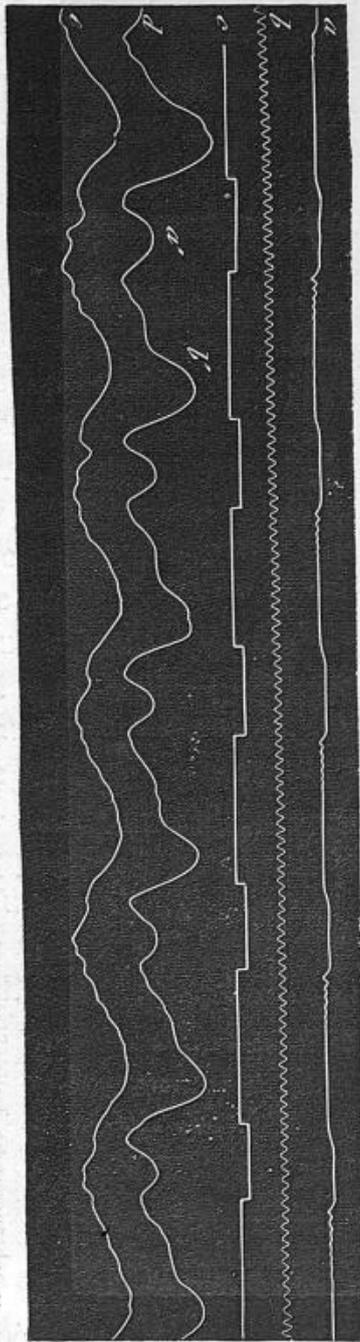


Fig. 29. — Ligne supérieure *a*, tracé électrique des élévations et abaissements de l'aile de la Buse : ce tracé est tel que l'appareil le fournit. — Ligne *b*, tracé d'un diapason de 200 vibrations par seconde. — Ligne *c*, correction du tracé électrique, dont les signaux ne présentent pas des décalés assez nets dans la figure obtenue directement. — Ligne *d*, tracés musculaires de la Buse : *a'*, action de l'élévateur de l'aile ; *b'*, action de l'abaisseur. — La ligne *c* ne doit pas ici préoccuper le lecteur, elle montre le tracé des oscillations de l'Oiseau dans la verticale pendant le vol.

l'abaissement de l'aile par l'ondulation *b*.

On peut vérifier encore l'exactitude de cette explication au moyen d'une expérience très-simple. L'anatomie nous montre que le muscle élévateur de l'aile est étroit et ne double l'abaisseur que dans sa partie la plus interne, située le long de la crête du sternum. De sorte que si l'on déplace le petit appareil qui explore le mouvement de ces muscles, et si on le porte plus en dehors, il occupera une région où l'abaisseur de l'aile n'est plus doublé de l'élévateur, et le tracé ne présentera plus qu'une ondulation simple, celle qui correspond à *b* dans les figures.

Il est donc bien démontré que les ondulations *a* et *b*, dans les tracés musculaires des Oiseaux sur lesquels j'ai expérimenté, correspondent exactement à l'action des principaux muscles élévateurs et abaisseurs de l'aile ; mais on ne saurait attacher une grande importance à la forme de ces tracés pour en déduire la nature précise du mouvement exécuté par le muscle. Ces mouvements semblent, en effet, chevaucher l'un sur l'autre. De sorte que le relâchement de l'élévateur n'est probablement pas complet lorsque l'abaisseur commence à agir.

Ne demandons d'abord à ces tracés que ce qu'ils fournissent le plus naturellement, à savoir : le nombre des révolutions de l'aile, le plus ou moins de régularité de ces mouvements, l'égalité ou l'inégalité et l'énergie de chacun d'eux.

Or, en restreignant la question dans ces limites, l'expérience



Fig. 30. — Montrant les différences d'amplitude et de fréquence des battements de l'aile d'un Pigeon pendant un vol de 15 mètres de longueur. A gauche de la figure, on voit les grands mouvements qui signalent le début du vol. (Ce tracé a été recueilli sur un cylindre dont la rotation était peu rapide, ce qui permet d'obtenir un plus grand nombre de mouvements dans un court espace.)

montre que les battements de l'aile de l'Oiseau diffèrent d'amplitude et de fréquence dans les différents instants du vol.

Au départ, les battements sont plus rares, mais plus énergiques; ils atteignent, après deux ou trois coups d'aile, un rythme régulier qu'ils perdent au moment où l'animal va se reposer (fig. 30).

Nous retrouverons dans d'autres expériences des indications plus complètes sur les variations du mouvement de l'aile aux différents moments du vol.

*Appréciation, d'après la forme des tracés myographiques, des résistances que l'aile rencontre à chacun de ses mouvements.* — Telles sont les indications certaines qu'on peut tirer de la méthode des signaux établis entre les muscles de l'Oiseau qui vole et l'appareil enregistreur du mouvement de ces muscles. Mais s'il est sage de restreindre les conclusions de ces expériences à ce qu'elles ont de plus rigoureux, il est permis, du moins, de rechercher si le tracé de ces muscles ne pourrait pas fournir de nouvelles données sur la nature du mouvement qu'ils exécutent.

J'ai démontré ailleurs (1) que la forme du mouvement que produit un muscle, lorsqu'il est soumis à une excitation quelconque, varie suivant les résistances que ce mouvement rencontre.

Ainsi, en appliquant au myographe un muscle de Grenouille, j'ai vu que si un obstacle arrête le raccourcissement du muscle, la durée de la secousse musculaire s'allonge en raison même de cet obstacle. De plus, la théorie fait prévoir que si le muscle présente, dans les différentes phases de son raccourcissement, certaines modifications qui lui soient imposées par l'inégalité des résistances à vaincre aux différents instants, le gonflement du muscle doit présenter aussi les mêmes phases.

Le tracé musculaire obtenu sur l'Oiseau peut donc, s'il est l'expression exacte du mouvement produit par le muscle, nous renseigner sur la nature des résistances que rencontre l'aile de

(1) *Du mouvement dans les fonctions de la vie*, p. 363.

l'Oiseau dans les différentes phases d'une de ses révolutions.

Prenons d'abord l'exemple le plus simple : En voyant que les masses musculaires qui ont pour action d'élever l'aile et celles qui sont chargées de l'abaisser sont très-inégales en volume, on peut supposer que si la résistance était égale dans ces deux temps de l'action de l'aile de l'Oiseau, la durée de l'élévation excéderait beaucoup celle de l'abaissement. Et comme c'est le contraire qui a lieu, on doit conclure que l'aile remontante ne frappe pas l'air, mais qu'elle le coupe vraisemblablement par son bord tranchant, de façon que la résistance soit très-faible à la montée et très-forte à la descente de l'aile.

Si nous examinons maintenant le tracé de l'abaisseur de l'aile, nous y pourrions trouver, dans certaines limites, l'expression des différentes résistances que l'aile rencontre aux différentes phases de son abaissement. Mais, pour bien comprendre la signification des différentes formes du mouvement musculaire, il faut, par des expériences préalables, déterminer l'effet de certaines résistances, d'une nature spéciale, qu'on pourrait appeler les résistances élastiques.

Prenons un muscle de Grenouille ; appliquons-le au myographe, et provoquons en lui une secousse au moyen de l'électricité. La forme de cette secousse variera de la manière suivante sous l'influence des résistances de différentes natures qui s'opposeront à l'action du muscle.

Si le muscle est chargé d'un poids, il donnera le tracé suivant *a* (fig. 31) :

S'il rencontre, après les premiers instants de son raccourcissement, un obstacle absolu à toute nouvelle diminution de longueur, il donnera le tracé *b*. Enfin, s'il rencontre un obstacle élastique, un fil de caoutchouc par exemple, qui présente une résistance surmontable, le muscle donnera la courbe *c*.

Il semble que ces différentes formes suffisent à caractériser la nature des résistances que la secousse musculaire a dû vaincre.

Dans le premier cas, c'était l'inertie d'une masse ; or, cette masse, soumise pendant un temps borné à la force musculaire,

a dû prendre un mouvement accéléré d'abord, puis diminué ; c'est précisément ce qui indique la forme de la courbe *a*.

Dans le deuxième cas, il n'est pas besoin d'expliquer comment la ligne horizontale qui forme le sommet de la secousse *b* exprime la cessation de tout raccourcissement en présence de l'obstacle absolu que le muscle a rencontré. Enfin, dans la courbe *c*, la présence d'un obstacle se traduit par une inflexion de la courbe, c'est-à-dire par un changement dans la vitesse du mouvement

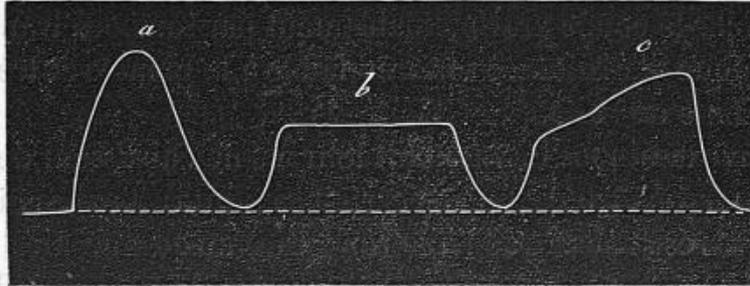


FIG. 31.

qui se produit ; mais le raccourcissement ne cesse pas, puisque l'obstacle est surmontable ; seulement il devient plus lent, à cause de la résistance plus grande qui se présente.

J'ai pu m'assurer que, dans l'expérience précitée, le gonflement du muscle présentait les mêmes phases que son changement de longueur. En effet, j'ai transmis au myographe le mouvement produit par le gonflement musculaire, et j'ai obtenu des tracés identiques avec les précédents.

Enfin, voulant savoir si l'appareil dont je me sers pour explorer les muscles de l'Oiseau transmet bien fidèlement les différentes phases du gonflement d'un muscle, j'ai fait l'expérience suivante :

Sur un de mes muscles biceps, j'appliquai le petit tambour explorateur qui a servi à recueillir sur l'Oiseau les mouvements dont on a vu les tracés figure 28. Je fixai exactement ce tambour sur mon muscle au moyen d'une bande roulée, et je le mis en communication avec l'appareil enregistreur. J'exécutai alors des mouvements volontaires, très-brusques et aussi semblables entre eux que je pouvais le faire ; mais j'appliquai à ces mouvements

des résistances variées. Dans un cas, c'était un poids que j'avais à soulever ; dans un autre, ma main rencontrait le dessous d'une lourde table et s'arrêtait contre cet obstacle absolu ; dans l'autre enfin, après une courte flexion de mon avant-bras, ma main se trouvait retenue par un lien de caoutchouc, et elle ne pouvait s'élever qu'avec un effort plus énergique du biceps.

Or, les tracés qui exprimaient le gonflement de mon biceps dans ces trois expériences reproduisaient les trois types représentés figure 31, et montraient bien que les mouvements volontaires eux-mêmes sont soumis à l'influence des résistances de différente nature qu'ils ont à surmonter.

J'essayais de commander à mes muscles des mouvements identiques dans tous les cas. Ainsi, c'était toujours une flexion vigoureuse et de courte durée que je voulais reproduire, mais la nature de la résistance modifiait ces actes musculaires qui intentionnellement étaient semblables entre eux, et leur imprimait les variétés de phases et de durée que je viens de signaler.

Ceci posé, revenons au tracé musculaire du grand pectoral

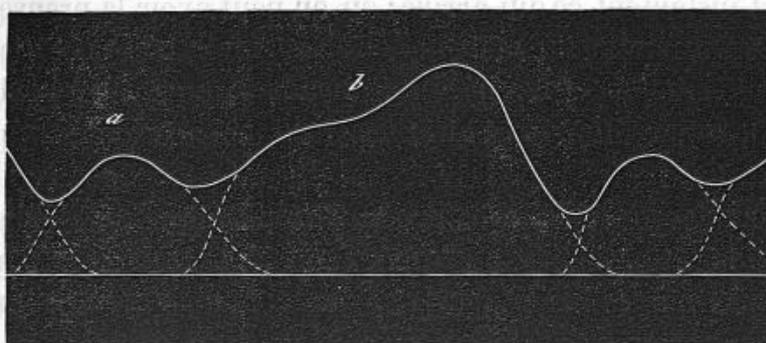


FIG. 32. — Tracé des muscles d'une Buse pendant le vol : *a*, action du muscle élévateur ; *b*, action de l'abaisseur. Les lignes ponctuées qui descendent jusqu'à l'axe des abscisses complètent la forme probable des mouvements des deux muscles de l'aile.

de l'Oiseau. J'ai dit que l'origine réelle de ce mouvement est indéterminée ; l'élévateur de l'aile n'a pas repris entièrement sa forme de repos lorsque l'abaisseur commence à agir, et si l'on voulait représenter la courbe probable de l'action de ces deux muscles, d'après ce que la myographie nous a appris, il faudrait

compléter le tracé au moyen de lignes ponctuées, comme dans la figure 32.

Cette construction une fois faite, la forme des courbes de l'élevateur et de l'abaisseur révèle la nature des résistances que chacun de ces muscles a rencontrées.

La courbe *a* de l'élevateur de l'aile est celle que produit un muscle qui agit sur un poids; elle semble indiquer que l'inertie de l'aile est le seul obstacle que doit surmonter le muscle élévateur. La courbe *b* nous montre une inflexion à partir de laquelle le raccourcissement du muscle prend un mouvement plus lent. C'est donc là qu'interviendrait la résistance de l'air; les choses se passeraient donc de tout point comme dans les expériences que j'ai faites sur les muscles de Grenouille et sur mes propres muscles.

Mais, dira-t-on, pourquoi cette inflexion de la courbe ne se produit-elle que si tard? Le muscle abaisseur de l'aile peut donc se raccourcir pendant un certain temps, et d'une manière rapide, avant de rencontrer cette résistance de l'air qui ralentit son mouvement?

C'est justement ce qui arrive; on en peut avoir la preuve dans la disposition anatomique des attaches du muscle grand pectoral. On verra dans le chapitre suivant comment se produit le mouvement de l'humérus autour de son articulation; disons seulement que, dans le premier temps de son action, le grand pectoral, en se raccourcissant, produit un pivotement de l'aile autour de la tête humérale, et que, dans ce premier mouvement, le muscle n'éprouve pas la résistance de l'air qui viendra un instant plus tard ralentir son raccourcissement.

Le lecteur trouvera peut-être que voilà bien des déductions tirées à propos de la forme des courbes musculaires. Mais ceux qui voudront bien se familiariser avec l'emploi des appareils enregistreurs du mouvement, et en particulier avec le myographe, se convaincront bientôt que, dans la forme des courbes, rien n'est livré au hasard, mais que les détails doivent trouver leur explication dans les conditions dynamiques de la production du travail musculaire.

## CHAPITRE VI.

Des mouvements que l'aile de l'Oiseau exécute pendant le vol.

On a vu, à propos du mécanisme du vol chez l'Insecte, que l'expérience fondamentale a été celle qui a révélé le parcours de la pointe de l'aile à chacune de ses révolutions. La connaissance du mécanisme du vol découlait, pour ainsi dire, naturellement de cette première notion.

Pour le vol de l'Oiseau, la même détermination est également indispensable; mais la méthode optique devient ici inapplicable. En effet, le mouvement d'une aile d'Oiseau, bien que trop rapide pour être saisissable à l'œil, ne l'est pas assez pour fournir une impression rétinienne persistante de son parcours entier.

La méthode graphique, telle que je l'ai employée jusqu'ici, ne fournit que l'expression des mouvements qui se passent suivant une ligne droite, et ce n'est qu'en combinant ce mouvement rectiligne avec la translation uniforme d'une surface enfumée, qu'on obtient l'expression de la vitesse avec laquelle le mouvement s'effectue à chaque instant.

Le problème qui se pose est celui-ci : Trouver le moyen d'enregistrer sur un plan immobile tous les mouvements que fait dans l'espace la pointe de l'aile de l'Oiseau; comme si à l'extrémité de l'aile on avait placé un pinceau, et que ce pinceau frotiât sur une feuille de papier placée à sa portée. Encore faudrait-il, pour avoir une figure de même nature que la figure lumineuse de l'aile dorée d'un Insecte, que la feuille de papier fût immobile par rapport au centre de mouvement de l'aile de l'Oiseau qui vole; autrement dit, qu'elle suivît, dans toutes ses phases, la translation de l'Oiseau dans l'espace.

Or, la physique nous apprend que tout mouvement susceptible d'être enregistré sur un plan peut être engendré par la combinaison rectangulaire de deux mouvements rectilignes. Les tracés que Kœnig a obtenus en armant d'un stylet les verges vibrantes de Wheatstone, les figures lumineuses des accords musicaux que M. Lissajous produit par la réflexion d'un faisceau lumineux sur

deux miroirs vibrants perpendiculairement l'un à l'autre, sont des exemples bien connus de la formation d'une figure plane au moyen de deux mouvements rectilignes.

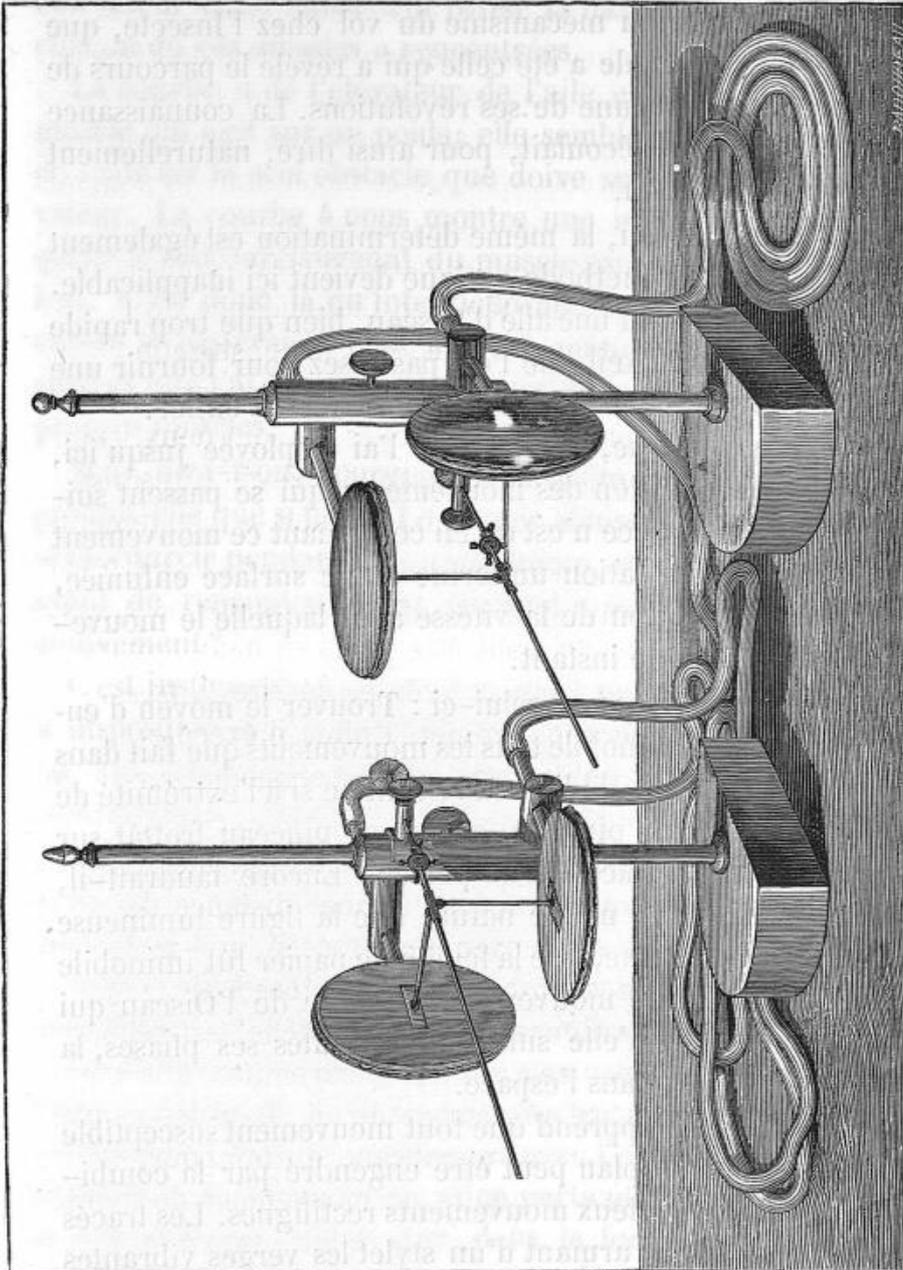


Fig. 33. — Appareil destiné à transmettre à un levier tous les mouvements qu'un autre levier exécute autour de l'une de ses extrémités.

Ainsi, en admettant qu'on puisse transmettre à la fois les mou-

vements d'élévation et d'abaissement que l'aile de l'Oiseau exécute, aussi bien que les mouvements que fait cet organe d'avant en arrière et d'arrière en avant; en supposant qu'une pointe écrivante puisse recevoir simultanément l'impulsion de ces deux mouvements perpendiculaires entre eux, cette pointe écrira sur le cylindre la figure exacte des mouvements de l'aile de l'Oiseau.

J'ai cherché d'abord à réaliser l'appareil qui transmettrait ainsi à distance un mouvement quelconque et l'enregistrerait sur un plan, sans me préoccuper de la façon dont je pourrais appliquer sur l'Oiseau cette machine plus ou moins pesante. La figure 33 représente ce premier appareil d'essai, dont la description est indispensable pour faciliter l'intelligence de la machine définitive dont je donnerai plus tard la construction.

Sur deux pieds solides portant des supports verticaux, on voit deux tiges horizontales parallèles entre elles. Ce sont deux leviers d'aluminium qui devront, grâce aux appareils de transmission que je vais décrire, exécuter tous deux les mêmes mouvements. Chacun de ces leviers est monté sur un Cardan, c'est-à-dire sur une double articulation qui leur permet toute espèce de mouvements: ainsi, chaque levier peut être porté en haut, en bas, à droite, à gauche; il peut, par sa pointe, décrire la base d'un cône dont le Cardan sera le sommet. Enfin, il exécutera toute espèce de mouvement qu'il plaira à l'expérimentateur de lui imprimer.

Il faut maintenant établir la transmission des mouvements d'un des leviers à l'autre, et cela à une distance de 10 à 15 mètres. Cela se fait au moyen du procédé que le lecteur connaît déjà: l'emploi des tambours et des tubes à air.

Le levier qui, dans la figure, se voit à gauche, est relié, par une tige métallique articulée à ses deux extrémités, à la membrane d'un tambour placé au-dessous de lui. Dans les mouvements verticaux du levier, la membrane du tambour, tour à tour abaissée ou soulevée, produira un mouvement de soufflerie qui se transmettra par un long tube à air jusqu'à la membrane d'un tambour semblable appartenant à l'appareil de droite. Ce second tambour placé au-dessus du levier qui lui

correspond, et articulé avec lui, transmettra fidèlement tous les mouvements verticaux qui auront été imprimés au tambour n° 1 (celui de gauche). Ces mouvements seront de même sens dans les deux leviers, grâce à l'inversion de la position des tambours. En effet, supposons qu'on abaisse le levier n° 1 ; on enfonce la membrane du tambour qui est au-dessous de lui ; il se produit une soufflerie qui soulève la membrane du second tambour, et conséquemment abaisse le levier n° 2. Inversement, l'élévation du levier n° 1 produira une aspiration d'air qui élèvera la membrane et le levier n° 2.

En procédant de la même manière pour la transmission des mouvements dans le plan horizontal, j'ai placé, à droite de l'un des leviers et à gauche de l'autre, un tambour dont la membrane, située dans le plan vertical, imprime à ces leviers les mouvements de latéralité, la transmission de ces mouvements se faisant par un tube spécial de 10 mètres de long, comme le précédent.

L'appareil étant ainsi construit, si l'on prend dans les doigts l'extrémité d'un des leviers, et qu'on lui imprime des mouvements quelconques, on verra l'autre levier exécuter ces mouvements avec une fidélité parfaite.

Toute la différence consiste en une diminution légère de l'amplitude du mouvement dans le levier qui obéit. Cela tient à ce que l'air contenu dans chacun des systèmes de tubes et de tambours se comprime un peu, et par conséquent ne transmet pas la totalité du mouvement qu'il reçoit. Il serait facile de remédier à cet inconvénient, si c'en était un, en sensibilisant l'appareil récepteur, ce qui se fait en plaçant le Cardan un peu plus près du point où le mouvement se transmet au levier du second appareil. Mais il est préférable de ne pas chercher une trop grande amplification des mouvements lorsqu'on veut les écrire, car on augmente alors les frottements et l'on diminue la force qui devra les surmonter.

Après avoir constaté que la transmission d'un mouvement quelconque s'effectue d'une manière satisfaisante au moyen de cet appareil, j'ai cherché le moyen d'écrire ce mouvement sur

un plan. La difficulté qui s'était déjà présentée lorsque j'avais voulu appliquer la méthode graphique à l'étude du mouvement de l'aile de l'Insecte se représente ici; mais, cette fois, il n'y avait plus moyen de l'élucider et de me contenter de tracés partiels. La pointe du levier n° 2 décrit dans l'espace une figure sphérique incapable d'être tangente autrement qu'en un point à la surface enfumée qui devait recevoir le tracé. En conséquence, j'ai dû enregistrer la projection de cette figure sur le plan. Helmholtz s'était trouvé autrefois en présence de la même difficulté dans la construction de son myographe, et il l'avait résolue en forçant, au moyen d'un poids, la pointe du style écrivant à venir frotter sans cesse sur la surface enfumée. Mais comme je ne pouvais charger d'un poids l'extrémité de mon levier, je recourus à l'emploi d'un ressort disposé de la façon suivante :

La figure 34 montre, à l'extrémité du levier, le ressort en

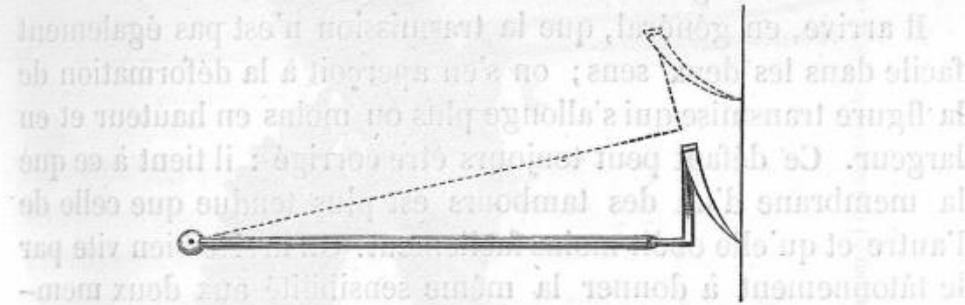


FIG. 34. — Pointe élastique traçant sur une glace enfumée.

question. Il est large à la base, afin de résister à toute tendance aux déviations latérales sous l'influence des frottements; cette base est fixée sur une pièce verticale d'aluminium, qui, par en bas, s'attache à l'extrémité du levier. De cette façon, la pointe du ressort qui fait l'office de style se trouve sensiblement sur le prolongement du levier dont elle enregistrera les mouvements. Supposons que le levier s'élève et prenne la position indiquée par la ligne ponctuée dans la figure 34; en parcourant cet espace, il aura décrit un arc de cercle, et son extrémité ne sera plus sur le même plan que tout à l'heure, mais l'élasticité

du ressort aura porté plus en avant la pointe écrivante; celle-ci continuera donc à être en contact avec le plan sur lequel elle doit écrire. Ainsi, le levier s'allonge ou se raccourcit suivant le besoin et sa pointe frotte toujours sur le plan. J'ajoute que la surface sur laquelle je reçois les tracés est une glace bien polie, et que le ressort que j'emploie est d'une telle souplesse, que la pression élastique qu'il exerce sur cette glace ne donne presque pas de frottements.

L'appareil étant ainsi disposé, il faut le soumettre à une vérification, pour savoir si les mouvements sont bien fidèlement transmis et enregistrés.

Pour cela, munissant les deux leviers de la figure 33 de styles semblables, je place les pointes de ces styles contre une même glace enfumée; je conduis à la main l'un des leviers de manière à produire une figure quelconque, à signer mon nom, par exemple, et l'autre levier doit retracer la même figure, reproduire la même signature.

Il arrive, en général, que la transmission n'est pas également facile dans les deux sens; on s'en aperçoit à la déformation de la figure transmise qui s'allonge plus ou moins en hauteur et en largeur. Ce défaut peut toujours être corrigé: il tient à ce que la membrane d'un des tambours est plus tendue que celle de l'autre et qu'elle obéit moins facilement. On arrive bien vite par le tâtonnement à donner la même sensibilité aux deux membranes, ce qu'on reconnaît lorsque la figure directement tracée par le premier levier est identique avec celle que trace le second.

Voici les modifications au moyen desquelles j'ai rendu cette transmission applicable à l'étude des mouvements de l'aile d'un Oiseau qui vole.

L'appareil devant nécessairement avoir un assez grand poids, je pris un gros Oiseau pour le porter. De fortes Buses adultes me servirent dans mes expériences. A l'aide d'une sorte de corset qui laissait libres les ailes et les pattes, je fixai sur le dos de l'Oiseau une planchette de bois léger sur laquelle l'appareil était établi.

Pour que le levier exécutât fidèlement les mêmes mouvements que l'aile de l'Oiseau, le Cardan de ce levier devait être placé au contact de l'articulation humérale de la Buse. Or, comme la présence des tambours à côté du levier ne permettait pas ce contact immédiat, je recourus à l'emploi d'un parallélogramme qui

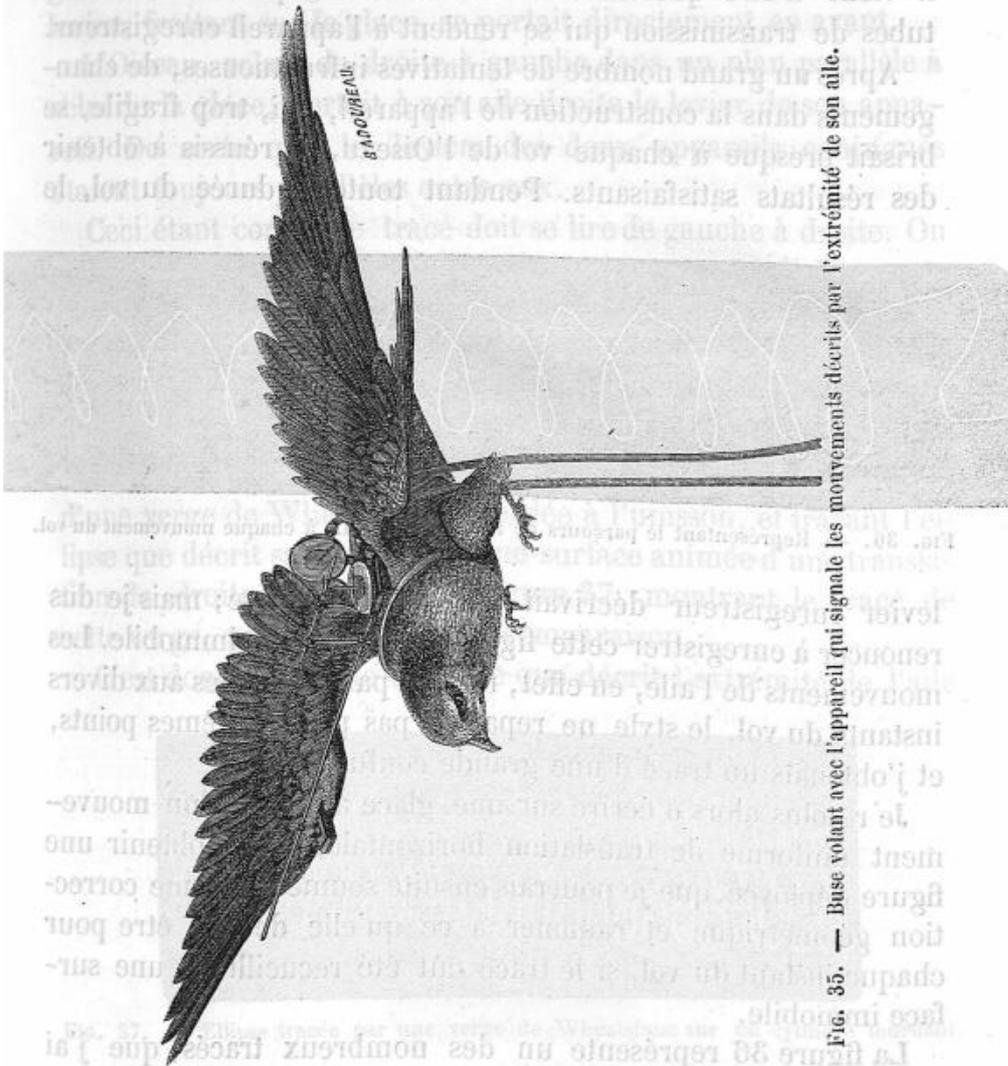


Fig. 35. — Buse volant avec l'appareil qui signale les mouvements décrits par l'extrémité de son aile.

transmettait au levier de l'appareil les mouvements d'une longue tige dont le centre de mouvement était très-voisin de l'articulation de l'aile de l'Oiseau. Enfin, pour obtenir la solidarité des

mouvements de la tige avec ceux de l'aile de la Buse, je fixai sur l'aile bâtarde, c'est-à-dire sur le métacarpien du pouce de l'Oiseau, une pince à écrou bien serrée, et munie d'un anneau dans lequel glissait la tige d'acier dont je viens de parler.

La figure 35 représente la Buse volant avec l'appareil dont il vient d'être question; au-dessous d'elle pendent les deux tubes de transmission qui se rendent à l'appareil enregistreur.

Après un grand nombre de tentatives infructueuses, de changements dans la construction de l'appareil, qui, trop fragile, se brisait presque à chaque vol de l'Oiseau, je réussis à obtenir des résultats satisfaisants. Pendant toute la durée du vol, le

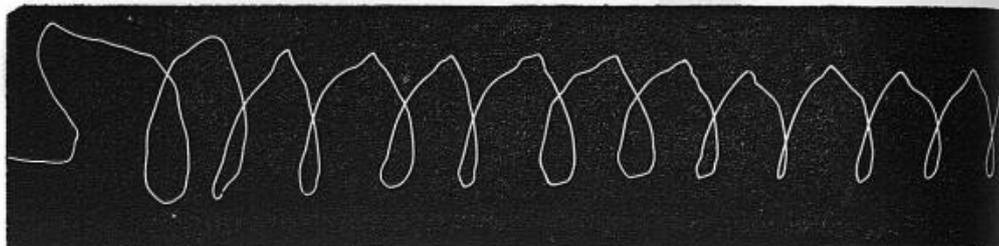


FIG. 36. — Représentant le parcours de la pointe de l'aile à chaque mouvement du vol.

levier enregistreur décrivait une sorte d'ellipse; mais je dus renoncer à enregistrer cette figure sur une glace immobile. Les mouvements de l'aile, en effet, n'étant pas les mêmes aux divers instants du vol, le style ne repassait pas par les mêmes points, et j'obtenais un tracé d'une grande confusion.

Je résolus alors d'écrire sur une glace animée d'un mouvement uniforme de translation horizontale, afin d'obtenir une figure déployée, que je pourrais ensuite soumettre à une correction géométrique et ramener à ce qu'elle devrait être pour chaque instant du vol, si le tracé eût été recueilli sur une surface immobile.

La figure 36 représente un des nombreux tracés que j'ai recueillis dans ces conditions. La parfaite ressemblance de ces tracés entre eux me donne toute confiance dans l'exactitude de chacun.

Pour analyser la signification de cette courbe, il faut savoir

comment l'Oiseau volait, comment les appareils étaient disposés, et dans quel sens se déplaçait la glace enfumée qui recevait le tracé.

L'observateur, étant placé en face de la glace et du côté où sa surface était enfumée, voyait cette glace marcher de droite à gauche; entre la glace et lui, était l'appareil écrivant dont le levier, frottant sur la glace, se portait directement en avant.

L'Oiseau, volant de droite à gauche dans un plan parallèle à celui de la glace, portait à son aile droite le levier de son appareil. De sorte que les leviers des deux appareils conjugués étaient toujours parallèles entre eux.

Ceci étant connu, le tracé doit se lire de gauche à droite. On voit déjà que le mouvement consiste en une sorte d'ellipse que la translation de la glace déploie en spirale. Les mouvements, très-étendus au début du vol, perdent peu à peu de leur amplitude et gardent quelque temps un caractère assez uniforme.

Cette figure ressemble assez à celle qu'on obtient au moyen d'une verge de Wheatstone accordée à l'unisson, et traçant l'ellipse que décrit sa pointe, sur une surface animée d'une translation de droite à gauche. La figure 37, montrant le tracé de cette verge, permet d'établir la comparaison,

C'est donc une sorte d'ellipse que décrit l'extrémité de l'aile

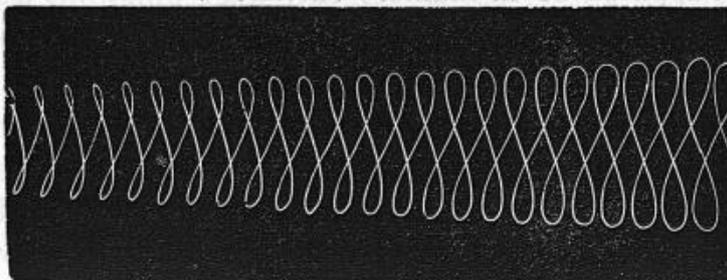


FIG. 37. — Ellipse tracée par une verge de Wheatstone sur un cylindre tournant.

de la Buse; mais il faut en déterminer la forme d'une façon plus exacte, et, à cet effet, corriger, pour les différents points du tracé, la déformation produite par la translation de la plaque.

Une pareille correction n'est possible que si l'on connaît la

vitesse avec laquelle se meut l'aile à chaque instant par rapport à la ligne des ordonnées de la courbe qu'elle décrit. En d'autres termes, il faut connaître les hauteurs auxquelles se trouve cette aile au bout d'instant successifs égaux entre eux. Cette notion une fois obtenue, si l'on trace des lignes parallèles horizontales dont chacune occupe la position de l'aile dans ces instants successifs, ces lignes viendront couper la courbe descendante, par exemple, en des points qui correspondent à des instants successivement égaux de son parcours. Il est clair que si ces points de la courbe ont été produits à des intervalles de temps égaux, chacun de ces points, sous l'influence de la translation uniforme de la plaque, aura été dévié, vers la droite, d'une quantité constante par rapport au point précédent.

La correction consistera donc à reporter vers la gauche le premier point d'une certaine quantité qui se déduit de la vitesse de translation de la plaque; à porter le second point vers la gauche de deux fois cette quantité; le troisième point, de trois fois cette même quantité, et ainsi de suite.

La partie ascendante de la courbe devra être soumise à la même correction, et ainsi de suite pour chaque portion du tracé.

Mais ce qui est inconnu, c'est précisément la hauteur à laquelle l'aile se trouve aux différents mouvements de son parcours ascendant ou descendant. Or, cette donnée peut être fournie par l'appareil de la manière suivante :

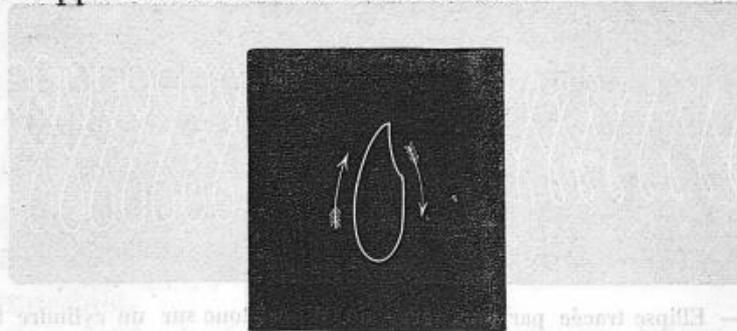


FIG. 38. — Tracé dans l'espace par l'extrémité de l'aile (abstraction faite de la translation de l'oiseau).

Puisque le principe de cet appareil repose sur la transmission de deux mouvements perpendiculaires entre eux, ceux qui se

ont dans le sens de la hauteur et ceux qui se font horizontalement, il suffit de supprimer la transmission des mouvements horizontaux pour avoir immédiatement la *courbe des hauteurs*, c'est-à-dire l'expression de la hauteur de l'aile à chaque instant de son parcours. Pour cela, je pince le tube de transmission latérale, je fais voler l'Oiseau, et j'obtiens la courbe des hauteurs de l'aile à tous les instants.

La correction étant faite et la figure 36 étant ramenée à ce que serait le parcours de la pointe de l'aile dans une de ses révolutions, projeté sur un plan immobile, on obtient la figure 38. Des flèches indiquent le sens dans lequel se fait le parcours de l'aile.

Cette forme appartient-elle à tous les Oiseaux, ou seulement à la Buse et dans les conditions de vol où elle était placée? Cette dernière supposition semble la plus probable : on peut même voir, en comparant la forme du tracé aux divers instants du vol de l'Oiseau dans la salle d'expérience, que l'ellipse était plus grande et surtout plus ouverte dans les premiers coups d'aile que dans les derniers (1).

*De la rotation de l'humérus et des changements du plan de l'aile pendant le vol.* — L'aile de l'Oiseau, comme celle de l'Insecte, doit, en frappant l'air de haut en bas, trouver une résistance suffisante pour soulever sa partie flexible : celle que forment, en arrière des os, les *rémyges* et les *couvertures*. Cette cause produit déjà un changement dans le plan de l'aile ; mais il en est une autre qui agit d'une manière beaucoup plus efficace, car elle place l'aile, dès le début de la phase d'abaissement, dans une position favorable à la double propulsion qu'elle doit produire. Je veux parler du pivotement que l'humérus exécute autour de son axe à chaque contraction du grand pectoral.

(1) Il faut en excepter le second coup d'aile qui, dans toutes les expériences que j'ai faites, m'a donné une ellipse plus étroite que toutes les autres. Je ne sais à quoi il faut attribuer cette forme spéciale qu'il m'a paru intéressant de signaler à cause de sa constance.

Il suffit de regarder la crête osseuse à laquelle s'insère le large tendon du muscle abaisseur de l'aile, et de considérer que cette crête occupe le bord antérieur de l'humérus, pour comprendre que l'action du grand pectoral, dont les fibres se portent en bas et en arrière, doit produire un mouvement de rotation de l'humérus autour de son axe longitudinal. La conformation de l'articulation humérale se prête parfaitement à ce mouvement. Enfin, l'existence de cette rotation est rendue plus nécessaire encore par la résistance que l'air présente à l'arrière de l'aile et oppose à l'abaissement de sa partie emplumée.

On pourra, si l'on veut, au moyen des appareils enregistreurs, signaler l'existence de ce mouvement et en mesurer l'étendue. Mais ces recherches m'ont paru devoir être ajournées, d'autant plus qu'elles nécessiteraient la construction d'appareils spéciaux, qu'elles exigent des expériences nombreuses, et qu'elles ne fourniraient, après tout, qu'un renseignement de peu d'importance. En effet, il est permis de déduire de l'attache des muscles la nature du mouvement qu'ils produisent, et cette déduction est ici particulièrement facile.

Toutefois, j'ai cherché à vérifier, par l'électrisation des muscles de l'Oiseau, l'existence de ce mouvement de rotation de l'humérus, et à en mesurer l'étendue.

Dans l'expérience décrite précédemment, et qui avait pour but de mesurer l'effort statique développé par la contraction du muscle grand pectoral, j'ai vu que l'humérus, à chaque excitation portée sur son muscle abaisseur, exécutait un mouvement de rotation sur son axe. J'ai planté dans l'os une tige perpendiculaire à l'humérus, et j'ai pu, d'après l'angle formé par les deux positions de cette tige, constater que la rotation correspondait sensiblement à un angle de 35 à 40 degrés chez la Buse.

Il semble que les limites de cet angle soient imposées toutes deux par les attaches des muscles élévateur et abaisseur de l'aile. Si l'on prend un Oiseau fraîchement disséqué, il suffit d'exercer une traction sur les deux muscles antagonistes pour voir que l'élévateur de l'aile élève ce membre de telle sorte que sa face

supérieure regarde un peu en arrière. L'action du muscle abaisseur change complètement cette position de l'aile, et porte sa face supérieure franchement en haut, peut-être même un peu en avant (1).

Mais, à coup sûr, la flexion des pennes sous l'influence de la résistance de l'air doit donner, au moment de la descente la plus rapide de l'aile de l'Oiseau, une inclinaison de son plan beaucoup plus prononcée.

De ces influences qui font changer le plan de l'aile de l'Oiseau pendant le vol, la plus difficile à mesurer, c'est celle qui provient de la pression de l'air sur les pennes. Peut-être ne serait-il pas impossible de construire des appareils capables de la mesurer; mais cet effet est si variable, en raison même des variations de la vitesse avec laquelle l'aile s'abaisse, que la mesure qu'on obtiendrait ne serait que l'expression d'un cas particulier.

Il est très-probable, au contraire, que le changement de plan qui provient de l'action des muscles, et qui tient à la position du tendon de l'élévateur et de celui de l'abaisseur de l'aile, est un phénomène beaucoup plus constant.

— On peut déjà prévoir l'action des deux mouvements de l'aile de l'Oiseau, d'après ce qui a été dit du mécanisme du vol chez l'Insecte. Il est clair que l'aile descendante aura le double effet de soulever l'Oiseau et de lui imprimer une vitesse de translation horizontale. Quant au coup d'aile ascendant, son rôle ne saurait être le même, puisque l'imbrication des pennes ne leur permet pas d'offrir à l'air une surface résistante.

Tout porte à croire que l'aile remontante coupe l'air par le tranchant de son bord antérieur; mais, ainsi qu'on va le voir, un autre phénomène se produit, qui soulève le corps de l'Oiseau pendant la remontée de l'aile: c'est la transformation de la vitesse que l'Oiseau a acquise pendant l'abaissement de l'aile. Cette vitesse se change en remontée par un mécanisme ana-

(1) Ces expressions *en haut* et *en bas* sont relatives à un plan qui couperait l'Oiseau en deux moitiés, l'une dorsale et l'autre ventrale, mais ce plan n'est sans doute pas tout à fait parallèle à l'horizon pendant le vol.

logue à celui qui soulève le jouet d'enfant que l'on nomme *cerf-volant*.

Dans une remarquable étude sur le vol des Oiseaux, M. Liais est arrivé, par l'observation et le raisonnement, à admettre cette théorie.

Les expériences qui vont être décrites fourniront, j'espère, des preuves en faveur de cette supposition.

Avant de quitter ce sujet, il faut encore signaler l'existence de certains autres mouvements chez les Oiseaux de petite taille; je veux parler des repliements et déploiements alternatifs de l'aile pendant le vol. Mais l'existence de ces mouvements ne semble pas être constante, l'œil n'en saurait apercevoir la moindre trace pendant le vol des grands Oiseaux, sur lesquels j'ai expérimenté.

Je négligerai donc la recherche de ces mouvements et de leurs effets possibles, sauf à restreindre mes conclusions au mécanisme du vol de certaines espèces d'Oiseaux déterminées.

#### CHAPITRE VII.

De la réaction produite par chaque mouvement de l'aile sur la masse de l'Oiseau. — Appareil destiné à apprécier les oscillations que l'Oiseau exécute dans le plan vertical pendant le vol. — Tracés des oscillations verticales recueillis sur différentes espèces d'Oiseaux. — Déterminations des différentes phases de la révolution de l'aile auxquelles correspondent les oscillations verticales de l'Oiseau. — Détermination des variations de la vitesse du vol. — Tracé simultané des deux ordres d'oscillations de l'Oiseau dans le vol.

L'étude des différents mouvements que l'aile exécute pendant le vol de l'Oiseau conduit nécessairement à la recherche de l'effet produit par chacun de ces mouvements. On pourrait tenter de déduire ces effets de la nature même des mouvements qui les engendrent, mais il est plus sûr de demander à l'expérimentation la solution de ce problème qui est assez compliqué.

Deux effets distincts sont produits pendant le vol : d'une part, l'Oiseau est soutenu contre la pesanteur ; d'autre part, il est soumis à une force propulsive qui le transporte d'un lieu à un autre. Mais l'Oiseau soutenu dans les airs y garde-t-il un niveau sen-

siblement constant, ou bien subit-il des oscillations dans le plan vertical? N'éprouve-t-il pas, par l'effet intermittent du battement de ses ailes, une série de remontées et de descentes dont l'œil ne saurait saisir la fréquence, ni l'étendue? — D'autre part, dans son transport horizontal, l'Oiseau n'est-il pas animé d'une vitesse variable? Ne trouve-t-il pas dans l'action de ses ailes une série d'impulsions qui donnent à son transport un mouvement saccadé?

Ces questions peuvent être résolues expérimentalement, et voici de quelle manière :

Puisque nous disposons d'un moyen qui permet d'envoyer à distance et d'écrire des mouvements qui consistent en une pression sur la membrane d'un tambour plein d'air, il faut chercher à ramener les mouvements que nous voulons connaître à une pression de ce genre.

Il faut que les oscillations que l'Oiseau peut exécuter dans le plan vertical produisent, sur la membrane d'un tambour, des pressions alternativement fortes ou faibles suivant que l'Oiseau monte ou descend. La même marche devra être suivie dans la recherche des variations de sa vitesse horizontale.

Supposons qu'un Oiseau qui vole porte, fixé sur le dos, un tambour métallique semblable à ceux que nous connaissons déjà. Que la membrane de ce tambour soit tournée en haut, et que cet instrument soit mis en communication par un long tube avec l'appareil enregistreur. La membrane du tambour, obéissant à tous les mouvements de l'Oiseau, ne produira aucun déplacement de l'air des appareils; le levier enregistreur restera immobile.

Mais si nous empêchions la membrane de subir tous les mouvements de l'Oiseau, si nous pouvions lui donner une tendance à garder un niveau constant, ce serait le tambour qui se déplacerait par rapport à la membrane, la soufflerie se produirait, et avec elle les signaux enregistrés par le levier.

Or, cette tendance à la conservation du plan horizontal, nous pouvons l'imposer à la membrane; il suffit de la charger d'une masse inerte; un disque de plomb, par exemple. — La figure 39

montre le tambour qui porte sur sa membrane une masse inerte. Cette masse est formée de disques de plomb, dont on peut ajouter ou retrancher un certain nombre jusqu'à ce que l'appareil réponde bien aux mouvements d'oscillation verticale qui lui sont imprimés.

Avec cette disposition, les mouvements de translation horizontale sont sans influence sur l'appareil, mais la moindre oscillation dans le sens vertical se traduit par un mouvement semblable du levier enregistreur. En effet, si le tambour s'élève, la masse inerte ne participant pas complètement à cette élévation déprime la membrane, absolument comme si cette masse avait été abaissée, le tambour étant immobile. Inversement, quand le tambour descend, l'inertie de la masse la fait rester en arrière du mouvement ; c'est comme si elle avait été soulevée, le tambour étant immobile.

Remarquons que le mouvement du levier enregistreur se trouve alors précisément du même sens que celui du tambour ; c'est-à-dire que si le tambour s'élève, le levier s'élève aussi. En plaçant un appareil de ce genre sur le dos d'un Oiseau qui vole, il peut arriver que, dans le mouvement des ailes, quelques plumes viennent à frotter sur la membrane du tambour, ce qui produirait de la confusion dans les signaux enregistrés.

Pour éviter cet effet, je couvre d'un grillage métallique la partie supérieure de l'appareil, et j'obtiens la disposition qui est représentée figure 39.

Le tambour est représenté tenu à la main par son tube de transmission qui, d'autre part, communique avec un levier enregistreur. Si l'on agite le tambour dans le plan vertical, on voit que le levier s'agite dans le même sens, du même rythme, et que l'amplitude des mouvements signalés est proportionnelle à celle des mouvements que l'on exécute avec la main. Si, au contraire, on imprime à l'appareil des mouvements de latéralité, ils restent sans effet sur le levier et ne donnent aucun signal.

Mais, dira-t-on, une masse inerte placée sur une membrane élastique tend à exécuter des vibrations propres. Il s'ensuit qu'indépendamment des mouvements d'oscillation de l'Oiseau, l'appa-

reil devra transmettre les vibrations mêmes de la masse de plomb

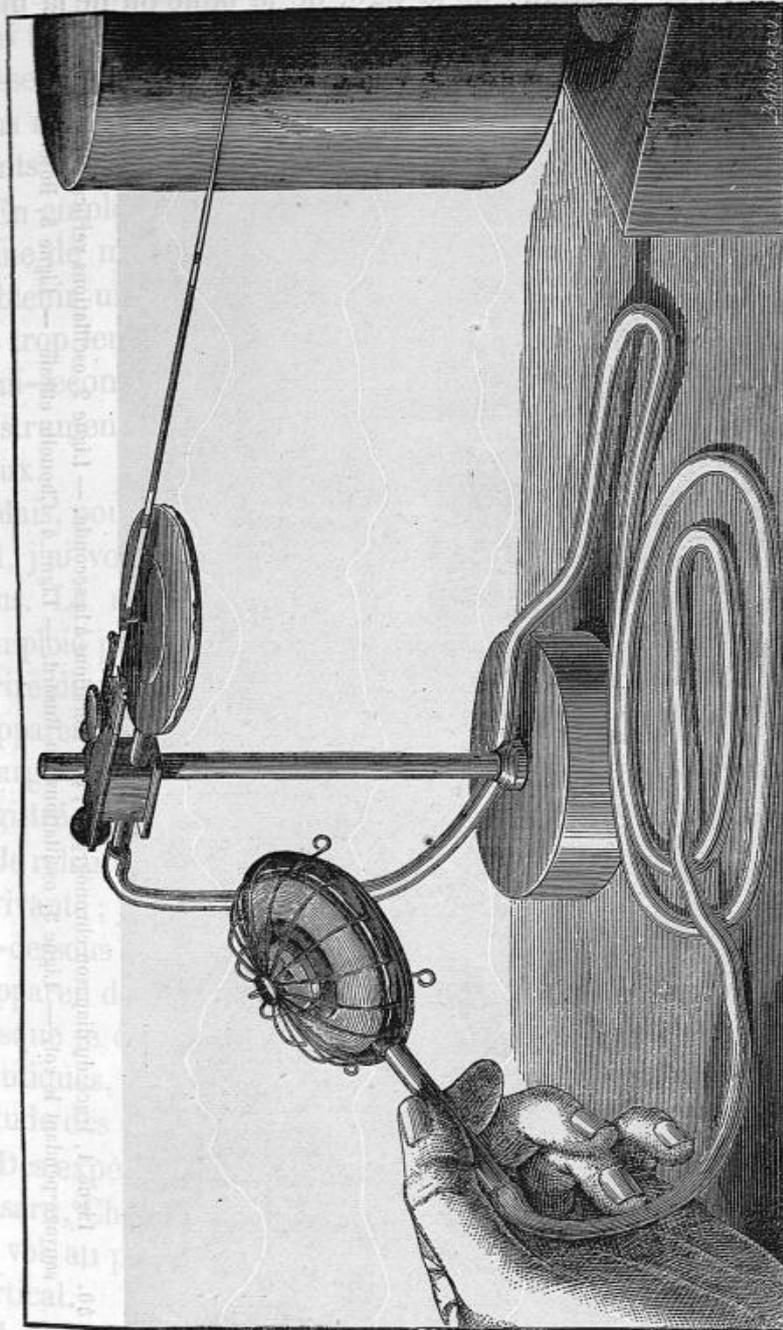


Fig. 39. — Appareil destiné à transmettre au levier enregistreur toutes les oscillations qui lui sont imprimées dans un plan vertical.

et de la membrane qui la porte. Comment se débarrasser de cette complication ?

Les lois des vibrations nous apprennent que la durée de la

double période de chacune d'elles varie avec la masse vibrante et avec la force élastique de la tige, de la lame ou de la mem-

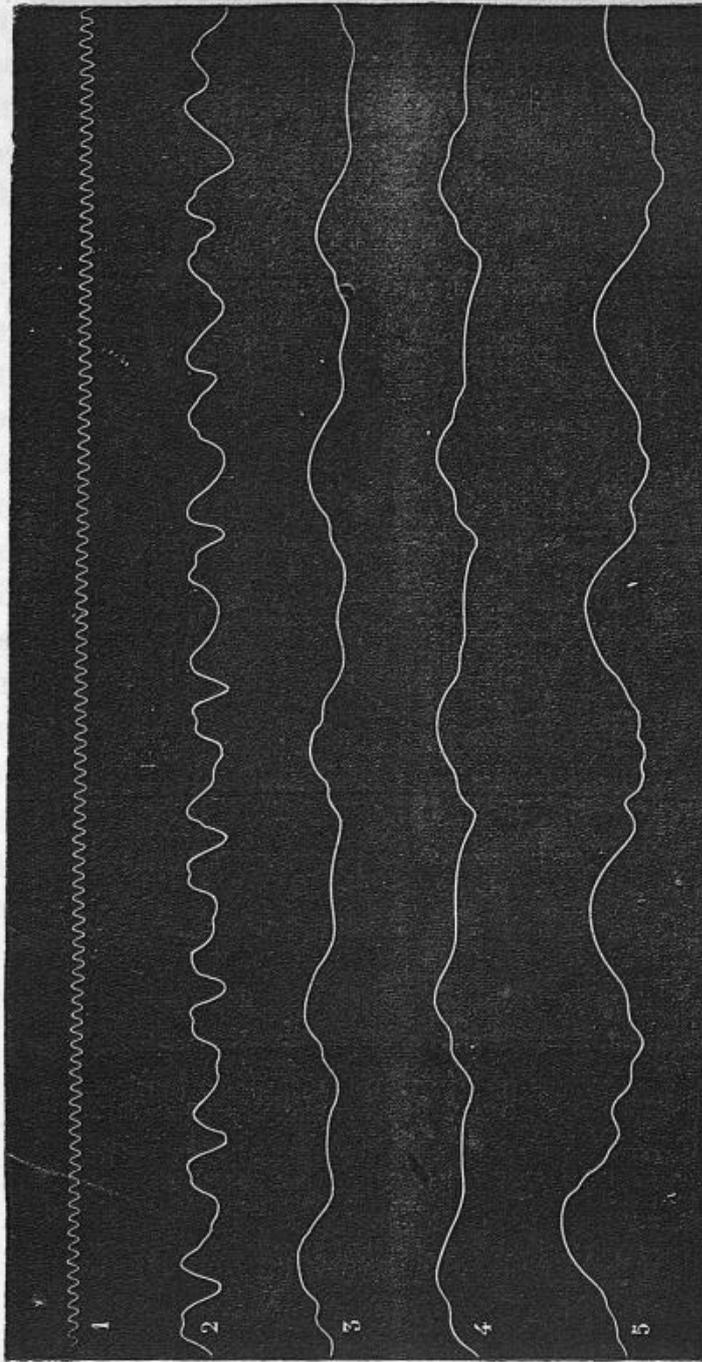


FIG. 40. — Ligne 1, tracé du diapason chronographe, 100 vibrations à la seconde. — Ligne 2, oscillations verticales du Canard sauvage pendant le vol. — Ligne 3, oscillations du Busard. — Ligne 4, Chouette effraie. — Ligne 5, Buse.

brane qui porte cette masse. Plus la masse est grande et l'élasticité faible, plus sera longue la période de la vibration. Or, les

mouvements que nous étudions ici sont assez fréquents, certains Oiseaux donnant huit ou dix battements d'aile par seconde. Si nous faisons en sorte que la période de l'oscillation propre de la masse de plomb soit beaucoup plus longue que celle de l'Oiseau, nous ne serons plus gênés par la complication de ces mouvements interférents.

En employant une masse de plus en plus lourde et une membrane de moins en moins tendue, on arrive par le tâtonnement à obtenir une bonne transmission des mouvements qui ne sont pas trop lents ; de ceux qui, par exemple, durent moins d'une demi-seconde. C'est plus qu'il n'en faut pour pouvoir appliquer l'instrument à l'étude des oscillations de toutes les espèces d'Oiseaux.

Mais, pour plus de sûreté, avant de faire fonctionner l'appareil, j'ai voulu vérifier directement l'exactitude de ses indications. La méthode que j'ai suivie, très-analogue à celle que j'emploie pour contrôler tous mes appareils, consistait en ceci : écrire directement le tracé du mouvement que j'imprimais à l'appareil explorateur des oscillations (c'est-à-dire au tambour chargé d'une masse), et voir si le mouvement indirectement enregistré par le levier était identique avec le premier.

Je reliai donc au premier appareil une tige munie d'une pointe écrivante ; je fis tracer cette pointe sur le cylindre verticalement au-dessous de la pointe du levier enregistreur ; j'imprimai à l'appareil des secousses variées en fréquence et en amplitude, et lorsque je constatai que les deux tracés étaient sensiblement identiques, je jugeai que l'appareil pouvait être employé dans l'étude des oscillations de l'Oiseau.

Des expériences faites sur différentes espèces : Canard, Buse, Busard, Chouette, m'ont montré qu'il existe des types très-variés du vol, au point de vue de l'intensité des oscillations dans le plan vertical.

La figure 40 montre les tracés fournis par ces différentes espèces d'Oiseaux. Tous ces tracés, recueillis sur un cylindre qui tourne avec une vitesse constante, et rapportés à un diapason chronographe de cent vibrations par seconde, permettent d'ap-

précier la durée absolue et relative des oscillations du vol chez ces différents Oiseaux.

Il ressort de cette figure que la fréquence et l'amplitude des oscillations verticales varient beaucoup suivant l'espèce d'Oiseau qu'on étudie. Pour mieux faire connaître la cause de chacun de ces mouvements, enregistrons en même temps les oscillations verticales de l'Oiseau et l'action des muscles de l'aile. Si l'on fait cette double expérience sur deux Oiseaux très-différents entre eux par leur manière de voler, tels que le Canard sauvage et la Buse, on obtient les tracés représentés figure 41.

Le Canard présente à chaque révolution de son aile deux oscillations énergiques : l'une en *b*, au moment où l'aile s'abat, elle est facile à comprendre ; l'autre en *a*, au moment où l'aile remonte. Pour expliquer l'ascension de l'Oiseau pendant ce temps d'élévation de l'aile, il me semble indispensable de faire intervenir l'effet de cerf-volant dont il a été question plus haut. L'Oiseau animé de vitesse présente ses ailes à l'air sous forme de plan incliné ; il se produit alors un effet analogue à la remontée dont il a été parlé à propos des appareils planants qui transforment leur vitesse acquise en ascension.

Le vol de la Buse présente à un moindre degré l'ascension qui accompagne la remontée de l'aile. Ne faut-il pas voir la cause de cette différence dans une inclinaison moins grande de l'aile remontante par rapport à l'horizon ?

*Détermination des différentes phases de la révolution de l'aile auxquelles correspondent les oscillations verticales de l'Oiseau.*

— L'interprétation de ces courbes s'éclairera tout à l'heure des expériences faites sur les variations de la vitesse de translation de l'Oiseau aux différents instants de la révolution de son aile.

Mais avant d'aller plus loin, notons que l'expérience précédente nous fournit un renseignement très-précieux pour la théorie du vol. En effet, si l'Oiseau exécute une série de chutes et de remontées, la durée des périodes de chutes nous fera connaître, au moins approximativement, la quantité de travail positif que

l'Oiseau devra faire pour remonter au niveau d'où il était tombé. Et nous voyons que le Canard, qui a neuf révolutions de l'aile par seconde, exécute à chaque révolution deux oscillations verticales, soit dix-huit par seconde. Chaque oscillation se composant d'une montée et d'une descente, chaque chute de l'Oiseau ne saurait durer plus de  $1/36$  de seconde.

Or, si l'on fait abstraction de l'effet de parachute que produisent vraisemblablement les ailes déployées de l'Oiseau, un corps qui tombe l'espace de  $1/36$  de seconde ne parcourt que  $0^m,036$ .

Cette chute, répétée dix-huit fois par seconde, constituerait

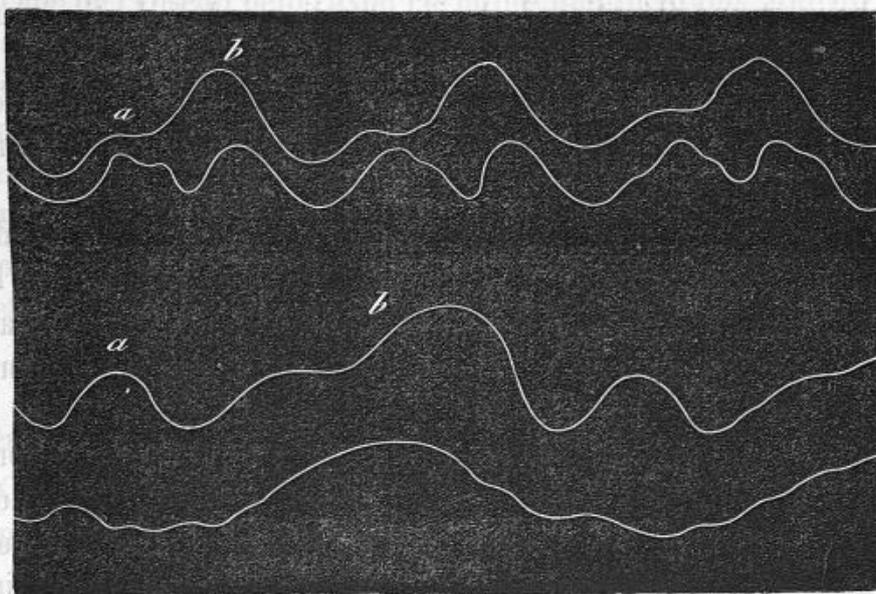


Fig. 41. — Dans la moitié supérieure, on voit superposés : le tracé musculaire et celui des oscillations verticales chez un Canard sauvage. Au-dessous de l'ondulation *a*, qui signale l'élévation de l'aile, on voit une oscillation verticale ; on en voit une autre au-dessous de *b*, tracé de l'abaisseur de l'aile. — Dans la moitié inférieure, on voit les mêmes tracés recueillis sur une Buse, l'oscillation qui se trouve en *a* et correspond à l'élévation de l'aile est moins marquée que chez le Canard.

$0^m,066$  de remontée nécessaire pour ramener pendant chaque seconde l'Oiseau dans le même plan horizontal.

Dans le tracé de la Buse, les chutes sont plus lentes que chez le Canard, probablement à cause de la grande surface des ailes de l'Oiseau.

*Détermination des variations de la vitesse du vol.*—La seconde question que nous avons à résoudre est relative à la détermination des phases variées de la vitesse du vol. Elle peut trouver sa solution dans l'emploi de la même méthode.

Si le tambour chargé d'une masse de plomb était placé sur le dos de l'Oiseau de façon à présenter sa membrane dans un plan vertical perpendiculaire à la direction du vol, cet appareil serait insensible aux oscillations verticales et signalerait seulement les oscillations qui se font d'avant en arrière et inversement.

De plus, en tournant en avant la membrane du tambour, il est clair que si l'Oiseau accélère sa vitesse, le retard de la masse sur la translation de l'appareil produira un refoulement de l'air du tambour et une élévation du levier, tandis que le ralentissement de l'oiseau amènera la descente du levier enregistreur.

L'expérience faite sur les espèces d'Oiseaux indiquées précédemment fournit des tracés analogues à ceux des oscillations verticales.

S'il est vrai, comme je l'ai supposé, que l'oscillation verticale de l'Oiseau, au moment de la remontée de l'aile, soit due à la transformation de la vitesse en hauteur, en recueillant simultanément le tracé des oscillations verticales et celui des variations de la vitesse, on aura le moyen de vérifier cette théorie.

En recueillant en même temps les deux ordres d'oscillations dans le vol d'une Buse, j'ai vu que la phase d'abaissement de l'aile produit à la fois l'élévation de l'Oiseau et l'accélération de sa vitesse horizontale. Cet effet est la conséquence nécessaire de l'inclinaison du plan de l'aile au moment de sa descente; nous le connaissons déjà pour l'avoir obtenu dans le vol de l'Insecte. Quant à la phase de remontée de l'aile, on constate que pendant la légère ascension qui se produit, la vitesse de l'Oiseau diminue. En effet, la courbe des variations de vitesse s'abaisse au moment où l'Oiseau prend de la hauteur. C'est donc une confirmation de la théorie précédemment émise sur la transformation de la vitesse de l'Oiseau en hauteur.

Ainsi, par ce mécanisme, le coup d'aile descendant crée la force qui produira les deux oscillations de l'Oiseau dans le plan

vertical. Ce coup d'aile produit directement l'ascension qui est synchrone avec lui et indirectement, en créant de la vitesse, il prépare la seconde oscillation verticale de l'Oiseau.

*Tracé simultané des deux ordres d'oscillations de l'Oiseau.* — Au lieu de représenter séparément les deux ordres d'oscillations que l'Oiseau exécute en volant, j'ai pensé qu'il serait plus instructif de chercher à obtenir une courbe unique représentant l'ensemble des mouvements que le corps de l'Oiseau exécute pendant sa translation dans l'espace.

La méthode qui a servi à obtenir les mouvements de la pointe de l'aile de l'Oiseau peut, avec certaines modifications, fournir le tracé simultané des deux ordres de mouvements que le corps de l'Oiseau exécute dans l'espace. Pour cela, il faut que les deux tambours rectangulairement combinés soient reliés avec une même masse inerte.

Reportons-nous à la figure 31 qui montre les deux leviers conjugués communiquant entre eux par des tubes qui transmettent à l'un tous les mouvements que l'autre exécute. Quand on imprime au premier levier un mouvement quelconque, le second levier reproduit le même mouvement dans le même sens.

Chargeons maintenant l'un des leviers d'une masse de plomb, et prenant en main le support de l'appareil, faisons-lui décrire un mouvement quelconque dans un plan perpendiculaire à la direction du levier. Nous verrons que le levier n° 2 exécute des mouvements absolument inverses. En effet, puisque la force motrice qui agit sur les membranes des tambours n'est autre chose que l'inertie de la masse de plomb, que cette masse est toujours en retard sur les mouvements imprimés à l'appareil, il est clair que si l'on élève tout le système, la masse retiendra le levier en bas; que si l'on abaisse le système, la masse retiendra le levier en haut; que si on le porte en avant, la masse retiendra le levier en arrière, etc. Or le levier n° 2, exécutant les mêmes mouvements que le n° 1, donnera des courbes qui seront absolu-

ment l'inverse du mouvement qu'on aura imprimé au support de l'appareil.

Fig. 42. — Tracé simultané des deux ordres d'oscillations qu'une Buse exécute en volant.



comme cela a été fait par les points *a* et *e*. Chacune de ces tran-

Ceci posé, passons à l'expérience. Pour cela, je prends l'appareil qui est représenté figure 35 sur le dos de la Buse qui vole; je supprime la tige qui recevait les mouvements de l'aile, ainsi que le parallélogramme qui les transmettait au levier. Je ne conserve que le levier relié aux deux tambours, et la monture qui fixe le système tout entier sur le dos de la Buse. J'adapte une masse de plomb sur ce levier et je fais voler l'animal.

Le tracé recueilli est représenté figure 42. L'analyse de cette courbe est au premier abord extrêmement difficile; j'espère toutefois réussir à en montrer la signification.

Cette courbe est recueillie sur le cylindre, dans les mêmes conditions que la figure 36 montrant les différents mouvements de la pointe de l'aile; la plaque se meut de droite à gauche; le tracé se lira donc de gauche à droite. La tête de l'Oiseau est placée vers la gauche; son vol s'effectue dans la direction de la flèche.

Nous pouvons partager cette figure en une série de tranches par des lignes verticales passant par des points homologues, soit qu'on fasse passer ces verticales par le sommet des boucles, soit qu'on les mène par le sommet des courbes simples,

ches renfermera des éléments assez semblables, sauf leur développement inégal dans les différents points de la figure; négligeons pour le moment ces détails.

Il est clair que le retour périodique de formes semblables correspond au retour des mêmes phases d'une révolution de l'aile de l'Oiseau. La tranche *ae* représentera donc les différents mouvements de l'Oiseau dans une révolution alaire.

Rappelons-nous que dans la courbe que nous analysons, tous les mouvements sont inverses de ceux que l'oiseau exécute en réalité. Les deux oscillations verticales de l'Oiseau, la grande et la petite, doivent donc se traduire par deux courbes dont le sommet sera en bas. Il est facile de reconnaître leur existence dans la grande courbe *abc* et la petite *cde*. L'Oiseau montait donc de *a* en *b*, descendait de *b* en *c*; il remontait de *c* en *d*, redescendait de *d* en *e*.

Mais ces deux oscillations chevauchent l'une sur l'autre, ce qui produit la boucle *cd*; l'oscillation *cde* recouvre en partie la première en se portant du côté de la tête de l'Oiseau. C'est une preuve, puisque les indications de la courbe sont inverses du mouvement réel, que l'Oiseau à ce moment se portait en arrière ou du moins ralentissait sa course (1)

Cette figure donc résume tout ce que les expériences précédentes nous ont appris sur les mouvements de l'Oiseau dans l'espace. On y voit que l'oiseau exécute à chaque révolution de son aile deux montées suivies de descentes; que ces oscillations sont inégales; la grande, comme on sait, correspond à l'abaissement de l'aile, la petite à son élévation. On voit, enfin, que l'ascension exécutée par l'Oiseau pendant la remontée de l'aile, s'accompagne de ralentissement de la vitesse de l'animal, ce qui justifie la théorie par laquelle cette remontée a été considérée comme faite aux dépens de la vitesse acquise par l'Oiseau.

(1) Comme l'appareil n'est sensible qu'aux changements de vitesse, il est clair que le tracé ne tient aucun compte de la vitesse uniforme de l'Oiseau, mais qu'il accuse comme mouvement en avant les accélérations, et comme rétrogradation les ralentissements.

Mais ce n'est pas tout ; cette courbe nous fait voir encore que les mouvements de l'Oiseau ne sont pas les mêmes au commencement qu'à la fin du vol. Nous avons déjà vu (fig. 31) que les coups d'ailes au départ sont plus étendus, nous voyons ici qu'au départ, c'est-à-dire à gauche de la figure, les oscillations produites par la descente de l'aile sont aussi plus étendues. Mais la théorie fait prévoir que l'oscillation de la remontée de l'aile étant empruntée à la vitesse de l'Oiseau doit être très-faible au début du vol, quand l'Oiseau n'a encore que peu de vitesse. La figure nous montre que c'est bien ainsi que les choses se passent et qu'au début du vol, la seconde oscillation de l'aile (celle qui forme la boucle) est très-peu prononcée.

Nous voici donc en possession des notions principales sur lesquelles peut s'établir la recherche du travail mécanique développé par l'Oiseau dans son vol, et nous voyons que c'est pendant la descente de l'aile que se crée tout entière la force motrice qui soutient et dirige l'Oiseau dans l'espace.