

*Bibliothèque numérique*

**medic @**

**Marey, Etienne-Jules. - Histoire naturelle des corps organisés. Cours de M. Marey. Du vol des oiseaux.**

*In : Revue des cours scientifiques de la France et de l'étranger, 1869, VI, n° 37, p. 578-583; n° 38, p. 601-604; n° 41, p. 646-656; n° 44, p. 700-704*



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)  
Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/hist/med/medica/cote?marey054>

## COLLÈGE DE FRANCE

## HISTOIRE NATURELLE DES CORPS ORGANISÉS

COURS DE M. MAREY (1)

## Du vol des oiseaux

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES FORCES MOTRICES QUI AGISSENT DANS LE VOL. — 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 d'un oiseau, il est facile de voir que le mécanisme du vol n'est plus le même pour lui que pour l'insecte. Qu'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 (2) 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 existe en sens inverse.

Avant de discuter la valeur de cette théorie, il faudrait voir si l'aile de l'oiseau n'exécute réellement que ces 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 particulière 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 mou-

voir 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  $\frac{1}{6}$  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 déjà 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 aux muscles de l'oiseau 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.

(1) Voyez ci-dessus, pages 64, 171 et 252, 26 décembre 1868, 13 février et 20 mars 1869.

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



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'oiseau 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 de raccourcissement du muscle fût surmontée. A ce moment, le poids supporté était de 2 kilogrammes 380 grammes.

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>m</sup>,7 qui représentent la surface de section de ce muscle, on obtient, pour chaque faisceau du muscle de l'oiseau ayant 1 centimètre carré de section, 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 pec-

toral moyen (élevateur de l'aile). On peut donc objecter que les courants électriques, s'irradiant jusque dans la région profonde des muscles thoraciques, ont excité l'élevateur 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.

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 (voyez cette *Revue*, 1867), 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 environ.

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 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 il l'est beaucoup moins que chez les oiseaux, qui se meuvent dans un milieu bien plus mobile encore.

Pour comprendre la production si rapide du mouvement

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

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

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



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 dans 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.

Permettez-moi d'insister, à ce propos, sur les phénomènes moléculaires dont les muscles sont le siège; nous y trouverons 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'une 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, il y a quelques années, 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 le suit, et il reste une certaine quantité de travail accompli dont la cause paraît être la pénétration 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. La figure 66 montre les différentes phases de ce phénomène.

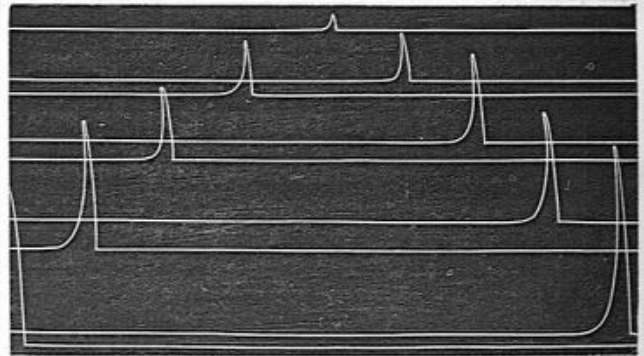


FIG. 66. — Montrant les effets de la chaleur sur le travail musculaire (la figure se lit de droite à gauche). La première secousse a une grande hauteur. La deuxième est moins haute, mais cela tient en partie à ce que l'origine du trait se trouve à un niveau plus élevé, ainsi que le montre la ligne horizontale 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.

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.

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 *énervé* 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 du 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 ; or, vous savez quels services on peut tirer des appareils schématiques pour l'étude de certains phénomènes qui, chez les êtres vivants, se présentent avec trop de complexité.

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 des 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 raccourcissements 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 la substance musculaire.

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 l'aile 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 un canard sauvage et une buse pour vous montrer 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.

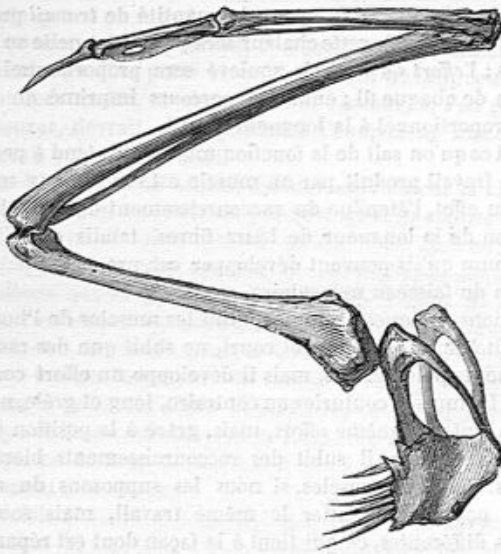


FIG. 67. — Squelette de l'aile et sternum de la frégate. On y voit l'extrême brièveté du sternum par rapport à la grande étendue de l'aile.

Mais à quoi correspond cet inégal développement des pectoraux 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 secondes. 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

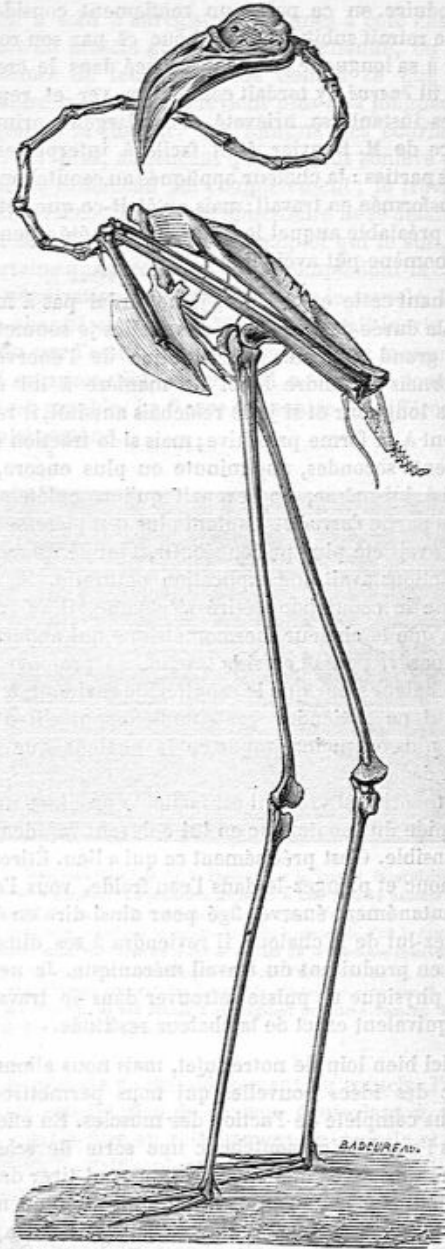


FIG. 68. — Squelette du flamant (d'après Alph. Milne Edwards). L'aile est très-grande et le sternum très-court.

parcours le petit effort que leur offre à vaincre la résistance de l'air, tandis que l'oiseau à grandes ailes travaillera également 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 la 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



FIG. 69. — Squelette d'un pingouin. L'aile est très-courte, le sternum est très-long.

de la surface alaire avec la longueur du muscle grand pectoral. L'inspection du squelette fournit les éléments principaux de cette vérification. Parcourez la galerie zoologique du Muséum qui est affectée à l'exposition des squelettes d'oiseaux, et vous en sortirez convaincus de l'existence de ce rapport inverse entre l'étendue de l'aile et la longueur du muscle grand pectoral. Voici comment l'ostéologie fournit les documents nécessaires à cette vérification (fig. 67, 68 et 69):

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 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. Vous pouvez 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 cette leçon. 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 que j'aurai prochainement à exécuter devant vous.

MAREY.

#### SOCIÉTÉ D'ANTHROPOLOGIE DE PARIS

SÉANCE PUBLIQUE ANNUELLE (1)

M. DE QUATREFAGES

de l'Institut

#### Rapport sur le concours pour le prix Godard en 1869

SYNOSTOSE DES OS DU CRANE CHEZ LES DIFFÉRENTES RACES HUMAINES; TRAVAUX DE M. F. POMMEROL. — L'ÉPIDÉMIE CHOLÉRIQUE DE LA GUADELOUPE (1865-1866) ET SON ACTION SUR LES DIVERSES RACES; STATISTIQUE PAR M. CH. WALTHER. — RACES, LANGUES ET CASTES DE L'INDE MÉRIDIONALE; RECHERCHES DE M. E. ROUBAUD.

Messieurs,

Toutes les sociétés savantes décernent des récompenses publiques aux hommes qui ont le plus contribué aux progrès des diverses connaissances humaines. Il en est peu, — il n'en est pas une seule peut-être, — pour qui ces solennités puissent avoir le caractère qu'aura toujours pour la Société d'anthropologie la proclamation du PRIX GODARD. C'est qu'en le décernant, elle ne saurait oublier que le donateur fut en même temps un de ses fondateurs et le martyr de notre science, dont l'avenir le préoccupait au moment même où il mourait pour elle (2). Maintenir cette récompense à une

(1) Voyez d'autres lectures faites à la même séance dans nos numéros du 17 juillet 1869, page 522 (*Les études anthropologiques depuis dix ans en Europe et en Amérique*, par M. Broca), et du 31 juillet 1869, page 546 (*Éloge de Boucher de Perthes* par M. E. Dally).

(2) Il n'est peut-être pas inutile de rappeler que la Société d'anthropologie a été fondée officiellement le 19 mai 1859 par MM. Anthelme, Béclard, Bertillon, Broca, Brown-Séquard, de Castelnau, Dareste, Delasiauve, Fleury, Follin, Isidore Geoffroy Saint-Hilaire, Godard, Gratiolet, Grimaux de Caux, Lemerrier, Martin-Magron, Rambaud, Robin,



vous faire voir les variations de la température et celles du vent; mais les exemples précédents vous font assez comprendre les résultats obtenus.

Bientôt, si le Bureau peut continuer ses travaux, nous espérons soumettre au public le tableau de la marche du temps dans tout le pays; mais il faut pour cela que de nouvelles stations viennent ajouter leurs observations à celles des sept déjà établies.

Voilà, messieurs, l'esquisse imparfaite des opérations de notre Bureau. Bien des points importants ont dû nécessairement être passés sous silence; mais ce qui a été dit suffit, je le crois, pour montrer que notre œuvre est une œuvre vraiment nationale, et que, par conséquent, elle ne peut se poursuivre que sous les auspices du gouvernement et aux frais de l'État.

C'est d'ailleurs là un engagement que le pays a pris en quelque sorte en adhérant aux propositions de la conférence de Bruxelles, s'il était possible de fermer les yeux sur la nécessité d'étudier à fond notre climat exceptionnel, et de rester à la hauteur de ce qui se fait dans toute l'Europe, et aussi sur les services que la météorologie est appelée à rendre à notre agriculture, à nos pêcheries et à notre commerce.

ROBERT H. SCOTT.

— Traduit de l'anglais par BATTIER. —

## COLLÈGE DE FRANCE

### HISTOIRE NATURELLE DES CORPS ORGANISÉS

COURS DE M. MAREY (1)

#### Du vol des oiseaux (suite)

DE LA FORME DE L'OISEAU. — CONDITIONS DE STABILITÉ. — PLANE-  
MENT ET GLISSEMENT SUR L'AIR. — RAPPORT DE LA SURFACE DES  
AILES AU 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 que 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.

La stabilité de l'oiseau a été bien expliquée; il n'y a rien

(1) Voyez ci-dessus, pages 61, 171, 252 et 578, 26 décembre 1868, 13 février, 20 mars et 14 août 1869.

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 de l'oiseau, 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 du point 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 le prend le parachute abandonné dans l'espace, comme le 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.

M. J. Pline a très-bien étudié les différentes sortes de glissement qui peuvent alors avoir lieu; il les a même reproduites au moyen de petits appareils schématiques très-faciles à construire.

Que l'on prenne une feuille de papier de forme carrée, et qu'on la ploie par le milieu de manière à former un angle dièdre très-obtus (fig. 70); puis, qu'au fond de cet angle, on

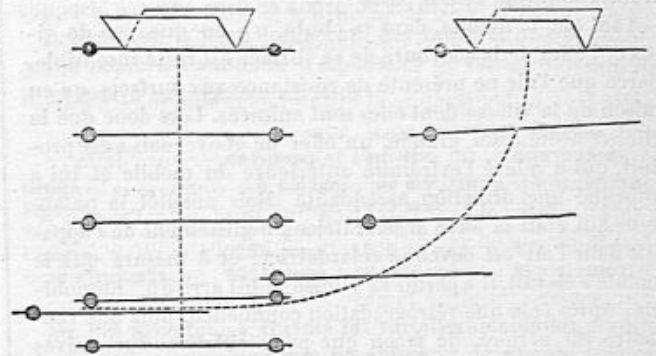


FIG. 70. — Représentant : à gauche, un appareil de planement équilibré par deux masses égales placées aux extrémités de la tige qui est logée dans le fond de l'angle dièdre. Cet appareil tombe verticalement comme l'indiquent les positions successives de la tige munie de deux masses. — A droite, on voit le même appareil muni d'une seule masse. La chute est parabolique, ainsi que le montre la trajectoire ponctuée.

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 verticalement, suivra une trajectoire oblique et glissera sur l'air d'un mouvement accéléré (fig. 71, page 602).

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

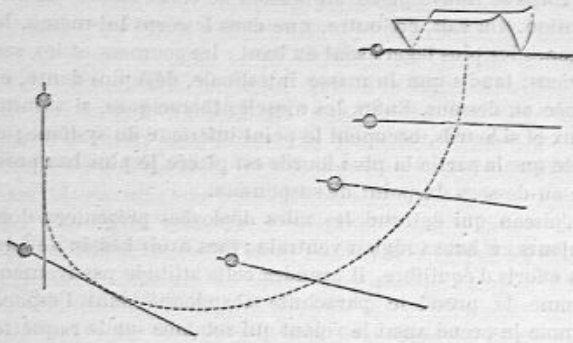


FIG. 71. — On a relevé le bord postérieur de deux plans de l'angle dièdre. Après une chute descendante, parabolique, l'appareil remonte, ainsi que la trajectoire ponctuée.

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.

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 rencontre 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. 72), 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 direction 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 dro e

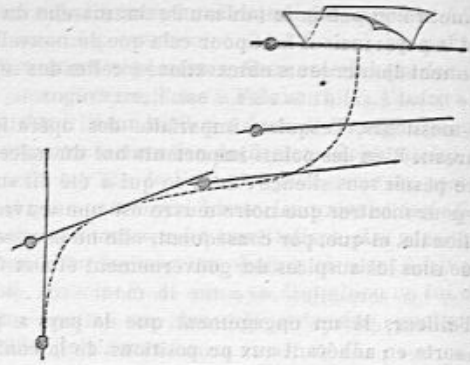


FIG. 72. — La partie postérieure du plan de l'angle dièdre a été recourbée en bas. Après une chute parabolique, le mobile prend une marche descendante très-rapide.

» 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 goélands 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 goéland 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 au 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 mouvements 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.

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 deux, 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 les 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 une 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 1 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 traineraient 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 Hartings (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  $l$ ,  $\sqrt{a}$ ,  $\sqrt[3]{p}$ .

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

Nom de l'espèce.	Poids.	Surface.	Rapport.
	$p$ .	$a$ .	$\frac{\sqrt{a}}{\sqrt[3]{p}}$
1. <i>Larus argentatus</i> .....	565,0	541	2,82
2. <i>Anas nyroca</i> .....	508,0	321	2,26
3. <i>Fulica atra</i> .....	495,0	262	2,05
4. <i>Anas crecca</i> .....	275,5	144	1,84
5. <i>Larus ridibundus</i> .....	197,0	331	3,13
6. <i>Machetes pugnax</i> .....	190,0	164	2,23
7. <i>Rallus aquaticus</i> .....	170,5	101	1,81
8. <i>Turdus pilaris</i> .....	103,4	101	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

Le poids des muscles pectoraux est au contraire dans un

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

rapport simple avec le poids total de l'oiseau, 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  $1/6^e$  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 (chap. 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 proportionnées 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 des gros oiseaux 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 oiseau. Mais ces deux oiseaux, en abaissant leurs ailes 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 l'aile, et  $4r \cdot 2g$  ou  $8rg$  pour le travail effectué par l'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.

MAREY.



cette opinion ne peut être acceptée, si l'on réfléchit que les églises d'Asie ont leur façade tournée vers l'orient absolument comme les églises d'Europe. C'est qu'on ne peut comprendre le sens et la portée de certaines coutumes, si l'on n'a pas étudié l'histoire de leurs origines, et, comme le dit Auguste Comte au commencement de son *Traité de philosophie positive*, « aucune conception, quelle qu'elle soit, ne peut être comprise qu'à l'aide de son histoire. » Plus on étudie l'histoire de la civilisation, plus on s'aperçoit qu'elle n'a pas été produite de toutes pièces, mais qu'elle est le produit des conquêtes des âges successifs et le résultat des leçons du temps et de l'expérience.

La méthode d'expliquer les progrès des sciences, des arts, des religions, des coutumes, sans remonter à leurs sources, est non-seulement défectueuse, mais fautive. On l'accorde dans une certaine mesure. Que nos ancêtres, que les ancêtres des Francs et des Germains, ceux même des Grecs et des Romains, aient été originairement des tribus barbares, cela est devenu un lieu commun, et l'on ne met plus en doute qu'il faille être au fait de leur état de barbarie primitive pour bien comprendre l'état de civilisation où ils sont parvenus. Mais nous devons aller plus loin. Si, comme il semble, le sauvage est, relativement au barbare, dans la situation où ce dernier est relativement à l'homme civilisé, le philosophe doit étudier non-seulement l'histoire de la vie barbare, mais aussi celle de la vie sauvage, de manière à pouvoir remonter aussi loin que possible dans l'histoire de la civilisation, connaître les usages qui ont disparu et ceux qui ont survécu, parfois avec des modifications qui les rendent méconnaissables. Du moment qu'on se livre à cette étude, son importance devient évidente. Pour ne nommer que les Anglais, personne ne peut lire les récents travaux de M. Lennan sur les lois primitives, ceux de sir John Lubbock sur la comparaison des temps historiques et préhistoriques, ceux enfin du colonel Lane Fox sur le développement des armes de guerre, sans être frappé de cette vérité.

Les usages et coutumes des sauvages sont plus intelligibles pour nous que ceux d'un peuple parvenu à un plus haut degré de civilisation. Cependant l'étude de leurs mœurs est toute moderne. L'antiquité classique les a complètement négligés, quoiqu'ils entourassent de tous côtés ses frontières. Pour nous, je crois que nous avons beaucoup à apprendre avec ces modernes représentants de l'homme préhistorique. Il est temps de se livrer à ces recherches, car l'homme sauvage tend de plus en plus à disparaître de la surface du globe sous la marche incessante de la civilisation. Hâtons-nous donc de demander à la vie sauvage les éclaircissements qu'elle peut nous donner sur les origines de la civilisation parmi les hommes, car, avec toute notre science, nous pouvons avoir encore à apprendre de ce côté-là.

EDWARD BRUNET TYLOR

— Traduit de l'anglais par H. LE FOYER. —

## COLLÈGE DE FRANCE

### HISTOIRE NATURELLE DES CORPS ORGANISÉS

COURS DE M. MAREY (1)

#### Du vol des oiseaux (suite)

#### III

FRÉQUENCE ET RYTHME DES MOUVEMENTS DE L'AILE DE L'OISEAU.

— MÉTHODE ÉLECTRIQUE POUR MESURER LE NOMBRE ET LA DURÉE DES TEMPS D'ÉLEVATION 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 A 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, rompt 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 96 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 écrivant trace 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 :

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

(1) Voyez ci-dessus, pages 61, 171, 252, 578 et 601, 26 décembre 1868, 13 février, 20 mars, 14 et 21 août 1869.



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

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.

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 sen-

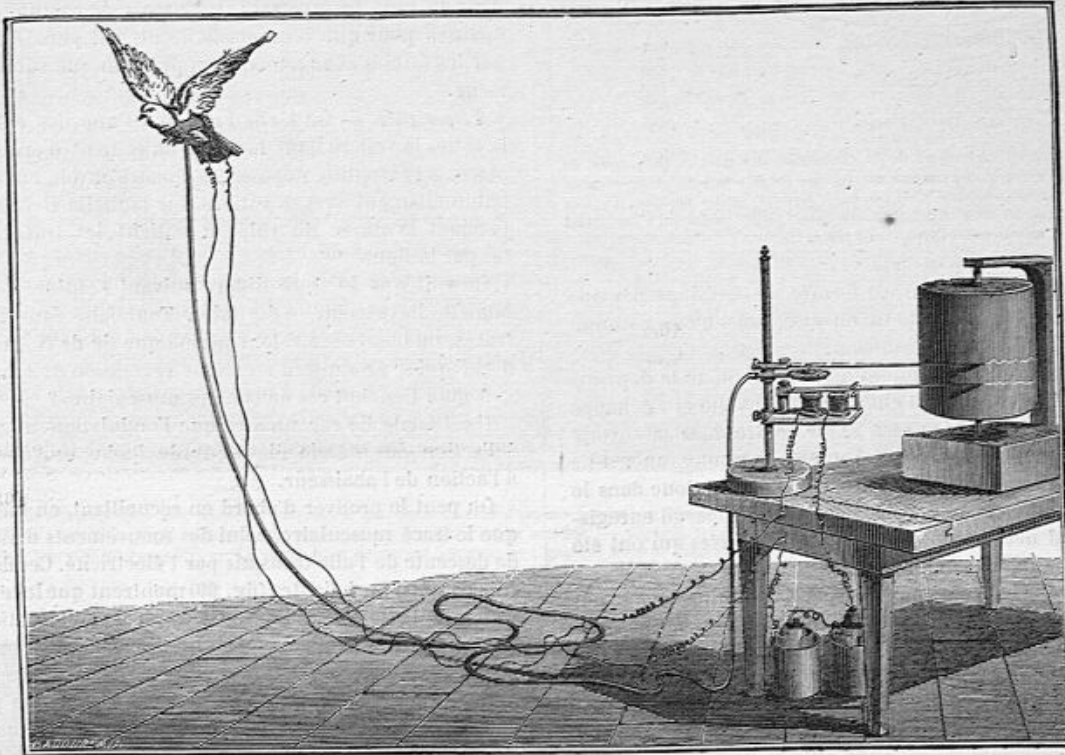


FIG. 96. — Appareil à doubles signaux pour enregistrer les mouvements de l'aile d'un pigeon. D'une part, un tube transmet l'action musculaire; d'autre part, un signal électrique note, avec leurs durées relatives, les périodes d'élévation et d'abaissement de l'aile.

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 $\frac{2}{3}$ centièmes de seconde.	3	3 $\frac{2}{3}$
Pigeon..	7 $\frac{1}{2}$	3	4 $\frac{1}{2}$
Buse...	21 $\frac{1}{2}$	8 $\frac{1}{2}$	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

siblement 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 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.

Je me sers, à cet effet, de la transmission par des tubes à air, moyen qui m'avait permis autrefois de transmettre à un enregistreur placé à distance les battements du cœur, le pouls des artères, les mouvements de la respiration, etc. (2).

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

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



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 96). 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. 97) contenant à son

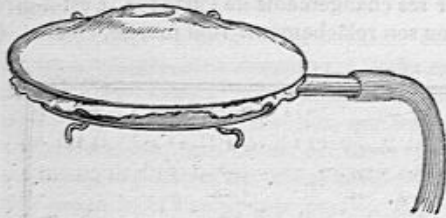


FIG. 97. — Appareil explorateur de la contraction des muscles thoraciques de l'oiseau. La face supérieure convexe est formée par la membrane de caoutchouc soulevée par le ressort-boudin; c'est elle qui s'applique sur les muscles. La face inférieure, en contact avec le corset, porte quatre petites griffes qui s'implantent dans l'étoffe et maintiennent l'appareil en place.

intérieur 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.

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 96 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.

À 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

(1) Voyez, figure 96, l'appareil posé sur la table, et dont le levier est placé en haut.

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 transmission 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 98.

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.

À 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. 99) 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 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  $\frac{4}{100}$  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 99 montre la superposition des deux signaux après la correction. Ces tracés sont recueillis sur la buse.

Il est facile de comprendre comment se produisent les on-



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

sentera 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

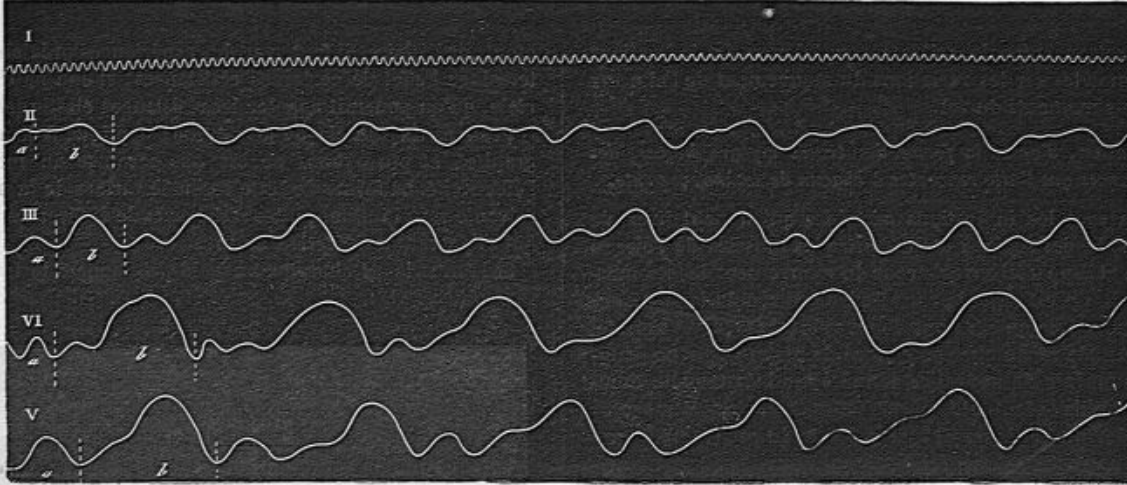


FIG. 98. — Tracés myographiques des pectoraux obtenus sur différentes espèces d'oiseaux pendant le vol. — Ligne I, diapason chronographe destiné à mesurer la durée absolue de chaque mouvement musculaire ; ce diapason vibre 200 fois par seconde. — Ligne II, tracé des muscles du pigeon : ce tracé a été recueilli dans les conditions représentées figure 96. — Ligne III, tracé du canard sauvage. — Ligne IV, tracé du busard. — Ligne V, tracé de la buse.

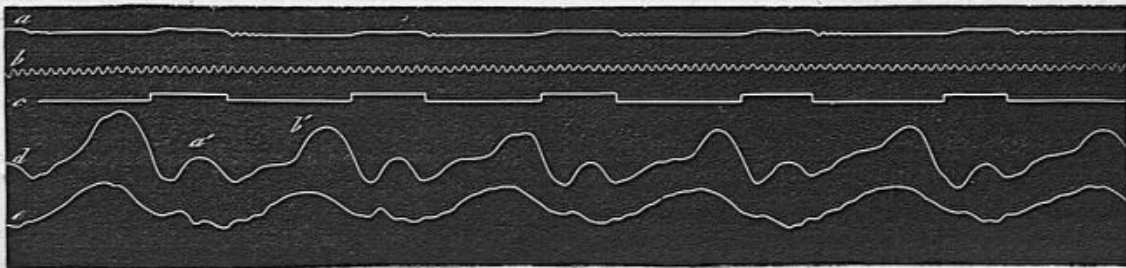


FIG. 99. — Ligne supérieure *a*, tracé électrique des élévations et abaissements de l'aile de la buse : ce tracé est tel que l'appareil le fournit. — Ligne *b*, tracé d'un diapason de 200 vibrations par seconde. — Ligne *c*, correction du tracé électrique, dont les signaux ne présentent pas des débuts 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 précéder le lecteur, elle montre le tracé des oscillations de l'oiseau dans la verticale pendant le vol.

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 pré-

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 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 éner-



giques ; ils atteignent, après deux ou trois coups d'aile, un rythme régulier qu'ils perdent au moment où l'animal va se reposer (fig. 100).

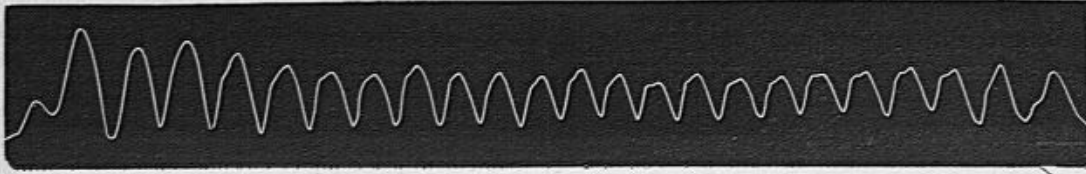


FIG. 100. — Montrant les différences d'amplitude et de fréquence des battements de l'aile d'un pigeon pendant un vol de 15 mètres de longueur. A gauche de la figure, on voit les grands mouvements qui signalent le début du vol. (Ce tracé a été recueilli sur un cylindre dont la rotation était peu rapide, ce qui permet d'obtenir un plus grand nombre de mouvements dans un court espace.)

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 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 mouve-

ment 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. 101) :

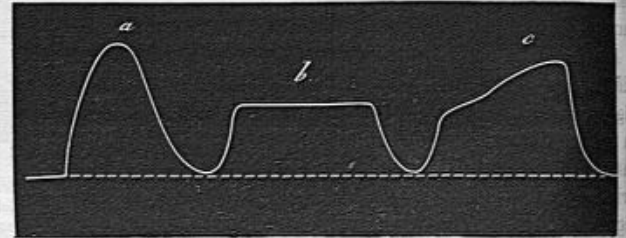


FIG. 101.

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 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 gon-

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



flement 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 98. 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 101, 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 durées que je viens de signaler.

Ceci posé, revenons au tracé musculaire du grand pectoral 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 102.

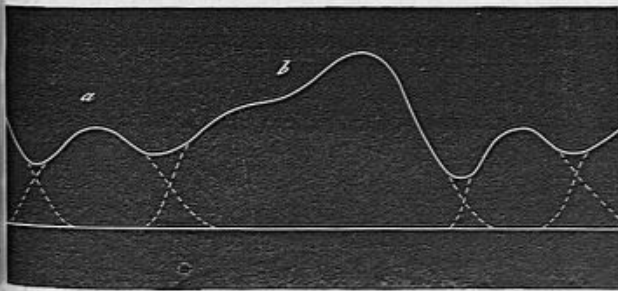


FIG. 102. — Tracé des muscles d'une buse pendant le vol : a, action du muscle élévateur; b, action de l'abaisseur. Les lignes ponctuées qui descendent jusqu'à l'axe des abscisses complètent la forme probable des mouvements des deux muscles de l'aile.

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

La courbe a de l'élévateur 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.

#### IV

##### 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 frottât 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 pa-



pièr fût immobile par rapport au centre de mouvement de l'aile de l'oiseau qui vole; autrement dit, qu'elle suivit, 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 Koenig a obtenus en armant d'un style 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.

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 lec-

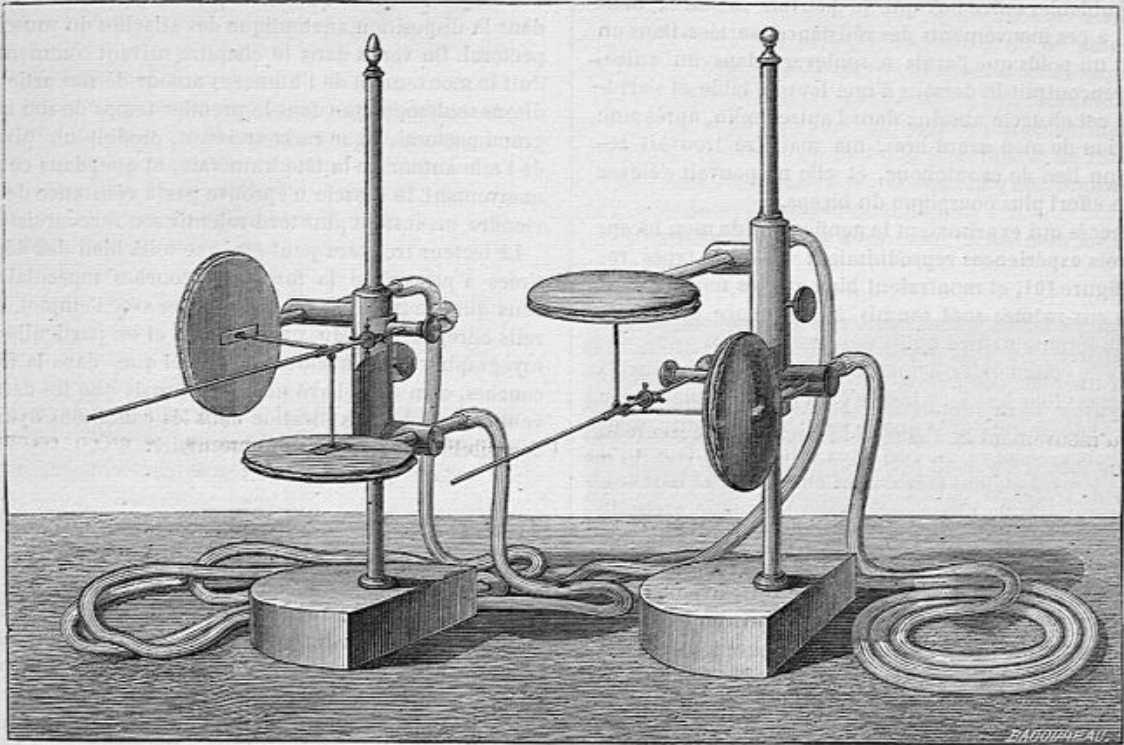


FIG. 103. — Appareil destiné à transmettre à distance à un levier tous les mouvements qu'un autre levier exécute autour de l'une de ses extrémités.

Ainsi, en admettant qu'on puisse transmettre à la fois les mouvements 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 103 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

leur 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, tout 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'éviter 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 104 montre, à l'extrémité du levier, le ressort en

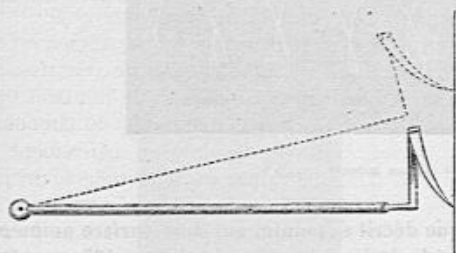


FIG. 104. — Pointe élastique traçant sur une glace enfumée.

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 104 ; 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 103 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 ou 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 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 105 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 levier enregistreur décrivait une sorte d'ellipse; mais je dus renoncer à enregistrer cette figure sur une glace

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

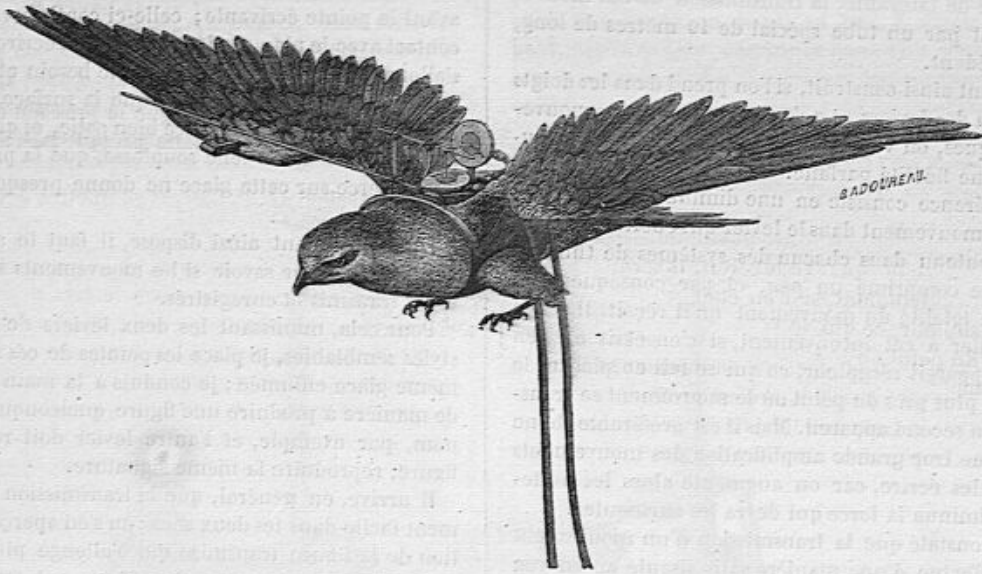


FIG. 105. — Buse volant avec l'appareil qui signale les mouvements décrits par l'extrémité de son aile.

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 106 représente un des nombreux tracés que j'ai

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

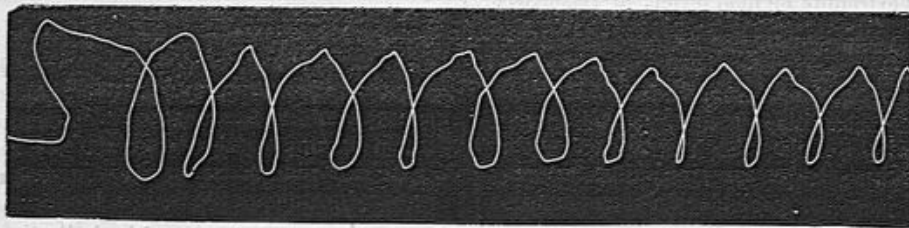


FIG. 106. — Représentant le parcours de la pointe de l'aile à chaque mouvement du vol.

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

l'ellipse que décrit sa pointe, sur une surface animée d'une translation de droite à gauche. La figure 107, 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 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

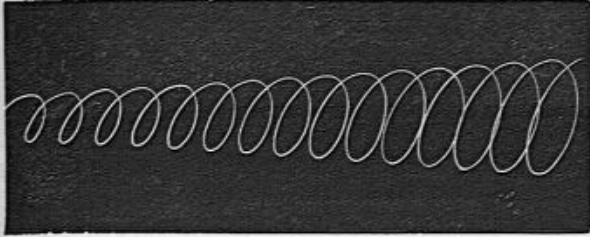


FIG. 107. — Ellipse tracée par une verge de Wheatstone sur un cylindre tournant.

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 :

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



FIG. 108. — Tracé dans l'espace par l'extrémité de l'aile (abstraction faite de la translation de l'oiseau).

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 106 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 108. 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.

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

(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.



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 analogue à celui qui soulève le jouet d'enfant qu'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 aper-

(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.

cevoir 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.

MAREY.

## CHRONIQUE

MM. Masius et Vanlair ont présenté à l'Académie de Bruxelles des recherches expérimentales sur la régénération anatomique et fonctionnelle de la moelle épinière, dont voici les conclusions principales:

1° La *moelle épinière*, chez la grenouille, peut réparer spontanément les pertes de substance opérées dans son propre tissu à l'aide d'un nouveau *tissu médullaire*.

2° Le retour des *fonctions* de la moelle épinière suspendues par le fait de la lésion coïncide avec la régénération de ses éléments anatomiques;

3° Cette régénération, à la fois *anatomique* et *fonctionnelle*, ne s'opère que graduellement. Pour la reproduction des éléments histologiques, la formation des *cellules* précède celle des fibres. — Pour les propriétés physiologiques, c'est la motilité volontaire qui réparaît en premier lieu.

— Dans un Mémoire présenté à l'Académie des sciences de Paris, M. Dehérain s'efforce de démontrer les trois points suivants:

1° L'évaporation de l'eau par les feuilles s'exécute dans des conditions tout à fait différentes de celles qui déterminent l'évaporation d'un corps inerte, car elle se poursuit dans une atmosphère saturée.

2° Cette évaporation est surtout déterminée par la lumière.

3° Les rayons lumineux efficaces pour opérer la décomposition de l'acide carbonique par les feuilles sont aussi ceux qui favorisent l'évaporation.

— M. Grimaud de Caux a communiqué à l'Académie des sciences quelques détails sur l'utilisation des eaux d'égouts à Marseille.

Pour se débarrasser des déjections, on emploie des réservoirs mobiles qu'on enlève à de courts intervalles, et que l'on va vider dans des bateaux-citernes pouvant emporter 50 mètres cubes et plus. Ces bateaux sont dirigés vers le port de Bouc; ils traversent l'étang de Caronte et entrent par les Martigues dans l'étang de Berre, véritable mer intérieure sur les bords de laquelle on a construit de grands réservoirs où les populations agricoles viennent s'approvisionner, les cultivateurs trouvant là un élément de fertilisation dont l'efficacité n'est surpassée que par celle du guano du Pérou.

Ce fait est considérable à deux points de vue: au point de vue de l'agriculture provençale, qui en tire maintenant un immense profit, et au point de vue de la salubrité de Marseille, où, pendant longtemps, pour une population qui compte maintenant trois cent mille âmes, on n'a eu que le vieux port comme aboutissant général de tous les produits de l'élimination.

Le propriétaire-gérant : GERMER BAILLIÈRE.

PARIS. — IMPRIMERIE DE E. MARTINET, RUE MIGNON, 2.



l'action du curare qui m'a conduit à considérer le diabète comme une hypersécrétion du foie.

Le curare pourrait évidemment rendre des services en thérapeutique. Je vous ai déjà dit qu'on l'avait essayé contre l'épilepsie. On l'a employé également contre le tétanos; mais s'il est efficace dans ce cas, comme les expériences de M. Vella permettent de le croire, son action ne peut pas être un antagonisme ainsi qu'on l'a supposé; il doit agir qu'à titre de diurétique, comme il fait dans l'empoisonnement par la strychnine, ou de quelque autre manière analogue. C'est de la même façon qu'il faudrait expliquer son efficacité contre l'épilepsie, dans le cas où elle s'établirait. Mais jusqu'ici les résultats thérapeutiques sont encore trop peu nombreux et trop isolés pour qu'on puisse en tirer des conclusions. Les résultats physiologiques au contraire sont parfaitement nets.

Outre les moyens de contention physiologique consistant dans l'emploi de certaines substances que nous venons d'étudier, il y a encore d'autres procédés physiologiques, par exemple la compression du cerveau. Vous avez pu remarquer du reste que toutes les substances employées comme moyens contentifs agissent sur les nerfs, soit pour détruire la sensibilité, soit seulement pour empêcher le mouvement.

J'ai connu un enfant qui avait les fontanelles molles, de telle sorte qu'on pouvait les comprimer: on provoquait ainsi le coma. Chez les animaux, on peut produire ce phénomène en pratiquant une couronne de trépan sans toucher à la dure-mère. On introduit ensuite par l'orifice un tampon de linge ou une éponge pour comprimer le cerveau, et on provoque ainsi le coma. Quand on retire l'éponge, tout rentre aussitôt dans l'état normal et la sensibilité reparait comme devant.

Si les hommes avaient d'ordinaire les fontanelles molles comme l'enfant dont je parlais tout à l'heure, ce moyen d'anesthésie serait praticable. Chez les animaux on peut y suppléer par une couronne de trépan ainsi que nous venons de le dire. Il est fort curieux de remarquer que la compression du cerveau produit les mêmes effets que le curare et rend également diabétique l'animal qui la subit.

Nous terminons ici les leçons de ce semestre. Lorsque nous reprendrons ce cours, nous continuerons à marcher dans la même voie et nous étudierons les moyens, instruments ou procédés qu'on emploie dans les investigations sur les êtres vivants. Nous suivrons naturellement pour l'examen de ces procédés l'ordre des divers systèmes organiques. Nous commencerons par un système qui est fondamental, parce que c'est celui dans lequel vivent tous les autres: je veux parler du sang. C'est le milieu intérieur. Pour agir sur les autres éléments, il faut nécessairement passer par celui-là qui est le véhicule général de toutes les actions physiologiques.

Il est clair qu'on ne peut pas agir sur un animal entier, un homme, une espèce, une entité, etc.; on ne peut agir que sur les éléments. Ce sont donc les éléments qu'il nous faut poursuivre, c'est sur eux que le médecin physiologiste doit chercher à agir et, pour cela, c'est dans le sang qu'il faut nécessairement pénétrer. Or, nous avons déjà vu en étudiant le curare que le sang peut être modifié de manière à devenir spécialement impropre à la vie de certains éléments déterminés. Il n'y a pas de substance agissant à la fois sur tous les éléments, chacune a son action propre et son lieu d'élection qu'il faut toujours déterminer pour connaître le mécanisme des actions pathologiques, toxiques et thérapeutiques.

FIN DU COURS.

## COLLÈGE DE FRANCE

### HISTOIRE NATURELLE DES CORPS ORGANISÉS

COURS DE M. MAREY (1)

#### Du vol des oiseaux (fin)

#### V

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. — DÉTERMINATION 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 sensiblement 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 au-

(1) Voyez ci-dessus, pages 61, 171, 252, 578, 601 et 646, 26 décembre 1868, 13 février, 20 mars, 14, 21 août et 11 septembre 1869.



un 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 116 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.

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 116.

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'agit 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 effets 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'en suit qu'indépendamment des mouvements d'oscillation de l'oiseau, l'appareil devra transmettre les vibrations mêmes de la masse de plomb 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 membrane 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

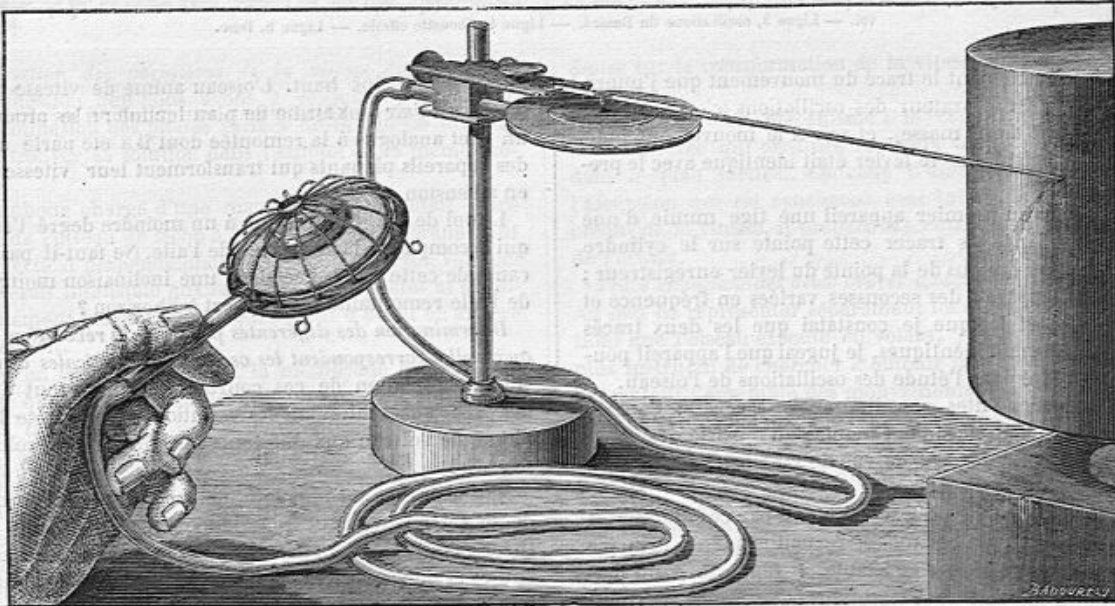


FIG. 116. — Appareil destiné à transmettre au levier enregistreur toutes les oscillations qui lui sont imprimées dans un plan vertical.

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.

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

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

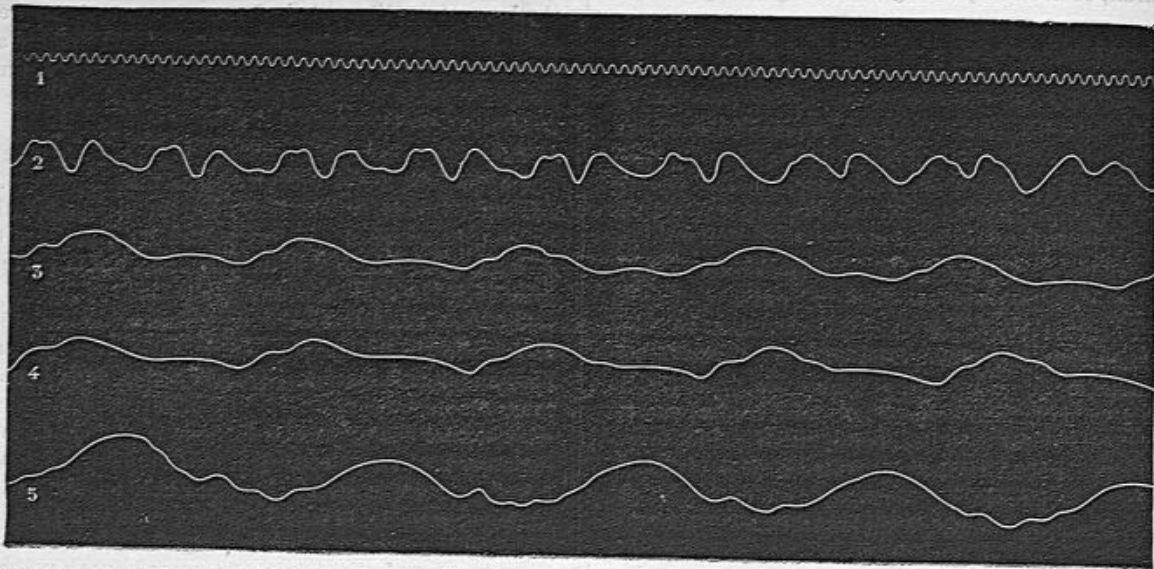


FIG. 117. — Ligne 1, tracé du diapason chronographe, 400 vibrations à la seconde. — Ligne 2, oscillations verticales du Canard sauvage pendant le vol. — Ligne 3, oscillations du Busard. — Ligne 4, Chouette effraie. — Ligne 5, Buse.

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 117 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'apprécier 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 118.

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 52 millimètres.



Cette chute répétée dix-huit fois par seconde constituerait 9<sup>e</sup>,36 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.

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

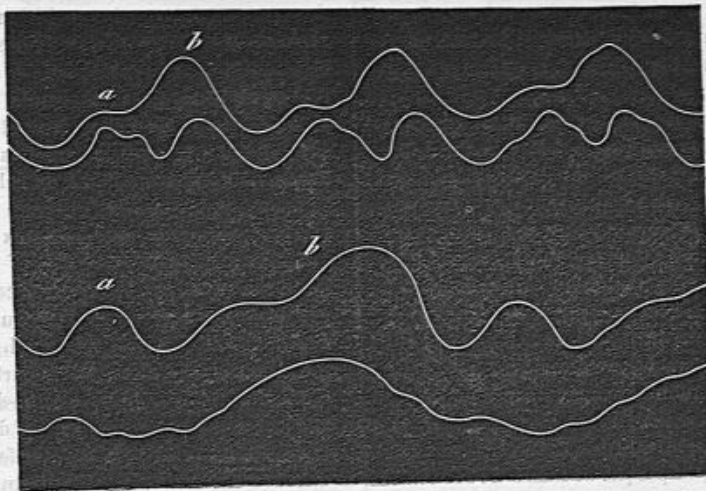


FIG. 118. — Dans la moitié supérieure, on voit superposés : le tracé musculaire et celui des oscillations verticales chez un Canard sauvage. Au-dessous de l'ondulation a, qui signale l'élévation de l'aile, on voit une oscillation verticale; on en voit une autre au-dessous de b, tracé de l'abaisseur de l'aile. — Dans la moitié inférieure, on voit les mêmes tracés recueillis sur une Base, l'oscillation qui se trouve en a et correspond à l'élévation de l'aile est moins marquée que chez le Canard.

**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

émission 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 103 (n° 41 de cette Revue) 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 absolument l'inverse du mouvement qu'on aura imprimé au support de l'appareil.

Ceci posé, passons à l'expérience. Pour cela, je prends l'appareil qui est représenté figure 105 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 119. 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 106 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.



FIG. 119. — Tracé simultané des deux ordres d'oscillations qu'une Buse exécute en volant.

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, comme cela a été fait pour les points *a* et *e*. Chacune de ces tranches 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 *a e* 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 *a b c* et la petite *c d e*. 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 *c d*; l'oscillation *c d e* 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.

Mais ce n'est pas tout; cette courbe nous fait voir encore que les mouvements de l'oiseau ne sont par les mêmes au commencement qu'à la fin du vol. Nous avons déjà vu (fig. 100) 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.

MAREY.

FIN DU COURS.

(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.

Le propriétaire-gérant : GERMER BAILLIÈRE.

PARIS. — IMPRIMERIE DE E. MARTINET, RUE MIGNON, 2.