

Bibliothèque numérique

medic@

Marey, Etienne-Jules. - Mémoire sur la vol des insectes et des oiseaux - 2^e mémoire

In : Annales des sciences naturelles (zoologie), 1872, tome 15, article 13, p, 1-62



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)
Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/histmed/medica/cote?marey088>

MÉMOIRE

SUR

LE VOL DES INSECTES ET DES OISEAUX,

Par M. MAREY.

2^e Mémoire (1).

CHAPITRE PREMIER.

COMPARAISON DE L'INSECTE ET DE L'OISEAU AU POINT DE VUE DU MÉCANISME
DU VOL.

Définitions de la trajectoire de l'aile chez l'Insecte et chez l'Oiseau. — Différences anatomiques en rapport avec les différentes fonctions de l'aile chez l'Insecte et chez l'Oiseau. — De l'utilisation inégale de la résistance de l'air par l'Insecte et par l'Oiseau.

Comparaison de l'Insecte et de l'Oiseau au point de vue du mécanisme du vol. — Nous connaissons assez les mouvements que l'Insecte et l'Oiseau exécutent dans le vol, pour pouvoir établir une comparaison entre leurs façons de voler ; nous aurons à signaler des différences bien tranchées. Toutefois la classe des Insectes présente de telles variétés dans la structure des ailes et dans le fonctionnement de ces organes, qu'il est indispensable de bien préciser l'espèce que l'on prendra pour type dans la comparaison qui va être faite. Les Diptères nous fourniront ce type ; c'est chez eux, en effet, que le vol semble, par son mécanisme, s'éloigner le plus de celui de l'Oiseau, tandis que les Lépidoptères, par la direction presque verticale de leur coup d'aile, par leur faculté de planer dans l'air sans effectuer de mouvements, quelquefois par le parcours de leurs ailes, semblent se rapprocher du type du vol qui appartient à l'Oiseau.

Une Mouche et un Oiseau, par exemple, nous offrent deux

(1) Voy. *Annales des sciences naturelles*, 1869, t. XII.

SC. NAT., JANVIER 1872, ARTICLE N° 13.

modes bien tranchés de locomotion aérienne ; les différences portent sur plusieurs points. Elles portent sur la forme de la trajectoire de l'aile dans l'espace ; sur l'inclinaison du plan dans lequel battent les ailes ; sur le rôle de chacun des deux mouvements alternatifs et de sens inverse que ces ailes exécutent ; enfin sur la façon dont la résistance de l'air se décompose dans ces différents mouvements.

Difference des trajectoires de l'aile chez l'Insecte et chez l'Oiseau.

— On a vu que si l'aile d'un Insecte est munie d'une paillette brillante, on peut suivre des yeux la trajectoire qu'elle décrit

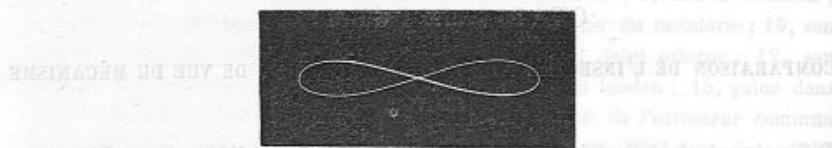


FIG. 1. — Trajectoire de l'aile d'une Mouche.

dans l'espace ; le parcours de cet organe se traduit alors (fig. 1) par la forme d'un 8 plus ou moins allongé (1). Chez l'Oiseau, la méthode optique est inapplicable, mais des appareils enregistreurs spéciaux m'ont fourni la forme du parcours de l'aile ; cette trajectoire présente une sorte d'ellipse à sommet aigu dont la figure 2 fournit la reproduction exacte.



FIG. 2. — Trajectoire de l'aile d'une Buse.

Si maintenant nous tenons compte de la direction générale dans laquelle s'exécutent les mouvements de l'aile chez les deux

(1) Je croyais avoir signalé le premier cet aspect de l'aile de l'Insecte pendant le vol ; une réclamation de M. J. Bell Pettigrew, d'Edimbourg, m'a appris que cet auteur avait déjà décrit cette forme du mouvement. Mais on peut voir, dans le travail du physiologiste écossais, que l'interprétation qu'il a donnée de la cause de cette figure optique et de la nature des mouvements auxquels il l'attribue est tout à fait différente de la théorie que j'ai cherché à établir. (Voy. *Comptes rendus*, n° 16, 18 avril 1870.)

types que nous comparons, une nouvelle différence se présente : l'Insecte bat des ailes dans un plan sensiblement horizontal et l'Oiseau dans un plan presque vertical.

De sorte que si nous supposons chacun de ces animaux immobile dans l'espace, les trajectoires décrites par leurs ailes seraient, pour leur forme et leur orientation, représentées par les figures 1 et 2.

La structure de l'aile de l'Insecte comparée à celle de l'Oiseau faisait déjà prévoir que l'action de ces organes sur l'air ne devait pas être la même. Une aile d'Insecte est également imperméable à l'air, quelle que soit celle de ses faces qui frappe ce fluide ; chez l'Oiseau, au contraire, le mode d'imbrication des pennes ne permet à l'aile d'offrir à l'air un plan résistant que par sa face inférieure.

De là deux effets distincts dans le va-et-vient de l'aile : chez l'Insecte, ces deux temps sont actifs l'un et l'autre ; chez l'Oiseau, l'abaissement de l'aile est le seul temps actif. Je ne veux pas dire que pendant sa remontée, l'aile ne serve à rien pour soutenir l'Oiseau ; mais, ainsi qu'on l'a vu, dans ce deuxième temps du vol, ce n'est plus l'aile qui agit contre l'air, mais c'est l'air qui agit contre l'aile. L'Oiseau, animé d'une vitesse horizontale acquise dans le temps d'abaissement de son aile, présente celle-ci en un plan incliné au moment de sa remontée ; il passe alors à l'état de projectile empenné et monte sur l'air par l'effet des surfaces inclinées qu'il offre passivement à la résistance de ce fluide.

Si, pour rendre plus saisissante la différence de ces deux façons de voler, nous figurions les trajectoires de l'aile de l'Insecte et de celle de l'Oiseau lorsqu'ils se meuvent dans l'espace, et si, de plus, nous représentions l'orientation du plan de leurs ailes à différents instants de ce parcours, on obtiendrait les figures 3 et 4.

Les différences des deux types de vol me semblent nettement définies par la comparaison de ces deux figures. Cette différence consiste essentiellement en ceci :

Chez l'Insecte, un mouvement énergique est également néces-

saire pour frapper l'air dans les deux temps de la révolution de l'aile. Chez l'Oiseau, au contraire, un seul temps actif est nécessaire, c'est le temps d'abaissement ; il crée à lui seul toute la force motrice qui sera dépensée pendant la révolution entière de l'aile.



FIG. 3. — Trajectoire de l'aile d'un Insecte qui se transporte de droite à gauche.

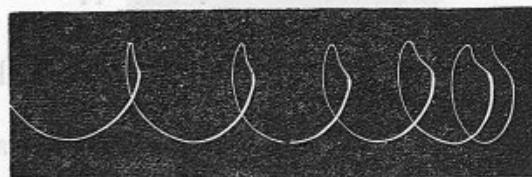


FIG. 4. — Trajectoire de l'aile d'un Oiseau qui se transporte horizontalement de droite à gauche (1).

Cette différence dans l'action entraîne une différence dans la forme de l'aile, ainsi qu'on va le voir.

Differences anatomiques en rapport avec les différences de fonction de l'aile chez l'Insecte et l'Oiseau. — Quand une surface frappe l'air, il faut, pour qu'elle y trouve quelque résistance, que cette surface se meuve avec rapidité. Or, une aile qui se meut autour de son point d'attache au corps de l'animal, présente des vitesses inégales et graduellement croissantes pour les points qui s'éloignent de plus en plus du corps, de sorte que, presque nulle au niveau du point d'attache de l'aile, la vitesse sera très-grande à l'extrémité libre.

(1) Cette figure est celle que laisserait dans l'espace l'aile d'un Oiseau, si elle pouvait tracer dans l'air une traînée lumineuse.

Toutefois, je dois faire des réserves au sujet du sens des mouvements de l'aile, qui m'a paru varier dans certaines conditions. Il m'a paru plus naturel, pour l'intelligence du mouvement, d'imiter ce qui arriverait si l'Oiseau frôlait de son aile un plan qui garderait la trace de ses passages. Le tracé obtenu fuirait derrière l'Oiseau comme suit le rivage derrière une barque qui descend le cours d'une rivière.

Qu'on se figure une aile d'Insecte aussi large à sa base qu'à son extrémité; cette largeur serait inutile dans la partie la plus voisine du corps, car l'aile, en ce point, a trop peu de vitesse pour frapper l'air utilement.

Aussi voit-on, chez les Insectes appartenant au groupe que nous étudions en ce moment, l'aile réduite, vers sa base, à une forte nervure. Le voile membraneux ne commence que dans les

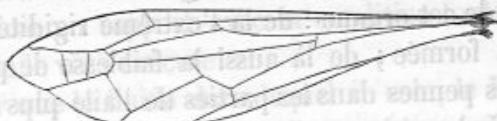


Fig. 5. — Aile d'un Insecte.

points où la vitesse du mouvement commence elle-même à prendre quelque valeur, et le voile gagne en largeur jusque dans le voisinage de l'extrémité. Tel est (fig. 5) le type de l'aile essentiellement active, c'est-à-dire destinée seulement à frapper l'air.

Mais, chez l'Oiseau, nous l'avons vu, l'aile a aussi un rôle passif, c'est-à-dire qu'elle subit la pression de l'air sur sa face inférieure, lorsque l'Oiseau est projeté rapidement en avant par sa vitesse acquise. Dans ces conditions, l'animal tout entier étant transporté dans l'espace, tous les points de son aile sont animés de la même vitesse; les régions voisines du corps sont aussi utilisables que les autres pour subir la poussée de l'air qui agit comme sur un *cerf-volant*.



Fig. 6. — Partie active et partie passive de l'aile de l'Oiseau.

Aussi la base de l'aile, chez l'Oiseau, loin de se réduire, comme chez l'Insecte, à une tige rigide mais nue, est-elle très-large et munie de *pennes* et de *couvertures* qui constituent une grande

surface sous laquelle l'air presse avec force et d'une manière très-efficace pour soutenir l'Oiseau. La figure 6 donne une idée de cette disposition de l'aile à la fois active et passive d'un Oiseau.

La moitié interne, dépourvue de vitesse suffisante, doit être considérée comme la partie passive de l'organe, tandis que la moitié externe est la partie active, celle qui frappe sur l'air.^{HOH}

On comprend ainsi que, par sa vitesse très-grande, la pointe de l'aile doive rencontrer dans l'air plus de résistance que toute autre partie de cet organe : de là l'extrême rigidité des pennes dont elle est formée ; de là aussi la faiblesse de plus en plus grande de ces pennes dans les parties de l'aile plus voisines du corps ; et enfin la minceur très-grande des plumes de la base ou partie passive de l'aile.

Enfin, en observant l'inclinaison que doit présenter l'aile d'un Oiseau dans le temps actif et dans le temps passif, on voit que cette inclinaison doit être inverse dans l'un ou l'autre temps. Dans le temps actif ou d'abaissement, la face supérieure de l'aile doit regarder en avant; dans le temps passif ou de remontée, cette même face doit regarder en arrière. Or, les deux moitiés de l'aile présentent anatomiquement une différence d'inclinaison qui s'accorde avec le rôle particulier de chacune d'elles. La partie passive tourne naturellement sa face inférieure en avant; elle se trouve orientée favorablement pour subir l'action de l'air par sa face inférieure, soit sous l'influence du vent, soit par l'effet de la vitesse de translation de l'Oiseau (1). La partie active, au contraire, présente naturellement une orientation différente. Son plan est presque horizontal, et, pour peu que la résistance de l'air se produise au-dessous de ce point, le bord postérieur se soulève et la face inférieure regarde en arrière.

Cet effet donne à l'aile une surface gauche qui semble faire partie d'une hélice sans que rien dans le mode d'action de l'aile permette de l'assimiler à l'hélice au point de vue du mécanisme de la propulsion (2).

(1) Tout porte à croire que la partie interne de l'aile de l'Oiseau doit garder son rôle passif, même pendant le moment de l'abaissement de l'aile.

(2) M. Pettigrew, d'Edimbourg, frappé de cette apparence de l'aile, a pensé que le

Les différentes espèces d'Oiseaux n'offrent pas au même degré cette torsion du plan de l'aile. Ainsi, les Oiseaux qu'on nomme voiliers, parce que, plus que les autres, ils utilisent l'action du vent, n'ont pas une aile aussi tordue en spirale que les Oiseaux dits rameurs, qui frappent l'air d'une manière presque continue.

Enfin, cette torsion, d'après M. Pettigrew, serait à son maximum dans les espèces aquatiques qui volent sous l'eau, comme le Pingouin. Chez cette espèce d'Oiseau, la torsion complète de l'aile se trouve en rapport avec la condition toute particulière dans laquelle le vol s'exécute.

Plus léger que le fluide dans lequel il vole, le Pingouin doit trouver dans l'inclinaison de son aile une force qui le fasse plonger malgré l'effet de sa légèreté spécifique, tandis que les autres Oiseaux doivent, par une inclinaison de sens inverse, s'élever, malgré leur poids, au-dessus d'un fluide beaucoup moins dense que leur corps.

De l'utilisation inégale de la résistance de l'air par l'Insecte et par l'Oiseau. — Sans pouvoir encore aborder l'équation du travail développé par l'Oiseau ou par l'Insecte, nous pouvons faire entre leurs façons de voler une comparaison intéressante. Nous pouvons chercher quel est celui de ces deux types du vol qui utilise le mieux le point d'appui que l'air lui offre. A ce point de vue, je crois qu'on peut démontrer que l'avantage appartient à l'Oiseau.

En effet, reportons-nous aux figures 3 et 4 qui représentent la trajectoire de l'aile chez l'Insecte et chez l'Oiseau.

Nous voyons que dans sa position ordinaire de vol, l'Insecte bat des ailes dans un plan presque horizontal, et que la composante qui le soutient et le propulse est une partie seulement de la résistance de l'air. Le rôle de cet organe n'est autre que celui d'une hélice qui agirait sur l'air comme agit sur l'eau l'hélice d'un bateau à vapeur. Mais on comprend que le type alternatif qui appartient aux mouvements musculaires ne saurait se prêter à produire l'action propulsive d'une hélice; car, s'il est vrai que l'aile pivote sur son axe et change de plan pendant son parcours, cette rotation se borne à une fraction de tour et est suivie d'une rotation de sens inverse qui, dans le cas du mouvement d'une hélice, détruirait complètement l'effet produit par le mouvement précédent.

tance de l'air. Or, que devient l'autre partie ? Cette seconde composante, dirigée contrairement au sens du mouvement de l'aile, aura pour effet de fournir à cet organe un point d'appui pour déplacer latéralement le corps de l'Insecte. Dans le coup d'aile suivant, le même phénomène va se reproduire, la composante verticale sera seule utilisée pour la translation de l'Insecte, tandis que la composante horizontale tendra à déplacer latéralement le corps de l'animal. Mais, cette fois, le déplacement devrait être en sens inverse du déplacement précédent.

On voit déjà que sur les deux composantes que chacun des coups d'aile de l'Insecte emprunte à la résistance de l'air, il n'y en a qu'une qui soit utilisée, l'autre tend seulement à produire des vibrations latérales du corps de l'animal. Mais ces vibrations n'existent même pas en réalité ; en effet, quand on observe, planant sur une fleur, certaines mouches à corps brillant, on voit que tandis que leurs ailes s'agitent avec une extrême rapidité, leur corps reste parfaitement immobile. L'œil peut saisir les moindres détails de la structure de l'Insecte, tandis qu'il ne le verrait que d'une manière confuse et avec des contours vagus s'il était animé de vibrations latérales.

Il est facile de comprendre pourquoi ces vibrations n'existent pas. Cela tient à l'extrême rapidité des battements des ailes, à la flexibilité de ces organes, et à l'inertie de la petite masse que représente le corps de l'Insecte. L'aile d'une Mouche, qui fait 530 révolutions par seconde, exécute par conséquent 660 oscillations simples ; elle devrait, à chaque fois, imprimer une déviation latérale au corps de l'Insecte et détruire la vitesse acquise que l'oscillation précédente lui avait donnée en sens contraire. Or, toutes les fois qu'une tige flexible, chargée d'une masse à son extrémité, est sollicitée à exécuter des oscillations, on voit que ces oscillations perdent de leur amplitude à mesure que leur fréquence augmente, et qu'à un moment donné il ne se produit plus que des flexions alternatives de la tige, la masse restant immobile. Le même phénomène se produit chez l'Insecte pour éteindre les oscillations latérales auxquelles son corps serait soumis.

ARTICLE N° 13.

Quelle est la valeur de la composante empruntée à la résistance de l'air et utilisée pour la locomotion de l'Insecte ?

Cela dépend évidemment de l'angle que fait le plan de l'aile, à chaque instant, avec la direction de son parcours. Cette question est donc une de celles dont les éléments sont beaucoup trop complexes pour qu'on puisse en chercher actuellement la solution. Nous serons obligé de faire une hypothèse, et d'admettre que les deux composantes empruntées à la résistance de l'air sont égales entre elles. Dès lors nous caractériserons le type du vol employé par l'Insecte en disant qu'il n'utilise que 50 pour 100 de résistance que l'air lui fournit.



FIG. 7. — Représentant la position de l'aile au moment de l'abaissement (temps actif). La ligne oblique tracée sur cette figure indique l'inclinaison du plan de l'aile pendant la descente.



FIG. 8. — Représentant l'inclinaison de l'aile dans le temps passif ou de remontée.

Voyons maintenant ce qui se passe chez l'Oiseau. Les figures 7 et 8 indiquent les positions successives que prend le plan de son aile.

Un seul temps est actif dans la révolution de l'aile de l'Oiseau, c'est le temps d'abaissement. Nous n'aurons donc que celui-là à considérer. Dans l'abaissement de l'aile, le plan oblique qui frappe l'air en décompose la résistance, de façon qu'il se pro-

duise une composante verticale qui lutte contre la pesanteur et une composante horizontale qui imprime la vitesse au corps de l'Oiseau.

Or, il est clair que la composante verticale est utilisée, puisqu'elle sert à soutenir l'Oiseau contre la pesanteur. Il n'est pas moins évident que la composante horizontale n'est pas perdue, mais qu'elle est emmagasinée sous forme de force vive dans la masse de l'Oiseau, pour être utilisée, à son tour, pendant la remontée de l'aile, par l'effet de *cerf-volant*.

Si la composante horizontale était restituée tout entière, on comprend que le type de l'Oiseau serait deux fois plus avantageux que celui de l'Insecte, et qu'il utiliserait toute la résistance de l'air. Mais cette composante horizontale qui donne à l'Oiseau la vitesse, subit à son tour une décomposition, et cette fois ne s'utilise pas tout entière pour devenir force ascensionnelle.

La résistance de l'air devant l'aile inclinée en *cerf-volant* (fig. 8) donne une composante verticale qui lutte contre la pesanteur, celle-là est utilisée; et une composante horizontale directement opposée à la translation de l'Oiseau, et entièrement inutile.

On voit que le coup actif de l'aile utilise une de ses composantes empruntées à la résistance de l'air, au moment même où ce coup se produit, et qu'il emmagasine la deuxième composante dont une partie seulement sera utilisée plus tard. Admettons pour le partage des forces ce que nous avons admis pour l'Insecte, à savoir, que dans cette décomposition les composantes seront égales entre elles, et nous verrons que l'Oiseau utilise contre la pesanteur 75 pour 100 de sa résistance que lui fournit l'air, tandis que l'Insecte n'en utiliserait que 50 pour 100. Le type du vol effectué par l'Oiseau est donc théoriquement préférable à celui de l'Insecte, puisqu'il présente deux fois moins de déchet de la résistance de l'air.

Mais n'oublions pas que tout le raisonnement qui conduit à cette conclusion repose sur une hypothèse, à savoir, que devant un plan incliné, la résistance de l'air se décompose également en deux forces perpendiculaires l'une à l'autre.

Il est clair que devant certaine inclinaison du plan qui frappe l'air, la décomposition de la résistance peut se faire ainsi en deux forces égales ; mais comme on ne sait pas encore quel est précisément l'angle sous lequel l'aile se présente à chaque instant à la résistance de l'air, il s'ensuit que l'appréciation que nous venons de tenter est purement approximative, jusqu'à ce que, pour lui donner plus de rigueur, on soit arrivé à connaître plus exactement l'angle formé à chaque instant par le plan de l'aile.

CHAPITRE II.

TENTATIVE DE REPRODUCTION SYNTHÉTIQUE DU PHÉNOMÈNE DU VOL DE L'OISEAU.

Du partage de la force musculaire entre la résistance de l'air et la masse du corps de l'Oiseau. — Loi du partage de la force motrice entre diverses résistances inégales. — Synthèse du coup d'aile descendant. — Variation de l'étendue de l'ascension de l'ascendant : 1^e suivant le poids à soulever ; 2^e suivant l'intensité de la force motrice ; 3^e suivant l'étendue de la surface des ailes.

Tentatives de reproduction synthétique des phénomènes du vol de l'Oiseau. — Après avoir analysé les mouvements de l'aile de l'Insecte, nous avons essayé de reproduire ces mouvements dans un appareil schématique (1). La même méthode devra être suivie dans les études sur le vol des Oiseaux ; mais en face de la complication plus grande du problème, il faut ici procéder avec plus de lenteur et plus de circonspection. Nous essayerons d'abord de bien comprendre la nature et les conditions mécaniques d'un des actes exécutés par l'Oiseau dans le vol ; nous tenterons de reproduire cet acte, puis d'autres successivement, jusqu'à ce que nous puissions employer la méthode qui seule peut nous permettre de reproduire dans son ensemble la locomotion aérienne.

Pour donner dès maintenant un aperçu de cette méthode, disons qu'elle consistera à placer un Oiseau dans des conditions telles que tous les mouvements qu'il exécute nous soient fidèlement transmis par des enregistreurs. On placera ensuite l'ap-

(1) Voyez le premier mémoire (*Ann. sc. nat.*, t. XII).

pareil schématique dans les conditions où tout à l'heure se trouvait l'Oiseau véritable, et l'on recevra également le signal de tous les mouvements qu'il produit. Dès lors la marche à suivre sera nettement tracée; il s'agira de corriger sans cesse le mécanisme artificiel jusqu'à ce que, se rapprochant de plus en plus de la machine vivante, il finisse par en imiter la fonction d'une manière satisfaisante. Ainsi, dans ces expériences, on devra passer continuellement de l'analyse à la synthèse; il faudra en quelque sorte procéder comme le copiste qui veut reproduire un tableau, et qui pour cela passe incessamment de l'étude du modèle à la correction de son œuvre jusqu'à ce qu'il la trouve assez achevée.

Cela dit, revenons à notre programme plus restreint, et voyons comment, dans l'abaissement de son aile, l'Oiseau trouve sur l'air un point d'appui qui lui permette de mouvoir la masse de son corps. Trois facteurs sont à considérer dans ce problème : la force engendrée, le point d'appui et la résistance à vaincre.

Du partage de la force musculaire entre la résistance de l'air et la masse du corps de l'Oiseau. — Lorsqu'en physiologie on cherche à estimer le travail qu'un muscle peut exécuter, on le considère comme fixé à l'une de ses attaches d'une façon absolue, et l'on apprécie l'étendue du parcours de l'extrémité mobile de ce muscle. Si l'on connaît, d'une part, le poids que ce muscle soulève ainsi, en se contractant, et, d'autre part, le parcours qu'il imprime à ce poids, on a les deux éléments de la mesure du travail effectif. Mais ce sont là des conditions idéales que la locomotion terrestre présente à peine ; on ne les observe plus chez les animaux qui se meuvent dans l'eau et surtout chez ceux qui volent dans l'air.

Que l'on compare seulement l'effort nécessaire pour marcher sur un sol meuble, sur le sable des dunes, par exemple, avec celui qu'exige la marche sur un plan résistant. On verra que la mobilité du point d'appui fourni par le sable détruit une partie de l'effet utile de la contraction de nos muscles ; en d'autres termes, qu'il faut un effort notablement plus grand pour produire

ARTICLE N° 13.

le même travail utile, quand le point d'appui n'est pas résistant.

Cette consommation de travail est facile à comprendre et même à mesurer. Lorsqu'un marcheur appuie l'un des pieds sur le sol, la jambe correspondante, un peu fléchie, se redresse bientôt et repousse à la fois le sol par en bas et la masse du corps par en haut. Si le sol résiste entièrement à cette pression, tout le mouvement produit se fera du côté du tronc qui sera soulevé à une certaine hauteur, à 15 centimètres par exemple. Mais si le sol s'enfonce de 5 centimètres sous la pression du pied, il est clair que le corps ne sera plus soulevé qu'à une hauteur de 10 centimètres, et que le travail utile subira par ce fait un déchet d'un tiers.

L'enfoncement du sol sous le pied constitue bien certainement un *travail*, d'après la définition mécanique de ce mot. En effet, le sol, en cédant, présente une certaine résistance ; c'est cette résistance qui doit être multipliée par l'étendue dont le sol s'est affaissé pour donner la mesure et la valeur du travail accompli en ce sens. Mais c'est un travail tout à fait inutile pour la locomotion que celui-là ; c'est un déchet de la force motrice dépensée.

Lorsqu'un Poisson frappe l'eau de sa queue pour se propulser en avant, il exécute un double travail : une partie a pour effet de chasser derrière lui une certaine masse d'eau avec une certaine vitesse, et l'autre pousse son corps, malgré les résistances du fluide environnant. Ce dernier travail est seul utilisé ; il serait bien plus considérable si la queue de l'animal rencontrait, au lieu de l'eau qui fuit derrière elle, un point d'appui solide et résistant.

Presque tous les propulseurs employés par la navigation subissent ce déchet de travail qui tient à la mobilité du point d'appui. C'est ce déchet qu'on évite avec grand profit, dans le *touage*, en faisant agir la machine motrice sur une chaîne qui est immergée dans le canal et fournit un point d'appui d'une fixité à peu près absolue.

L'Oiseau se trouve dans des conditions particulièrement dé-

favorables ; son aile qui, si elle agissait sur un appui solide, souleverait, en se raccourcissant, la masse du corps à une grande hauteur, n'imprime à celle-ci qu'une légère ascension, ainsi qu'on l'a vu dans des expériences précédemment exposées.

Loi du partage de la force motrice entre deux résistances inégales. — Peut-on mesurer le déchet de la force motrice par la mobilité du point d'appui, et prévoir la quantité de travail utile que donnera un moteur s'appuyant sur l'air ? C'est ce qu'il s'agit maintenant d'examiner.

Il est un principe établi par Newton et qui domine, pour ainsi dire, toute la mécanique : c'est que *l'action est égale à la réaction*.

Dans le cas qui nous occupe, la force motrice de l'Oiseau produit, par chacun des tendons d'insertion des muscles grands pectoraux, deux actions égales : l'une a pour effet de déplacer en arrière une certaine masse d'air avec une certaine vitesse, l'autre pousse en sens contraire le corps de l'oiseau, avec une autre vitesse. Est-ce à dire que dans ces deux actions il y ait une même quantité de travail produit ? Nous allons essayer d'examiner cette question.

Dégageons-la tout d'abord d'une influence qui la complique et sur laquelle nous reviendrons plus tard : l'inégale longueur du bras de levier sur lequel agissent la force motrice et la résistance de l'air, et supposons que la force musculaire s'applique directement à soulever la masse du corps et à repousser celle de l'air. La physique nous fournit des exemples de semblables partages de force. Ainsi, dans la balistique, la force motrice de la poudre, c'est-à-dire la pression des gaz, agit à la fois sur le projectile et sur la pièce, imprimant à ces deux masses des vitesses de sens contraire. Or, il se fait un partage égal de la quantité de mouvement entre les deux projectiles, de sorte que la masse formée par le canon et son affût, multipliée par la vitesse de recul qui lui est communiquée, est égale à la masse du projectile multipliée par la vitesse de propulsion qu'il reçoit. Comme le canon pèse beaucoup plus que le boulet, la vitesse

ARTICLE N° 13.

de recul du canon est beaucoup plus faible que la vitesse imprimée au projectile (1).

Quant au travail développé par la poudre contre la pièce et contre le boulet, il se partage très-inégalement entre ces deux masses. En effet, le travail engendré par une force vive étant proportionnel au carré de la vitesse de la masse en mouvement — sa formule est $\frac{mV^2}{2}$, — le calcul montre que ce travail, dans le cas où la pièce pèserait 300 fois plus que le boulet, serait 300 fois plus grand pour le boulet que pour la pièce. Dans ce calcul, il faut encore admettre que la déflagration de la poudre soit très-rapide et qu'elle se passe d'une manière parfaitement régulière, ce qui n'est pas démontré.

Acceptons comme inattaquables les résultats de l'expérience de balistique et des calculs qui ont été faits à ce sujet, puis cherchons si l'on peut transporter ces calculs au partage de l'action musculaire dans le cas du vol.

Il semble que, dans le cas où le moment de l'action du muscle

(1) Voici la solution de ce problème donnée par Poncelet, *Introduction à la mécanique industrielle*, page 175 :

Soit F , à un instant donné, la force motrice qui pousse en avant le boulet et qui est censée presser, en sens contraire et avec une intensité égale, le fond de l'âme de la pièce; soient P et P' , les poids du boulet et de la pièce y compris son affût, etc.; soient V et V' respectivement les petits degrés de vitesse qui leur sont imprimés à un instant quelconque et dans la durée de l'élément de temps t , on aura la proportion

$$F : P :: V : gt \text{ ou } PV = F \times gt.$$

On aura de même, pour la pièce et son affût :

$$F : P' :: V' : gt \text{ ou } P'V' = F \times gt.$$

Ainsi :

$$PV = P'V' \text{ ou } V : V' :: P' : P.$$

..... Par conséquent, les degrés de vitesse imprimés au boulet et à la pièce, dans un temps infiniment petit, sont réciproquement proportionnels au poids de ce boulet et de cette pièce.

..... De même, les vitesses finies imprimées à la pièce et au boulet à l'instant où celui-ci a acquis tout son mouvement, sont réciproquement entre elles comme le poids de cette pièce et de ce boulet.

sur le corps serait le même que celui de la résistance de l'air, l'action du muscle devrait agir également sur la masse du corps et sur celle de l'air. Que, par exemple, à l'instant où la masse du corps est soulevée avec une certaine vitesse, la masse de l'air déplacé devrait recevoir une quantité de mouvement égale à celle de l'oiseau, mais de sens contraire.

Synthèse du coup d'aile descendant. — Sans faire une étude plus approfondie des phénomènes physiques qui présentent quelque analogie avec celui qui nous occupe, adressons-nous à la méthode expérimentale, et tentons de reproduire un coup d'aile descendante afin de voir si la réaction de ce mouvement sur l'appareil schématique sera semblable à celle que nous a montrée l'analyse du vol de l'oiseau.

Dans mes premiers essais j'employai des mécanismes assez compliqués pour produire l'abaissement d'une aile artificielle. J'eus, du reste, dans ces tentatives, un insuccès à peu près complet à cause de la difficulté qu'il y a dans ces conditions à prévoir les effets d'un moteur mécanique destiné à agir contre une résistance mal connue.

Je recourus dès lors à la méthode inverse, et j'empruntai le procédé des géomètres, qui, dans certains problèmes d'une solution embarrassante, supposent le problème résolu et remontent ensuite la série des propositions qui s'enchaînent jusqu'au point de départ.

Supposons donc le problème résolu, et admettons que les coups d'aile de notre machine soulèvent sa masse comme les coups d'aile de l'Oiseau soulèvent la masse de son corps. Si la machine pèse autant qu'un Oiseau d'espèce déterminée, une Buse, par exemple, si les ailes ont la même étendue que celle de la Buse, il semble bien admissible que la même force motrice devra être dépensée de part et d'autre pour produire, dans la machine et chez l'Oiseau, des ascensions de même hauteur. On cherchera ensuite quels effets se produisent suivant qu'on fait varier dans tel ou tel sens le poids de la machine, la surface des ailes ou la force motrice.

ARTICLE N° 13.

Or, pour ce genre d'études il n'est pas besoin d'observer une longue série de coups d'aile. Un seul coup d'aile suffit, s'il soulève l'Oiseau ; à plus forte raison le soulèvement se produira-t-il sous l'influence d'une série de coups d'aile donnés dans des conditions semblables. Le docteur Hureau de Villeneuve a essayé déjà, il y a quelques années, de construire des ailes artificielles qu'il adaptait à une monture légère, et qui, par la détente d'un ressort, s'abaissaient brusquement. On voyait, au moment du coup d'aile, le système tout entier sauter en l'air à une certaine hauteur.

C'est à une disposition de ce genre que nous aurons recours ; et de plus, dans la série d'expériences que nous allons exécuter, nous aurons soin de tenir un compte exact des surfaces qui agiront sur l'air, des forces qui mettront ces surfaces en mouvement, des poids qui seront soulevés, enfin des hauteurs auxquelles ce soulèvement se fera. Pour ce dernier résultat, la méthode graphique sera d'une très-grande utilité.

La figure 9 représente la disposition que j'ai adoptée pour simuler les conditions du phénomène qu'il s'agit de reproduire. De chaque côté, se voient des ailes *aa* faites, en avant, par une nervure de bois, sur laquelle s'implantent des tiges d'acier destinées à former une carcasse élastique que l'on recouvre de papier mince et résistant. Ces ailes ont deux qualités importantes : la légèreté et la solidité. Elles ont aussi une flexibilité qui permet à la partie postérieure de se relever légèrement par l'effet de la résistance de l'air, ainsi que cela se produit dans le vol de l'Oiseau.

La charpente sur laquelle ces ailes s'articulent est ainsi disposée. Une forte traverse de cuivre carrée est mortaisée à ses deux extrémités, et reçoit une pièce métallique qui constitue la base de l'aile : la partie qui correspond à la tête humérale. Toutefois, au lieu des mouvements en tous sens qu'exécute chez l'Oiseau la tête de l'humérus, nous n'aurons ici que l'élévation et l'abaissement que permet une simple charnière. La pièce de cuivre horizontale qui porte les deux ailes est traversée dans sa longueur par une tige verticale sur laquelle sont fixés deux cor-

dons de caoutchouc m, m , qui correspondent aux muscles pectoraux, et vont, comme eux, se rendre en divergeant jusqu'aux

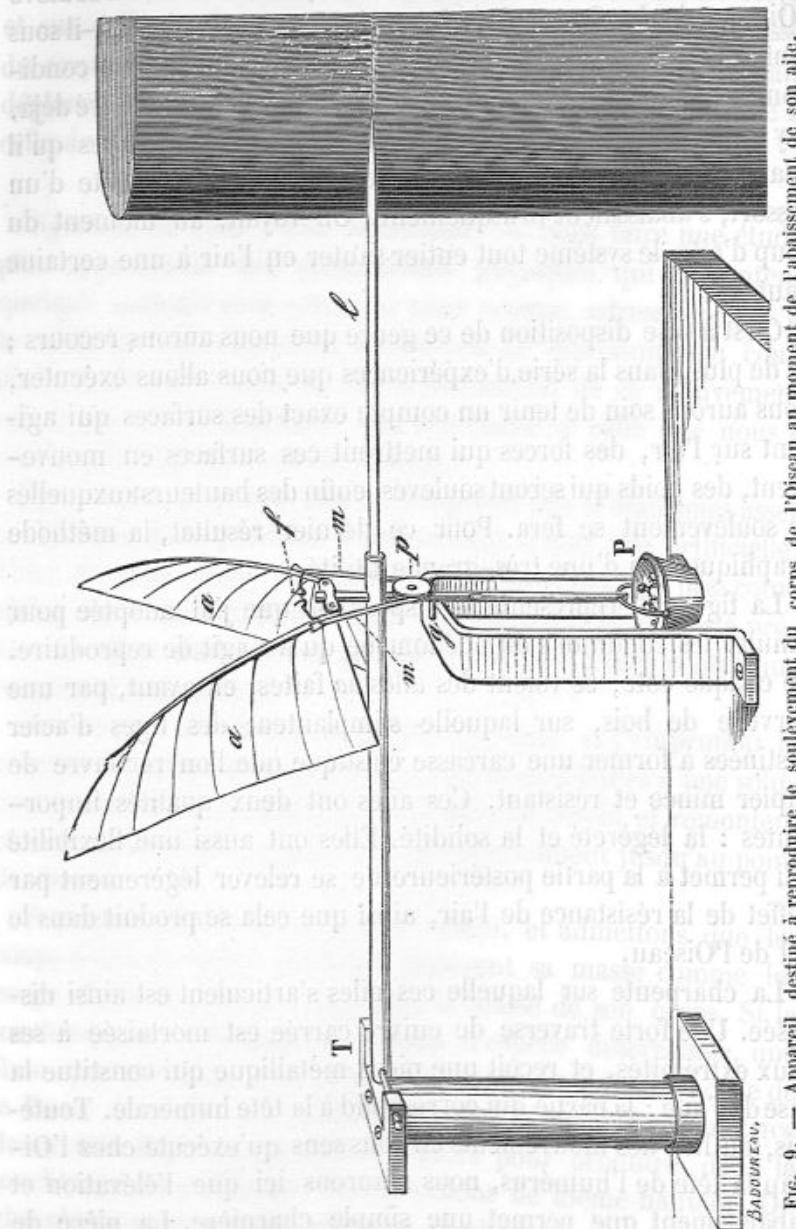


Fig. 9. — Appareil destiné à reproduire le soulèvement du corps de l'Oiseau au moment de l'abaissement de son aile.

nervures des ailes, sur lesquelles ils se fixent dans le voisinage des articulations. L'élasticité de ces fils de caoutchouc servira à

ARTICLE N° 13.

abattre les deux ailes à la fois. En relevant les ailes, on surmonte la résistance du caoutchouc qui se tend, et, quand les ailes sont ainsi relevées, on les maintient dans cette position qui tend les ressorts de caoutchouc. Pour cela, deux crochets d'acier sont implantés perpendiculairement à la nervure des ailes; quand ces crochets sont amenés presque au contact l'un de l'autre, on les maintient en cette position au moyen d'un fil de lin *f*. Il suffit de brûler le fil pour que les ailes, obéissant toutes deux aux ressorts de caoutchouc qui les tirent, s'abattent brusquement.

Mais il est difficile de donner aux deux caoutchoucs le même degré de tension: de là résulte une prédominance de l'action d'un des ressorts, et conséquemment de l'action d'une des ailes. Pour obvier à cet inconvénient, j'ai pris un fil unique de caoutchouc attaché par chacun de ses bouts à l'une de ces ailes, et l'ai fait reposer à la partie moyenne dans la gorge d'une poulie verticale *p* qui tourne librement. De cette façon, l'effort du fil de caoutchouc se partage très-également entre les deux ailes qu'il doit mouvoir.

Le poids des pièces qui viennent d'être décrites n'est pas très-considérable; aussi, pour soumettre l'appareil à des charges croissantes, ai-je adapté une tige verticale articulée qui pend au-dessous du système, portant à son extrémité un godet *P*, dans lequel on jette des poids additionnels.

L'intérêt des expériences que l'on peut faire avec cet appareil consiste tout entier dans l'appréciation exacte des différentes hauteurs auxquelles le soulèvement se fera, suivant les charges, les surfaces d'ailes, les degrés de tension du ressort, etc. J'ai disposé le schéma de façon qu'il pût tracer sur une surface enfumée les indications de ses soulèvements; pour cela, je l'ai asservi à se mouvoir dans un plan vertical.

Une tige creuse, longue et légère, traverse d'arrière en avant la monture métallique qui représente le squelette de l'Oiseau. Cette tige se termine en arrière par une traverse horizontale *T*, dont les deux extrémités pivotent librement dans une chape vissée sur une forte colonne. La tige rigide impose donc à l'ap-

pareil des oscillations verticales. En avant de l'Oiseau, et sur le prolongement de cette même tige qui dirige ses mouvements, s'en trouve une autre, *l*, mince et légère, terminée par une pointe écrivante. C'est cette pointe qu'on amène au contact, soit d'un cylindre tournant, soit d'une simple plaque de verre enflammée sur laquelle se trace un trait dont la longueur exprime la hauteur à laquelle la machine s'est élevée à chaque coup d'aile.

Enfin le schéma, au repos, est soutenu par un solide arceau de fer sur la plate-forme duquel s'appuie une goupille *g*, horizontale, courte et forte, implantée dans la tige verticale de l'appareil.

Il s'agit de faire des séries d'expériences, en variant graduellement une seule des conditions dont j'ai parlé plus haut : poids, surface d'aile ou force du ressort.

Une précaution est nécessaire pour que les ailes soient toujours également élevées et les ressorts également tendus : elle consiste à fabriquer à l'aide d'un mandrin de bois les anneaux de fil qui relieront ces crochets et tiendront l'appareil armé jusqu'à ce qu'on les brûle. Ces anneaux, ayant un diamètre constant, amèneront les deux crochets toujours à la même distance l'un de l'autre, et par conséquent tiendront toujours également les ressorts de caoutchouc.

PREMIÈRE EXPÉRIENCE : *Influence du poids à soulever sur l'amplitude du mouvement ascensionnel.* — Après avoir, par le tâtonnement, établi des surfaces d'ailes assez grandes et employé un ressort assez fort pour que l'abaissement des ailes soulève tout le système à quelques centimètres de hauteur, on détermine le poids total de la machine en glissant le fléau d'une balance dessous du poids *P*. L'appareil, pesé ainsi avec la tige qui sert à le diriger, représente un poids de 195 grammes environ.

On constate que le coup d'aile élève le schéma à 7 centimètres, par exemple. Alors on ajoute un poids additionnel de 10 gram., et l'on voit que l'appareil ne s'élève plus qu'à 6 centimètres et demi. Une nouvelle addition de 10 grammes réduit encore la hauteur à laquelle la machine s'élève. On procède ainsi par

ARTICLE N° 13.

additions successives de poids constants, jusqu'à ce que le coup d'aile ne soulève plus du tout l'appareil, et l'on obtient la courbe des hauteurs auxquelles un même effort soulève des poids graduellement croissants (fig. 10).

Les hauteurs auxquelles s'élèvent l'appareil portant des charges croissantes sont obtenues par l'application de la loi de Hooke à une machine à sauter qui fonctionne avec un ressort de 1800 grammes de force ; les hauteurs sont mesurées avec un compas à 1 mm près.

La deuxième série, recommandée dans l'ouvrage précédent, abrite une machine à sauter qui fonctionne avec un ressort de 2700 grammes de force ; les hauteurs sont mesurées avec un compas à 1 mm près.

En comparant cette deuxième série à la première, on voit qu'à mesure que la machine saute plus haut, l'effet du ressort plus puissant se prononce davantage.

Une troisième série, recommandée avec un ressort de 2700 grammes de force, donne des hauteurs avec un ressort de

FIG. 10. — Hauteurs auxquelles s'élève l'appareil portant des charges croissantes.

Les hauteurs du saut de l'appareil décroissent visiblement en raison de l'accroissement de la charge ; il semble même, au premier abord, que la diminution de l'amplitude soit proportionnelle à l'accroissement du poids, mais il n'en est rien : le rapport est plus complexe. Si la hauteur du saut était inversement proportionnelle à la charge, on verrait les sommets de toutes les lignes tracées par la machine situés sur une même ligne droite, ce qui n'a pas lieu, ainsi qu'on peut s'en assurer dans la figure suivante.

Mais si les hauteurs auxquelles s'élève l'appareil sous des charges régulièrement croissantes ne sont pas régulièrement décroissantes, le travail effectué, c'est-à-dire le produit de la charge par la hauteur du soulèvement subit une décroissance régulière. Le lecteur pourra s'en convaincre au moyen d'une construction très-simple, dont la figure 10 fournit tous les éléments. Toutefois les quatre derniers tracés font exception à

cette règle ; cela m'a paru tenir à l'intervention d'une force étrangère : l'élasticité de la goupille qui supporte l'appareil au repos.

DEUXIÈME EXPÉRIENCE : *De l'influence de la force motrice sur la hauteur à laquelle se soulève l'appareil.* — Jusqu'ici c'est un ressort de force quelconque qui a servi à mettre en mouvement l'appareil schématique. Le tâtonnement seul avait présidé au choix de ce ressort, dont j'ai graduellement augmenté la tension, jusqu'à ce qu'il produisit le soulèvement désiré.

La série suivante d'expériences a été faite avec des ressorts de forces décroissantes.

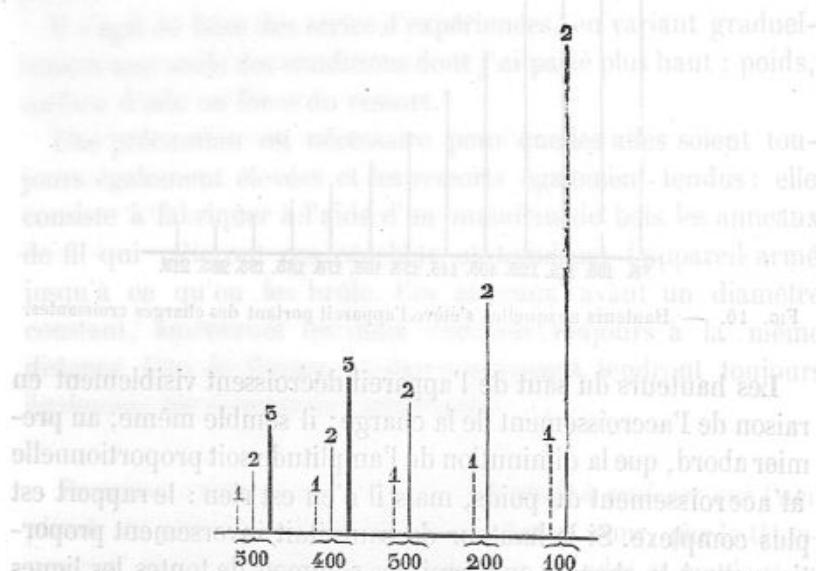


FIG. 11. — Hauteurs auxquelles s'élève l'appareil sous l'influence de ressorts de forces différentes.

Un tube de caoutchouc bien homogène développe toujours la même traction, lorsqu'on en prend un tronçon quelconque, d'une longueur donnée, soumis à une même élongation. J'ai donc pris trois morceaux de ce tube, semblables en longueur, et j'en ai employé d'abord un seul, puis deux à la fois, puis trois, pour produire l'abaissement des ailes de la machine ; chaque tube développait environ un effort statique de 900 grammes.

La figure 11 montre trois séries d'expériences comparatives.

ARTICLE N° 13.

Chaque série est faite avec une même force de ressort, mais avec des poids variés graduellement décroissants.

Pour distinguer ces trois séries entre elles, on a donné aux traits des aspects différents.

La série première, formée de tous les tracés qui sont ponctués et portent le n° 1, a été obtenue avec un ressort de 900 grammes de force ; les charges successivement employées allaient en décroissant, à partir de 500 grammes jusqu'à 100.

La deuxième série, reconnaissable aux traits plus fins dont elle est formée et aux numéros d'ordre de chacun de ses tracés, a été obtenue avec un ressort de 1800 grammes de force ; les mêmes variations de poids ont été employées.

En comparant cette deuxième série à la première, on voit qu'à mesure que la machine s'allège, l'effet du ressort plus puissant se prononce davantage.

Une troisième série a été entreprise avec un ressort de 2700 grammes de traction, mais elle a été interrompue dès la troisième expérience ; l'un des tubes de caoutchouc a présenté un commencement de déchirure. L'appareil ne pouvait, après cela, donner des résultats comparables à ceux qu'il avait fournis précédemment ; de là interruption forcée de la série commencée.

TROISIÈME EXPÉRIENCE : *Influence de l'étendue des surfaces des ailes sur la hauteur de soulèvement.* — Les expériences précédentes étaient faites avec des surfaces d'ailes constantes pour chaque série. L'aile employée dans les expériences représentées figure 40 était de grande dimension ; la surface totale était 1092 centimètres carrés.

Pendant la construction de l'appareil, alors qu'il n'y avait encore que la partie externe des ailes qui fut garnie de papier, je fis une série d'expériences avec charges croissantes. La surface qui agissait sur l'air n'était que de 700 centimètres carrés. Après avoir obtenu la série de tracés représentés figure 42 par des lignes pleines, je continuai à couvrir de papier la char-

pente de l'aile, et j'augmentai ainsi de 392 centimètres la surface résistante.

Une série d'expériences faites dans ces conditions nouvelles me donna des résultats très-peu différents des premiers, ce qui prouve bien que la surface de l'aile n'agit efficacement pour soulever l'Oiseau qu'autant qu'elle est située au bout d'un bras de levier considérable, c'est-à-dire soumise à un mouvement rapide.

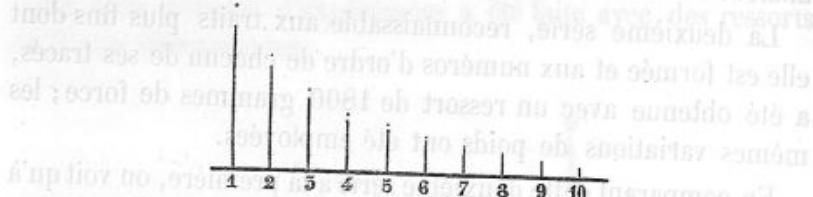


FIG. 12. — Hauteurs auxquelles s'élève l'appareil avec des surfaces d'ailes plus ou moins étendues.

Les tracés nouveaux obtenus avec la grande surface d'aile avaient leurs sommets au niveau de la série de points qui surmontent les traits pleins dans la figure 12. La différence des seconds tracés avec les premiers portait principalement sur les expériences faites avec le minimum de charge; cette différence diminuait graduellement à mesure que l'appareil était plus chargé; elle a disparu complètement après la septième expérience. Les nouveaux tracés se confondent alors avec les anciens, et la série des points arrive au contact des traits, dont elle ne se distingue plus.

CHAPITRE III.

APPLICATIONS PHYSIOLOGIQUES DES EXPÉRIENCES SCHÉMATIQUES FAITES SUR LE COUP D'AILLE DESCENDANT.

1° De la masse à mouvoir. — 2° De la force élastique du muscle qui abaisse les ailes. — 3° De la résistance de l'air et de son point d'application. — 4° Des moments d'action de la force motrice et de la résistance de l'air. — Évaluation théorique de la force musculaire de l'Oiseau; contrôle expérimental.

Les expériences précédentes sont destinées à éclairer les conditions dynamiques dans lesquelles l'Oiseau, frappant l'air de son

ARTICLE N° 13.

aile, se soulève verticalement. Laissons de côté, pour un instant, l'impulsion horizontale qui se produit dans ce même coup d'aile ; le schéma que j'ai employé ne permet pas à ce mouvement de se manifester.

Si nous bornons notre étude au mouvement ascensionnel, dans l'Oiseau et dans le schéma, nous trouvons, de part et d'autre, une parfaite identité. Les éléments du problème mécanique sont les suivants : 1^o la masse qui doit être soulevée ; 2^o la force élastique du muscle ou du ressort qui abaissera les ailes ; 3^o la résistance de l'air ; 4^o le moment de la résistance de l'air et celui de la force musculaire. Ces diverses données nous fourniront le sujet d'une utile comparaison entre le mécanisme du coup d'aile de l'Oiseau et celui du schéma.

Avec ces éléments, il deviendra possible de déterminer le travail total déployé par le ressort moteur ou par le muscle chez l'Oiseau ; enfin, on pourra faire la part du travail inutile et de celui qui est utilisé.

1^o *De la masse à mouvoir.* — Dans les expériences ci-dessus, l'appareil pouvait être soumis à des charges variées qui le portaient au poids de 500 grammes dans le schéma à petites ailes et de 8 à 900 grammes dans le schéma à grandes ailes.

Ces poids étaient souvent supérieurs à ceux des Oiseaux véritables, le Faucon et la Buse par exemple, dont les ailes présentent à peu près les dimensions de celles que nous avions construites. On ne peut donc pas dire qu'au point de vue de la masse à soulever, les expériences schématiques aient été faites dans des conditions de travail moindre que celui qui se produit à chaque coup d'aile de l'Oiseau.

2^o *De la force élastique du muscle et de celle du ressort qui abaisse les ailes.* — Ces deux forces sont parfaitement comparables entre elles. J'ai montré ailleurs (1) combien Ed. Weber avait raison d'assimiler les muscles à des ressorts, et de définir leur force motrice : « *L'effet d'une force élastique considérable acquise par le muscle au moment de l'excitation nerveuse.* »

(1) Marey, *Du mouvement dans les fonctions dans la vie*, p. 285.

Une objection, cependant pourrait être faite à cette comparaison : c'est que, dans un ressort, la force élastique a été emmagasinée au moment où l'on a bandé ce ressort, et que cette force, si elle ne trouve pas de résistance, peut se dépenser en un instant extrêmement court. Dans le muscle, au contraire, la force élastique qui produit le mouvement s'engendre pendant l'acte même dans lequel elle se dépense, ce qui limite beaucoup, dans certains cas, la rapidité du mouvement que produit un muscle. L'exemple des muscles de la Tortue est un des meilleurs que l'on puisse citer. En effet, les muscles de cet animal mettant en général plus d'une seconde à engendrer la force élastique qu'ils auront à dépenser (1), il est évident que la Tortue ne saurait exécuter un acte musculaire complet en un temps moindre qu'une seconde.

Mais, si la différence qui existe entre un muscle et un ressort peut être très-grande dans certaines conditions dynamiques et chez certains animaux, cette différence n'existe pour ainsi dire pas dans les conditions qui nous occupent.

D'une part, la production de la force élastique des muscles de l'Oiseau est si rapide, que le temps nécessaire à la produire est négligeable. J'ai montré, en effet, que la secousse musculaire d'un Oiseau dure à peine 2 ou 3 centièmes de seconde, et que, par conséquent, la période d'accroissement de sa force élastique dépasse à peine 1 centième de seconde.

D'autre part, un ressort tendu, bien qu'il possède toute la force motrice qu'il devra dépenser, est limité, en général, dans la vitesse avec laquelle il dépensera cette force. Ce qui ralentit la vitesse avec laquelle ce ressort revient sur lui-même, c'est la résistance qu'il doit vaincre. Or, dans le coup d'aile descendant d'un Oiseau, ou dans la descente de l'aile du schéma, la résistance de l'air intervient pour réduire la vitesse de raccourcissement du muscle aussi bien que celle du ressort. Le temps d'abaissement de l'aile d'une Buse est parfois d'environ 13 centièmes de seconde ; on voit que, par rapport à cette durée,

(1) *Loc. cit.*, p. 367.

le temps de production de la force élastique dans le muscle est négligeable, et qu'on peut légitimement assimiler l'effet de ce muscle à celui du ressort préalablement tendu qui sert de moteur dans le schéma.

Enfin, on peut mesurer sur l'Oiseau la force élastique du muscle grand pectoral, en déterminant le poids qui fait équilibre à sa contraction. Nous avons vu précédemment que sur la Buse adulte, cette force est d'environ 42^{kg},600 pour chacun des pectoraux.

Dans le schéma, on évalue la force élastique du ressort en mesurant par une expérience préalable quel est le poids dont on doit le charger pour lui donner le degré de tension avec lequel il fonctionnera. Ainsi, on chargera de poids ce ressort jusqu'à ce qu'il ait acquis la force élastique qui représente celle du muscle grand pectoral de l'Oiseau. Il faut, pendant cette évaluation de la force élastique du ressort, que les ailes aient été préalablement placées dans l'élévation, afin d'avoir la mesure de la force élastique du ressort lorsque celui-ci est tendu au maximum.

3° De la résistance de l'air et de son point d'application. —

Puisque nous n'avons pas mesuré la durée d'abaissement de l'aile dans le schéma, nous ne pouvons évaluer par le calcul la résistance que l'air doit exercer au-dessus de l'aile. Mais l'expérience nous ayant démontré que la masse du corps est soulevée par l'abaissement de cette aile, nous sommes autorisé à conclure que la somme des pressions de l'air contre les deux ailes est un peu supérieure au poids du corps. Si nous chargeons graduellement le corps de la machine de manière à réduire à son minimum le soulèvement qui se produit à chaque coup d'aile, nous pouvons admettre qu'au moment où ce minimum est atteint, la résistance de l'air fait exactement équilibre au poids de la machine.

Ainsi, étant donné un Oiseau ou un schéma du poids de 600 grammes, il faut, pour qu'il se soulève, que la résistance verticale éprouvée de bas en haut excède 300 grammes pour chaque aile; si cette résistance égale seulement 300 grammes,

le corps de l'Oiseau sera soutenu, mais non soulevé, pendant que les ailes s'abaissent.

4° Du moment de la force motrice et de celui de la résistance de l'air. — Cette poussée de 300 grammes, qui représente la somme des résistances éprouvée par l'aile, agit en un point que nous avons vu être situé à la réunion du tiers externe avec les deux tiers internes de chaque aile. Cette considération du point d'application de la résistance de l'air est de la plus grande importance; elle permet en effet de déterminer quelle doit être, au minimum, la force élastique du ressort moteur.

En effet, essayons d'appliquer sous les ailes du schéma une force qui soulève l'appareil. Plaçons, par exemple, un doigt sous chacune des ailes; il est clair que nous souleverons la machine avec un effort total de 600 grammes, quel que soit le point de chaque aile sous lequel le doigt sera placé. Mais il faut pour cela que *les ailes restent rigides* et que le ressort qui les tire en bas ne subisse pas d'élongation; sans quoi, les ailes s'élèveraient seules et la masse de l'appareil ne se souleverait pas.

Or, la force qui tend à allonger le ressort de caoutchouc varie, non pas avec l'intensité de la poussée ascendante que les doigts exercent sous les ailes, celle-ci ne saurait excéder le poids de la machine, mais avec le bras de levier au bout duquel cette poussée s'exerce. Si ce bras est très-court, on peut soulever la machine sans que les ressorts fléchissent. Mais si l'on applique les doigts sous des points de l'aile de plus en plus éloignés de l'articulation, il arrive un moment où le ressort cède et où l'aile s'élève, en tendant le ressort, sans que la machine puisse être soulevée. C'est qu'alors l'effort exercé sous l'aile, multiplié par le bras du levier au bout duquel cet effort s'exerce, surpassé la force élastique du ressort multipliée par le bras très-court au bout duquel elle est appliquée.

Rapport entre le moment d'action de la force motrice et celui de la résistance de l'air. — Le point d'application de la résistance

ARTICLE N° 43,

de l'air se trouve, avons-nous dit, à l'extrémité d'un levier dont la longueur serait environ les deux tiers de la longueur totale de l'aile. L'attache du ressort à la nervure de l'aile n'a pour bras de levier que le vingtième, peut-être, de la longueur totale (nous déterminerons plus tard ces longueurs véritables). Il faut donc que la force élastique du ressort excède la poussée de l'air en raison inverse de la longueur de ces bras inégaux.

Fixons les idées provisoirement sur des chiffres arbitraires. Le corps de la machine pèse 600 grammes ; la poussée ascendante excédant 300 grammes pour chacune des ailes s'exerce à 40 centimètres de l'articulation ; l'attache du ressort qui abaisse l'aile est située à 2 centimètres de cette même articulation. Il faudra, pour que la machine se soulève, que la force du ressort, multipliée par son bras de levier très-court, excède la poussée de 300 grammes multipliée par son long bras de levier.

On aura donc le rapport suivant : $300 \times 40 < F \times 2$, F représentant la force élastique du ressort d'une des ailes ; d'où :

$$\text{Dans notre hypothèse } F > \frac{120,000}{2}, \text{ ou 6 kil.}$$

Si la force F n'excédait pas 6 kilogrammes, elle ne pourrait surmonter la poussée de l'air qui est nécessaire à soulever la machine. Ou, pour mieux dire, la force du ressort ne saurait imprimer à l'aile une vitesse capable de lui faire éprouver sur l'air la résistance nécessaire au soulèvement de l'appareil.

On peut se convaincre de la réalité de ce principe au moyen de l'expérience suivante.

Soit (fig. 13) M la masse à soulever dans le schéma ; nous négligerons la masse des autres parties de l'appareil. Soient f, f' , les ressorts qui abaissent l'aile et leur force motrice qui s'applique en f, f' ; soient r, r , la résistance de l'air contre chaque aile, et r', r' , les points d'application de ces résistances aux ailes dont les centres de mouvement sont en o, o .

Quelle que soit la valeur de r , nous connaissons son point d'application r' . On peut établir que le moment de la résistance $r(r'o)$ est sensiblement égal à celui de la puissance $f(f'o)$. En

effet, si le moment de la résistance excédait celui de la puissance, le mouvement ne pourrait avoir lieu; d'autre part, si le moment de la résistance était sensiblement plus faible que celui de la puissance, le mouvement de l'aile s'accélérerait jusqu'à ce que l'égalité s'établît.

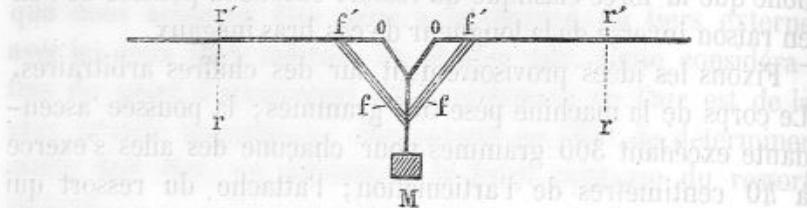


FIG. 13.

Or, nous soutenons que sous chaque aile la pression r est au moins égale à $1/2 M$.

Dans l'hypothèse où $r = 1/2 M$, comme nous sommes conduits à admettre que le moment de la force motrice est au moins égal à celui de la résistance, nous aurons cette égalité :

$$1/2 M (r' o) = f (r' o).$$

D'où l'on peut conclure que si l'on appuyait deux doigts sous les ailes au niveau des points r', r' , on soulèverait la masse de l'Oiseau sans faire céder l'élasticité des ressorts f, f .

L'expérience montre que toutes les fois que le schéma pouvait s'enlever par un coup d'aile, on pouvait aussi le soulever en le soutenant au-dessous des points r', r' , et que les ressorts ne fléchissaient pas.

Dans l'hypothèse où r peut être beaucoup plus petit que $1/2 M$, le moment de la puissance du ressort est nécessairement moins grand que dans le cas précédent. Dès lors, en appuyant sous les ailes aux points r', r' , on fera céder l'élasticité des ressorts sans soulever l'appareil, et les ailes seules s'élèveront.

L'expérience a montré que dans ces conditions, le schéma ne se soulève point par l'effet du coup d'aile.

Elle montre, en outre, que la machine cesse précisément

ARTICLE N° 13.

de se soulever par l'action de son ressort, au moment où la force de ce ressort, graduellement diminué, ne lui permet plus de résister à un effort ascendant égal à la moitié du poids de l'Oiseau et appliqué sous chaque aile au même point que la résistance de l'air.

Pour ne laisser aucun doute sur la réalité du principe qui établit que la résistance de l'air doit toujours être au moins égale au poids de l'Oiseau, reprenons l'expérience dans des conditions nouvelles.

Sans changer la force du ressort, faisons, cette fois, varier le poids dont nous chargerons l'appareil. Les tracés représentés figure 10 montrent que, sous des charges croissantes de 95 grammes à 215, la hauteur à laquelle la machine se soulevait allait toujours en décroissant. Nous avons estimé qu'à 215 grammes de charge, l'appareil cessait de se soulever (le faible tracé qu'on obtient alors, et qui persiste même pour des charges beaucoup plus fortes, semble tenir à un ébranlement vibratoire communiqué au style comme à toute la machine).

Dans notre hypothèse, tant que l'appareil a sauté en abattant ses ailes, il devait aussi pouvoir être soulevé par une pression exercée sous ses ailes, au point où s'applique la résistance de l'air. Quand il a cessé de pouvoir être soulevé ainsi sans que ses ressorts fléchissent, il a dû aussi cesser de sauter à chaque coup d'aile.

C'est précisément ce qui a lieu dans l'expérience. Arrivé à la charge de 215 grammes, l'appareil ne sautait plus, et, d'autre part, ses ailes s'élevaient seules sous la pression des doigts, lorsque ceux-ci, placés aux points d'application de la résistance de l'air, tendaient à soulever tout l'appareil.

S'il reste un certain vague dans la détermination du poids nécessaire pour empêcher le fonctionnement du schéma, cela tient, d'une part, à la difficulté d'établir le moment où l'appareil cesse entièrement de s'élever, et, d'autre part, à la difficulté de déterminer avec une grande précision le point d'application de la pression de l'air sur l'aile. Mais les résultats ci-dessus men-

tionnés sont bien suffisamment nets pour établir ce principe très-important :

Que la résistance que les ailes rencontrent sur l'air doit être au moins égale au poids de l'Oiseau.

Cette égalité étant admise, il serait intéressant de rechercher si la force maximum des muscles d'un Oiseau répond à ce que la théorie lui assigne.

Évaluation théorique de la force musculaire de l'Oiseau. — Contrôle expérimental. — Nous avons essayé autrefois (1) de faire cette détermination, et nous avons trouvé dans une expérience faite sur la Buse, que l'effort total développé par chacun des muscles grands pectoraux était de 12^{kg},60. Dans la même expérience, nous avons évalué à 17 millimètres le bras de levier au bout duquel cette force est appliquée.

D'après les dimensions ordinaires et la forme de l'aile de la Buse, il semble qu'on puisse placer le point d'application de la pression de l'air au bout d'un bras de levier de 40 centimètres de longueur. Enfin, d'après un tableau dans lequel j'avais réuni le poids de différents Oiseaux tués au fusil, le poids de la Buse est de 785 grammes. S'il est vrai que la pression de l'air sous chaque aile soit égale à la moitié du poids du corps, cette pression sera d'environ 392 grammes.

Pour que le vol s'effectue, il faut que le moment de la force motrice soit au moins égal à celui de la pression de l'air; nous devons même nous attendre à le trouver un peu supérieur, de façon à obtenir le rapport :

$$\begin{aligned} F \times 17\text{mm} &> 392 \times 400\text{mm}, \\ \text{ou } 12\,600 \text{ gr.} \times 17 &> 392 \text{ gr.} \times 400, \\ \text{ou } 214\,200 &> 156\,800. \end{aligned}$$

L'excès du moment de la force motrice sur celui de la résistance de l'air devait exister, avons-nous dit; l'estimation ci-dessus nous montre qu'il est à peu près dans le rapport de 11 à 8 dans un cas particulier.

(1) *Ann. des sciences nat.*

ARTICLE N° 43.

Une plus grande rigueur n'est pas de mise dans des expériences de ce genre : en effet, on ne sait pas si la force que la volonté de l'Oiseau engendre dans ses muscles, à chaque coup d'aile, est bien égale à celle que nous y développons par des excitations électriques ; qu'on joigne à cela la difficulté de déterminer avec précision le bras de levier de la force musculaire et celui de la résistance de l'air, et l'on aura la conviction que nous avons obtenu tout le degré de précision que comporte une estimation dans un acte physiologique.

Toutefois, pour ne pas tirer de conclusion d'après un seul fait, dans une circonstance si importante, j'ai répété sur un Pigeon adulte la détermination de la force musculaire ; voici les résultats de cette détermination.

Poids du Pigeon, 375 grammes. La moitié de ce poids sera égale à la pression de l'air sous chaque aile ; soit, pour cette résistance, 187 grammes. Le point d'application de cette pression de l'air sur l'aile serait situé environ à 23 centimètres de l'articulation humérale. *Le moment de la résistance de l'air sera donc $187 \times 230^{\text{mm}} = 43\,010$.*

Pour déterminer le moment de la force musculaire, j'ai constaté d'abord que le grand pectoral électrisé développait un effort total de 5860 grammes ; l'attache de ce muscle se fait environ à 12 millimètres de l'articulation. *Le moment de la puissance sera donc $5860 \times 12 = 70\,320$.*

Le rapport de 70 à 43 est ici plus favorable à la puissance que dans l'expérience ci-dessus. Peut-être cela tenait-il à la faiblesse du poids du Pigeon, qui nous a fait estimer très-bas la valeur de la résistance de l'air. C'était une femelle adulte qui venait de couver pendant plusieurs jours ; elle était très-maigre et avait sans doute subi plus de déchet dans son poids que dans sa force musculaire.

Il ressort de ces deux déterminations expérimentales que les muscles de l'Oiseau ont toujours plus de force qu'il n'en faut pour faire équilibre à la résistance de l'air, qui serait égale au poids du corps de l'Oiseau multiplié par le bras de levier au bout duquel agit cette résistance.

Toute cette force n'est sans doute pas nécessaire dans le vol ordinaire, mais elle peut servir en certaines circonstances. Sans parler des Oiseaux rapaces auxquels les fabulistes font enlever des animaux de grande taille, on peut citer des exemples authentiques de poids considérables enlevés par des Oiseaux. Silberschlag avait un Aigle apprivoisé qui volait en enlevant une boule de cuivre du poids de quatre livres. J'ai fait enlever par un Pigeon un poids de plus de 100 grammes ; une Buse en enlevait 300, un Canard sauvage en soutenait à peine 60.

CHAPITRE IV.

NOUVELLE SÉRIE D'EXPÉRIENCES.

Comparaison des mouvements de l'Oiseau avec ceux de l'appareil schématique destiné à les imiter. — Appareils destinés à réaliser cette comparaison.

Dans les chapitres qui précédent, nous avons vu tour à tour comment on peut analyser chacun des phénomènes du vol des Oiseaux, et comment on peut, au moyen d'artifices mécaniques, reproduire chacun des mouvements de l'aile avec les effets qui lui sont propres dans le vol. Dans ces études, le lecteur aura, j'espère, puisé cette conviction que rien ne peut résister à l'emploi de la double méthode où l'analyse s'allie à la synthèse. Si, parmi les mouvements complexes que l'Oiseau exécute en volant, il n'en est aucun qui puisse échapper aux appareils d'analyse, il n'est aucun mouvement, non plus, qu'on ne puisse reproduire artificiellement au moyen d'appareils schématiques appropriés.

Mais pour tirer de cette méthode le meilleur parti possible, il faut l'appliquer de telle sorte que nous puissions passer à tout instant de l'analyse à la synthèse ; comparer à tout instant le mouvement de l'Oiseau qui vole à celui du schéma par lequel nous cherchons à imiter ce mouvement. Cette incessante comparaison exige que nous nous placions dans des conditions nouvelles. En effet, nos études analytiques ont porté jusqu'ici sur un Oiseau qui vole en liberté, et tant que nous n'aurons pas entièrement résolu le problème que nous poursuivons, il nous est im-

ARTICLE N° 43.

possible d'abandonner à lui-même un appareil artificiel, il se briserait à chaque expérience.

Or, la comparaison des mouvements de l'Oiseau avec ceux du schéma n'exige pas que ces mouvements s'effectuent dans les conditions du vol libre ; pourvu que l'Oiseau batte des ailes avec l'intention de voler, nous pourrons étudier ses actes musculaires avec leur caractère de force, d'étendue, de durée. Un Oiseau qu'on aurait suspendu à un fil, et qui battrait des ailes, pourrait, par exemple, être comparé à un appareil schématique suspendu de la même façon. Mais ce procédé grossier de suspension aurait des inconvénients ; il gênerait les mouvements de l'Oiseau en s'opposant à la production régulière des réactions que chaque coup d'aile produit sur la masse du corps ; il ne permettrait pas non plus la translation de l'animal. J'ai essayé d'un mode de suspension moins imparfait, qui permet, d'une part, à l'Oiseau de voler dans des conditions à peu près normales, et qui, d'autre part, fournit au schéma le moyen de s'essayer dans ses tentatives de vol sans qu'on ait à craindre de le voir tomber, si les mouvements qu'il produit sont insuffisants à le soutenir en l'air. Voici la description de cet appareil.

Il s'agit d'une sorte de manège de 6 à 7 mètres de diamètre, dans lequel l'Oiseau se meut sans cesse, pouvant ainsi fournir à l'observation un vol circulaire de longue durée. Je donne à ce manège un grand rayon, afin que sa courbe, moins brusque, modifie moins la nature du mouvement que l'Oiseau devra exécuter. Attelé, en quelque sorte, à l'extrémité d'un long bras qui tourne sur un pivot central, l'Oiseau doit être, autant que possible, libre d'exécuter des mouvements d'oscillation verticale. Nous avons vu, en effet (1), qu'à chacune des évolutions de l'aile, le corps exécute un double mouvement d'oscillation.

L'animal ou l'appareil schématique, placé dans ces conditions d'expériences, doit fournir à des instruments enregistreurs le tracé de tous ces mouvements. A cet effet, des appareils explorateurs spéciaux, des tubes de transmission et un enregistreur

(1) *Ann. des sc. nat.*, 1869, t. XII.

particulier devront être mis en usage. Toutes ces pièces, assez compliquées, mais dont plusieurs sont déjà connues du lecteur,

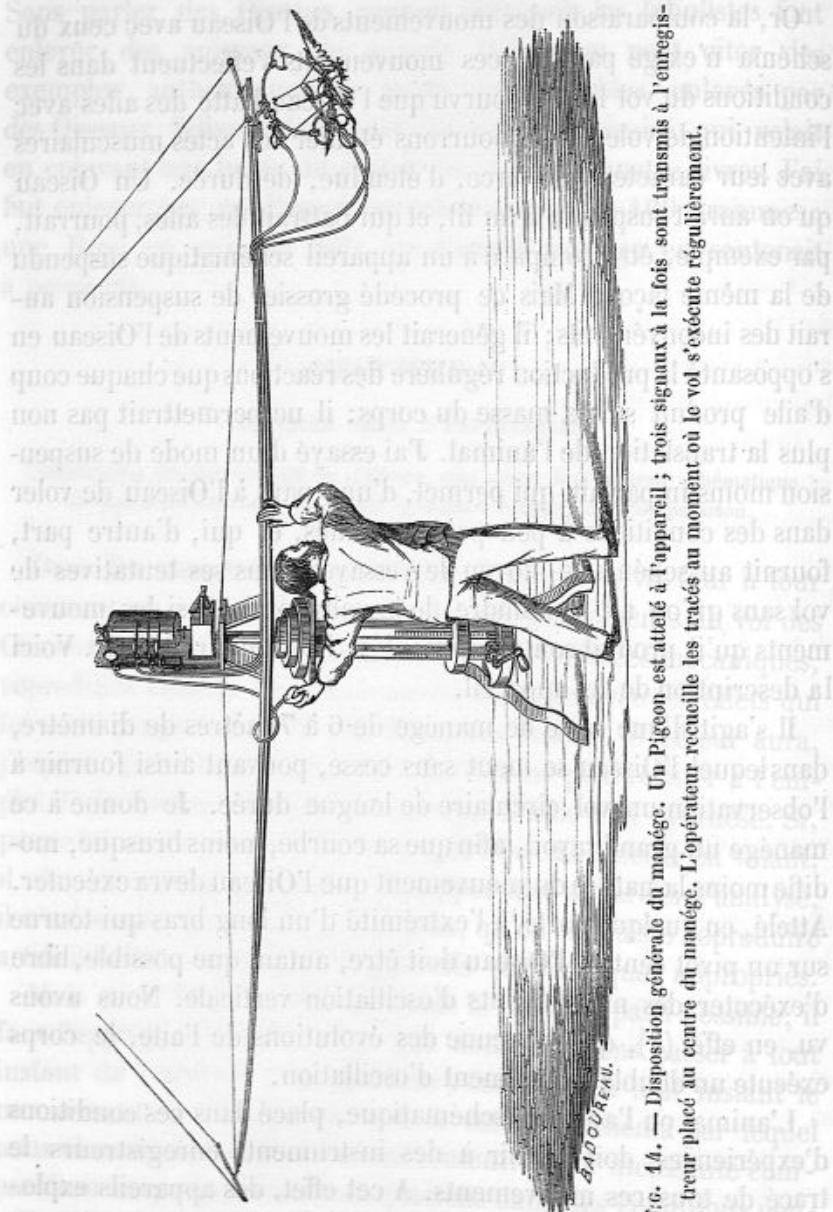


Fig. 14. — Disposition générale du manège. Un Pigeon est attelé à l'appareil ; trois signaux à la fois sont transmis à l'enregistreur placé au centre du manège. L'opérateur recueille les tracés au moment où le vol s'exécute régulièrement.

auront besoin d'une description spéciale. Pour plus de netteté, je décrirai séparément les pièces de la machine qui répondent à

ARTICLE N° 13.

des fonctions distinctes, et passera en revue successivement les parties suivantes : le *manége*, l'*appareil suspenseur*, les *exploreurs du mouvement*, et enfin l'*enregistreur*.

Du manége.— Les conditions à remplir sont : la grande mobilité du manége, afin que l'Oiseau sente le moins possible de résistance à vaincre pour sa translation, et la rigidité des bras de la machine pour empêcher qu'elle ne prenne des vibrations propres, capables de dénaturer les mouvements exécutés par l'Oiseau.

La figure 14 montre la disposition générale du manége. Un pivot d'acier planté dans un socle de fonte massif et d'un grand poids, est placé sur la plate-forme d'une table de photographe. Cette table s'élève au moyen d'une crémaillère, de façon que l'opérateur, après avoir disposé ses appareils suivant les besoins de l'expérience, puisse éléver la plate-forme assez haut pour que le manége tourne librement au-dessus de sa tête.

Le manége proprement dit est un arc formé d'une longue planchette de sapin légèrement courbée. La corde de cet arc est un fil métallique qui, à sa partie moyenne, se fixe sur une cage de bois traversée par le pivot central. On a soin d'équilibrer les deux bras de l'appareil, c'est-à-dire d'ajouter des poids gradués au bras qui ne porte pas l'Oiseau ou la machine en expérience. Sans cette précaution, l'appareil, en tournant, imprimerait des mouvements de latéralité au pivot sur lequel il repose et à la base elle-même.

Cette première disposition du manége était défectueuse à certains égards. La rigidité du bras était assez parfaite, mais le pivot central, quelque gros qu'il fût, exécutait encore des flexions latérales dont l'effet s'exagérait à l'extrémité des bras du manége, en raison de la longueur même de ces bras. Il s'ensuivait que des oscillations du plan du manége tendaient à se produire. Pour les supprimer entièrement j'ai dû chercher un point de suspension au plafond même de la salle, où j'appliquai un crochet tournant verticalement au-dessus du pivot du manége. Deux cordons fortement tendus, descendant du crochet à l'extré-

mité des bras de la machine, ont supprimé toute espèce d'oscillation de ces bras.

Un autre inconvénient existait encore malgré cela. Les bras du manège étaient susceptibles de subir une torsion suivant leur axe. Cet effet se produisait surtout dans les moments où l'Oiseau imprimait à son corps des mouvements de progression saccadés.

J'ai fait totalement disparaître cette tendance à la torsion des bras du levier, en terminant chacun de ceux-ci par une traverse de bois horizontale fixée perpendiculairement à leur extrémité. C'est aux deux bouts de cette traverse que se fixent les liens suspenseurs qui convergent tous au pivot qui les tient au plafond de la salle. Dès lors quatre cordons suspendent les bras du manège et les forcent à se mouvoir dans le plan d'un cercle parfait.

Restait enfin une amélioration à introduire. La résistance que l'air présente à la rotation de ce système est plus grande qu'on ne pourrait le croire tout d'abord. Elle est très-sensible à la main, quand on imprime au manège un mouvement de rotation rapide. Cette résistance ne peut donc que nuire à la libre translation de l'Oiseau. Pour la réduire au minimum, j'ai rendu tranchants les bords de la planchette de sapin qui forme les bras du manège, et, sous l'influence de cette modification, j'ai obtenu une très-notable diminution de la résistance de l'air pendant ces mouvements rapides.

De l'appareil suspenseur de l'Oiseau. — Dans les expériences précédemment indiquées, on a vu qu'un Oiseau peut porter avec lui des pièces assez volumineuses sans être gêné dans son vol. Il faut, pour cela, que ces pièces soient fixées à la région dorsale au moyen d'une sorte de corset. Pour que les pièces solides qui suspendent l'Oiseau ne puissent pas gêner ses mouvements, j'ai recouru à une sorte de cercle métallique *a, ss* (fig. 15), tangent à la région dorsale de l'Oiseau par un de ses points, et fixé par le point diamétralement opposé à l'extrémité du bras du manège.

Chacune des ailes peut se mouvoir en toutes directions sans rencontrer en aucun point l'anneau métallique qui suspend l'Oiseau; pour assurer encore plus la liberté des mouvements des

ailes, je donne à l'anneau métallique qui supporte l'animal la forme d'une ellipse allongée.

Pour permettre à l'Oiseau d'exécuter librement les oscillations

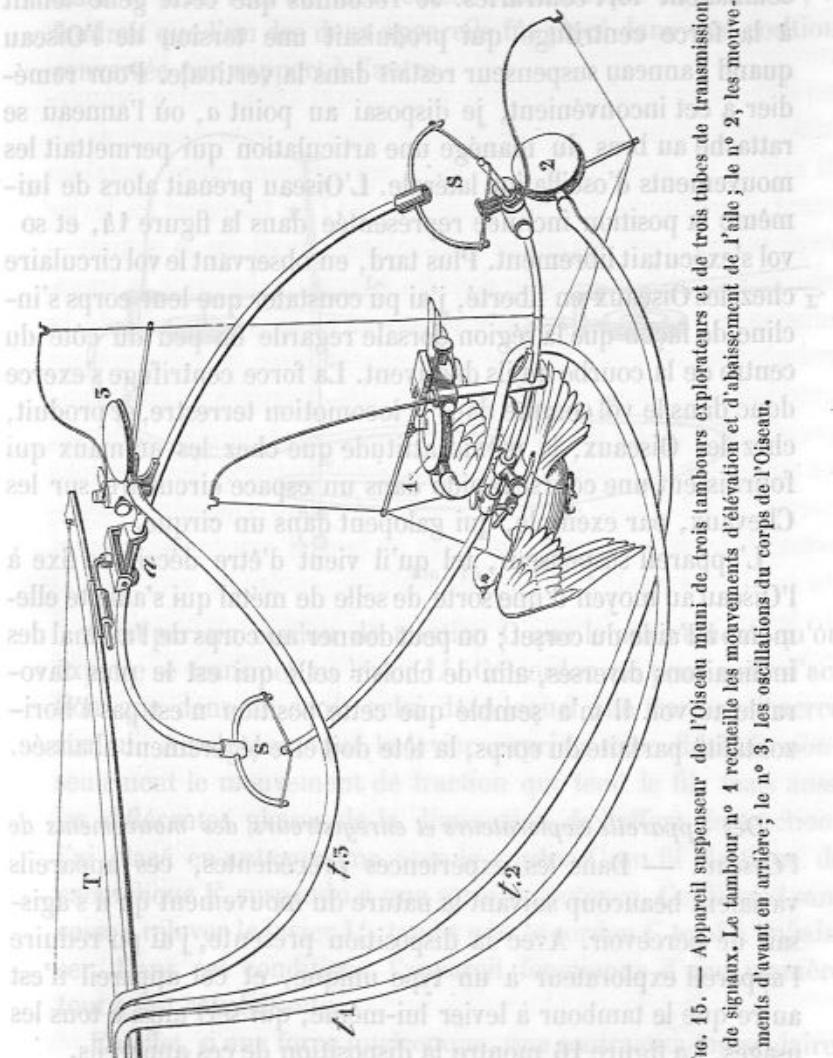


FIG. 15. — Appareil suspenseur de l'Oiseau muni de trois tambours explorateurs et de trois tubes de transmission de signaux. Le tambour n° 4 recueille les mouvements d'élevation et d'abaissement de l'aile ; le n° 2, les mouvements d'avant en arrière ; le n° 3, les oscillations du corps de l'Oiseau.

verticales que nous avons signalées, je place, sur deux points de l'ellipse qui vient d'être décrite, deux appareils élastiques, *ss*, sortes de suspentes qui permettent à l'Oiseau d'osciller verticalement.

Tout cela ne suffisait pas encore. On pouvait voir, en effet, que l'Oiseau ainsi suspendu se trouvait mal à l'aise, quand il volait avec quelque vitesse, et que les mouvements de ses ailes en semblaient fort contrariés. Je reconnus que cette gène tenait à la force centrifuge qui produisait une torsion de l'Oiseau quand l'anneau suspenseur restait dans la verticale. Pour remédier à cet inconvénient, je disposai au point *a*, où l'anneau se rattache au bras du manège une articulation qui permettait les mouvements d'oscillation latérale. L'Oiseau prenait alors de lui-même la position inclinée représentée dans la figure 14, et son vol s'exécutait librement. Plus tard, en observant le vol circulaire chez les Oiseaux en liberté, j'ai pu constater que leur corps s'incline de façon que la région dorsale regarde un peu du côté du centre de la courbe qu'ils décrivent. La force centrifuge s'exerce donc dans le vol comme dans la locomotion terrestre, et produit, chez les Oiseaux, la même attitude que chez les animaux qui fournissent une course rapide dans un espace circulaire, sur les Chevaux, par exemple, qui galopent dans un cirque.

L'appareil suspenseur, tel qu'il vient d'être décrit, se fixe à l'Oiseau au moyen d'une sorte de selle de métal qui s'adapte elle-même à l'aide du corset ; on peut donner au corps de l'animal des inclinaisons diverses, afin de choisir celle qui est le plus favorable au vol. Il m'a semblé que cette position n'est pas l'horizontalité parfaite du corps, la tête doit être légèrement abaissée.

Des appareils explorateurs et enregistreurs des mouvements de l'Oiseau. — Dans les expériences précédentes, ces appareils variaient beaucoup suivant la nature du mouvement qu'il s'agissait de percevoir. Avec la disposition présente, j'ai pu réduire l'appareil explorateur à un type unique, et cet appareil n'est autre que le tambour à levier lui-même, qui sert ainsi à tous les usages. La figure 16 montre la disposition de ces appareils.

Les tambours à levier *L* et *L'* communiquent entre eux au moyen du tube *T*. Il est clair que, dans ces conditions, tout mouvement du levier *L'* sera transmis au levier *L* ; mais ce mouvement sera reproduit en sens inverse par le levier enregistreur, de

ARTICLE N° 13.

sorte qu'une élévation du premier levier se traduira par un abaissement du second, et inversement. Il suit de là que, si pour une raison quelconque, il y avait intérêt à conserver dans le tracé le sens réel du mouvement communiqué au levier L' , il faudrait que l'un des deux appareils fût placé dans une position renversée par rapport à l'autre.

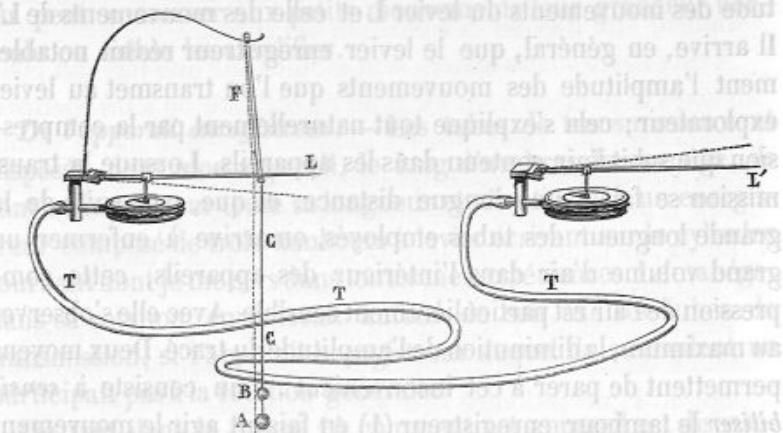


FIG. 46.

C'est par un cordon de traction C que le mouvement qu'on explore se transmet au levier L' . Ce cordon ne peut avoir d'action que dans un sens, celui dans lequel une traction s'exerce sur lui. Aussi, pour que le levier exprime avec fidélité, non-seulement le mouvement de traction qui tend le fil, mais aussi les différentes phases de la diminution de l'effort de traction, j'ai placé en antagonisme avec le cordon C un fil élastique de caoutchouc F, suspendu à une sorte de potence. Ce fil tend sans cesse à relever le levier L' , tandis que le cordon C tend à l'abaisser. Dans ces conditions, l'appareil fonctionne d'une manière tout à fait satisfaisante.

En effet, si une force quelconque, une contraction musculaire, par exemple, tire sur l'extrémité du cordon C et la porte de B en A, cette traction tend le fil de caoutchouc qui, réagissant à son tour pendant la phase de relâchement musculaire, ramènera le levier en haut avec plus ou moins de vitesse, selon que le relâ-

chement du muscle sera plus ou moins rapide. L'appareil aura donc reçu l'expression complète de l'acte musculaire avec ses deux phases : la contraction et le relâchement.

L'emploi du tambour à levier présente encore un autre avantage, celui de déterminer avec facilité l'amplitude réelle d'un mouvement, d'après celle du tracé qu'on en obtient. Pour cela, on détermine préalablement le rapport qui existe entre l'amplitude des mouvements du levier *L* et celle des mouvements de *L'*. Il arrive, en général, que le levier enregistreur réduit notablement l'amplitude des mouvements que l'on transmet au levier explorateur ; cela s'explique tout naturellement par la compression que subit l'air contenu dans les appareils. Lorsque la transmission se fait à une longue distance, et que, par suite de la grande longueur des tubes employés, on arrive à enfermer un grand volume d'air dans l'intérieur des appareils, cette compression de l'air est particulièrement sensible. Avec elle s'observe, au maximum, la diminution de l'amplitude du tracé. Deux moyens permettent de parer à cet inconvénient : l'un consiste à *sensibiliser* le tambour enregistreur (1) en faisant agir le mouvement de la membrane le plus près possible du centre de mouvement du levier ; l'autre procédé s'adresse à l'appareil explorateur. Il consiste à établir le contact du levier avec la membrane le plus loin possible du centre de mouvement, de façon à produire le plus grand déplacement possible de la membrane pour un mouvement quelconque du levier *L'*. Il est clair que ces grands déplacements de la membrane mettront en mouvement une grande quantité d'air et compenseront le déchet de mouvement qui se produit dans la transmission, sous l'influence de la compression de l'air.

La figure 15 représente plusieurs explorateurs des mouvements de l'Oiseau fonctionnant à la fois : l'un, n° 1, reçoit les mouvements d'élévation ou d'abaissement qu'exécute l'aile d'un Pigeon, et les transmet à un levier enregistreur ; l'explorateur n° 2 reçoit les mouvements que l'aile exécute dans le sens

(1) Voyez, pour la description des procédés, Marey, *Du mouvement dans les fonctions de la vie*. In-8, Paris, 1865, p. 140 et suiv.

antéro-postérieur; le n° 3 reçoit les oscillations verticales de l'Oiseau. On peut ainsi recueillir un nombre illimité de signaux suivant le nombre des explorateurs dont on dispose.

En graduant la sensibilité des appareils par l'un des deux moyens ci-dessus indiqués, on arrive à donner à l'amplitude du tracé tous les degrés possibles : on peut réduire le tracé des grands mouvements à la moitié ou au tiers de leur étendue réelle; on peut conserver aux petits mouvements leur grandeur normale ou même les amplifier.

De l'appareil enregistreur. — Les tubes de transmission sont disposés, dans mon appareil, le long d'un bras du manège; ils sont maintenus sur toute sa longueur et aboutissent à un enregistreur composé de trois tambours à levier écrivant sur le cylindre tournant dont je me sers dans toutes mes expériences. Le manège, dans sa rotation, enroulerait autour de son axe les tubes de transmission, si l'appareil enregistreur auquel ils se rendent ne participait pas à la rotation générale.

On voit dans la figure 14 comment cet appareil est disposé. Le cylindre a son axe placé verticalement; sur lui viennent écrire les trois leviers des tambours enregistreurs des mouvements. L'appareil, dans son ensemble, repose sur une tablette formée par la cage de bois qui tourne sur le pivot central.

Nous nous trouvons dans les conditions bien connues où trois mouvements à la fois s'enregistrent sur le même cylindre; il est donc inutile de rappeler les précautions à prendre dans l'installation de l'appareil, telles que l'exacte superposition des pointes écrivantes, etc.

Une difficulté particulière se présente dans nos expériences; voici en quoi elle consiste.

Les mouvements de l'Oiseau sont d'une rapidité extrême; ils ne peuvent être enregistrés que sur un cylindre qui tourne avec une très-grande vitesse; celui que j'emploie fait un tour en une seconde et demie. La brièveté du temps disponible pour enregistrer les mouvements de l'Oiseau nous force à n'enregistrer ces mouvements qu'à l'instant précis où l'animal présente le phé-

nomène que l'on veut observer, soit le plein vol, soit le ralentissement, soit les efforts du départ. Si les trois leviers frottaient constamment sur le cylindre, on n'aurait bientôt plus qu'un tracé confus. Il est indispensable de disposer l'appareil de façon que les pointes des leviers ne touchent le cylindre qu'au moment où se produit le phénomène que l'on veut enregistrer, et de faire cesser ce contact après une ou tout au plus deux révolutions du cylindre, afin d'éviter la confusion des traits.

A cet effet, les trois leviers sont montés sur une tige qui pivote sur son axe de façon à les éloigner du cylindre ou à les mettre en contact avec lui. Deux butoirs limitent l'étendue de ce pivotement, de façon à ne laisser produire que les mouvements nécessaires, d'un côté, pour que les leviers écrivent nettement sur le cylindre; de l'autre côté, afin qu'ils s'en écartent assez pour cesser d'écrire.

Reste à produire à volonté ces mouvements de pivotement. A l'état de repos, un ressort tient les leviers légèrement écartés du cylindre. Pour produire le contact, j'insuffle de l'air dans un tambour, dont la membrane agit pour faire pivoter le support des leviers, en luttant contre l'élasticité du ressort dont je viens de parler. Cette insufflation d'air s'obtient en pressant dans la main une poire de caoutchouc.

La figure 14 montre l'expérimentateur au moment où il recueille un tracé du vol d'un Pigeon. Observant l'allure de l'Oiseau, il saisit le moment du vol régulier et serre la boule de caoutchouc; le contact des leviers se produit aussitôt et le tracé s'écrit. Après une seconde et demie, on cesse de serrer la boule, le ressort produit l'éloignement des leviers, et le tracé finit. Avec un peu d'habitude il est très-facile d'apprécier la durée d'une révolution du cylindre et de réduire à cette durée la longueur du tracé. D'autres fois on peut laisser les leviers écrire pendant deux révolutions du cylindre; il est facile de lire ces deux tracés superposés sans les confondre.

Cette longue description était indispensable pour faire connaître la disposition de l'appareil qui servira bien souvent pour les expériences d'analyse et de synthèse dont j'ai parlé plus haut.

ARTICLE N° 43.

Le plan de ces expériences est facile à comprendre. Il consiste à atteler tour à tour au manège un Oiseau véritable et un Oiseau mécanique ; à recueillir sur chacun d'eux le tracé des mouvements des ailes, des oscillations du corps ou de tout autre phénomène ; à comparer les deux tracés obtenus ; enfin à corriger l'appareil schématique jusqu'à ce qu'il imite exactement les mouvements de l'Oiseau véritable. Alors seulement nous devrons essayer de livrer l'Oiseau factice à son propre vol.

CHAPITRE V.

VÉRIFICATION, AU MOYEN DU NOUVEL APPAREIL, DES RÉSULTATS FOURNIS PAR LA PREMIÈRE MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.

De la trajectoire des mouvements de l'aile. — Construction de la courbe du parcours de l'aile d'après celles des hauteurs et des mouvements d'avant en arrière.

Le nouvel appareil dont nous disposons permet d'obtenir tout ce que fournissait l'appareil représenté figures 33 et 35 du premier mémoire, appareil qui nous a donné la trajectoire de la pointe de l'aile dans l'espace pendant le vol. Il permet quelque chose de plus : c'est d'expérimenter sur tout appareil artificiel qu'on voudra suspendre à la place où, dans la figure 15, le Pigeon est attaché. La machine, si imparfaite qu'elle soit, si incapable qu'on l'a suppose de se soutenir sur l'air, donnera tout au moins le signal de ses coups d'ailes avec leurs phases diverses d'intensité et de durée, avec la trajectoire que ces ailes décrivent dans l'air, avec les réactions que leurs mouvements exercent sur le corps de la machine.

Avant de passer à ce genre d'études, sur lequel je fonde de grandes espérances, j'ai voulu utiliser le nouvel appareil à contrôler les résultats obtenus par la première méthode, relativement aux mouvements de l'aile de l'Oiseau ; j'ai voulu voir si la même trajectoire serait fournie par la nouvelle méthode et par l'ancienne. Tout l'intérêt de cette recherche tient à ce que la manière d'obtenir les tracés est différente dans les deux cas. Le premier appareil nous fournissait d'emblée une courbe com-

plète, semblable à celle que l'aile eût pu produire elle-même en frottant sur une surface sensibilisée. Le second, au contraire, nous fournit seulement les éléments isolés de cette courbe. Un enregistreur spécial nous donne le tracé des hauteurs de l'aile, c'est-à-dire des oscillations verticales de cet organe avec sa vitesse à chaque instant ; l'autre enregistreur nous fournit les mouvements que l'aile exécute d'arrière en avant. Ces deux courbes, une fois fournies par l'appareil, c'est à la géométrie de les recomposer en une courbe unique qui doit être sensiblement semblable à celle que nous avons obtenue par l'emploi de la première méthode.

Voici en quoi consiste l'expérience :

Détermination nouvelle de la trajectoire de l'aile d'un Oiseau. — Un Pigeon me servit dans cette expérience. C'était un mâle de la race dite *Pigeon romain*, très-vigoureux et assez habitué à voler (1). La figure 15 montre la disposition des appareils que j'appliquai à l'étude de ses mouvements.

Si l'on néglige le tambour explorateur n° 3, relié par son cordon de traction à la moitié inférieure de l'ellipse métallique qui suspend l'Oiseau, et destiné à transmettre exclusivement les mouvements d'oscillation verticale du Pigeon, on voit que les deux tambours employés dans cette expérience sont destinés à signaler les mouvements des deux ailes.

C'est à l'humérus que je m'adresse cette fois pour obtenir le mouvement de l'aile dans l'espace. A cet effet, l'os est contourné par un fil métallique qui l'étreint comme un anneau, et vient par ses bouts libres fournir à l'extérieur de l'aile une attache solide à de nouveaux fils qui exercent leurs tractions sur les tambours explorateurs.

Les mouvements des deux ailes étant parfaitement symétriques dans le vol régulier, je fais converger à chacun des tambours explorateurs deux fils qui se détachent symétrique-

(1) Ce dernier point est d'une extrême importance, car la plupart des Oiseaux de volière sont incapables de servir, à cause de leur inexpérience du vol.

ment des ailes. Ainsi, le tambour n° 1, destiné à signaler les mouvements d'élévation et d'abaissement de l'aile, reçoit deux fils qui se détachent chacun de l'un des humérus du Pigeon, à 3 centimètres en dehors de l'articulation de l'épaule, et se portent à la pointe d'un levier en formant un angle aigu ; tandis que de cette même pointe part un fil de caoutchouc qui sert de ressort antagoniste et s'élève verticalement jusqu'à un crochet qui le retient par en haut. On a vu précédemment (fig. 16) comment le levier du tambour explorateur reçoit, dans ces conditions, tous les mouvements d'élévation et d'abaissement que l'humérus de l'Oiseau pourra exécuter.

Deux autres fils, détachés aussi chacun d'un humérus du Pigeon et du même point de l'os qui donnait attache aux fils du tambour n° 1, convergent aussi, en se portant en arrière, et se rendent au levier du tambour n° 2. Ce dernier est l'explorateur des mouvements que l'aile exécute dans le sens antéro-postérieur. Les deux tambours envoient leurs mouvements par des tubes à air, désignés sous les lettres t_1 et t_2 , jusqu'à l'enregistreur situé au centre du manège, ainsi qu'on le voit dans la figure 14.

Expérience. — Après s'être assuré que les deux leviers qui vont écrire ont bien leurs pointes situées sur la même verticale, l'opérateur fait lâcher le Pigeon. L'animal fait les mouvements du vol, et bientôt entraîne, dans une rotation assez rapide, le manège auquel il est attelé. L'opérateur, placé au centre du manège, n'a qu'à faire quelques pas pour suivre la rotation de l'appareil. Pendant ce temps, il tient à la main une boule de caoutchouc qu'il lui suffira de presser pour que les deux leviers appuient leurs pointes contre le papier noir ci et pour que le tracé commence à s'écrire. Dès que le vol est bien établi et qu'il semble s'exécuter dans des conditions satisfaisantes, l'opérateur presse la boule, et après une ou deux secondes il recueille le tracé représenté figure 17.

Interprétation des tracés. — Les courbes se lisent de gauche à

droite, comme l'écriture ordinaire. La courbe supérieure est celle que décrit l'humérus de l'Oiseau dans ses mouvements d'arrière

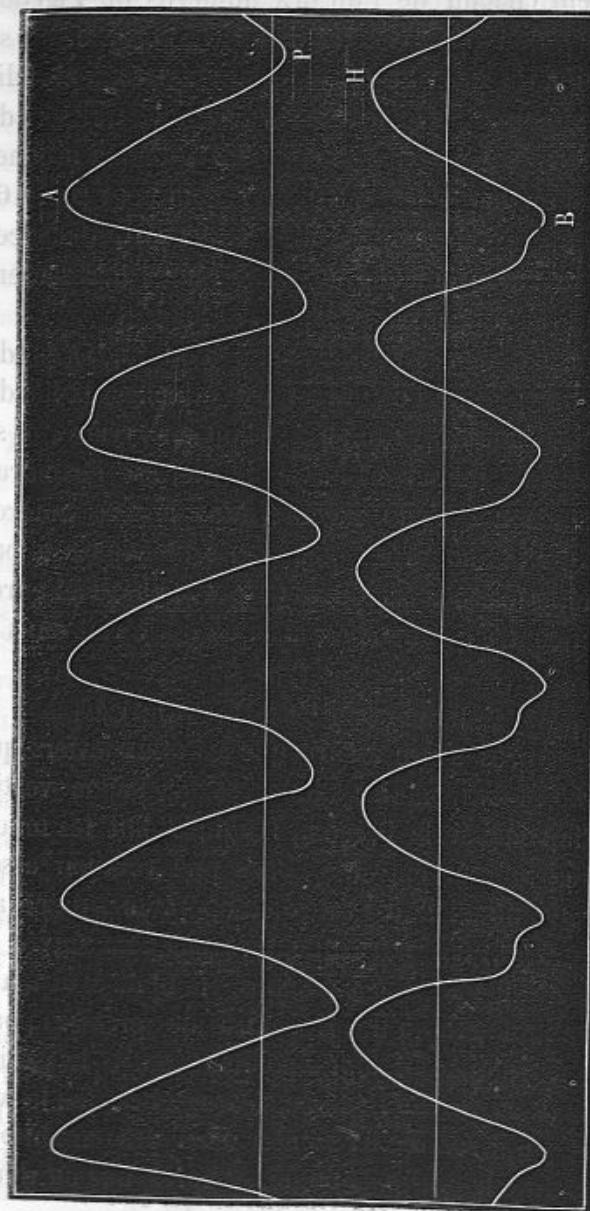


FIG. 17. — Représentant les mouvements de l'humérus d'un Pigeon dans la direction antéro-postérieure (courbe supérieure), et dans la direction verticale (courbe inférieure). Les droites qui coupent chaîne de ces courbes correspondent à la position de l'humérus quand l'aile est horizontalement étendue et, autant que possible, perpendiculaire au grand axe du corps de l'Oiseau.

en avant et d'avant en arrière ; le sens de ces mouvements est indiqué par les lettres A et P, qui veulent dire que tous les som-

ARTICLE N° 13.

mets des courbes, de même que le sommet A, correspondent au moment où l'aile a atteint la partie la plus *antérieure* de son parcours ; les parties inférieures de ces courbes, au contraire, correspondent toutes, ainsi que le point P, au moment où l'aile a atteint la limite *postérieure* de son parcours.

La ligne horizontale qui coupe cette courbe a été tracée dans une expérience préalable par la pointe du levier, au moment où les ailes de l'Oiseau, maintenues immobiles par un aide, pouvaient être considérées comme transversalement étendues et ne se portant ni en avant, ni en arrière. Cette ligne représente donc en quelque sorte le *zéro* de la graduation des mouvements de l'aile dans le sens antéro-postérieur. L'inspection de la courbe nous montre encore que, dans ses mouvements, l'aile du Pigeon se portait surtout dans le sens qui se traduit par une élévation de la courbe, c'est-à-dire qu'elle se mouvait davantage dans le sens des sommets homologues du point A ; en d'autres termes, le mouvement en avant prédominait sur le mouvement en arrière.

Cette description semble suffisante pour bien faire comprendre sa signification de la première courbe. Toutefois, afin de lever toute difficulté d'interprétation, je vais suivre, d'après cette courbe, le parcours de l'aile dans ses deux premières oscillations antéro-postérieures.

Au commencement du tracé, c'est-à-dire à la partie gauche de la figure, on commence à apercevoir la courbe un peu au-dessous de la ligne horizontale des zéros ; l'aile se trouvait donc un peu en arrière de sa position moyenne, qu'elle atteint bien vite pour se porter en avant dans une grande étendue ; puis elle revient en arrière et atteint une seconde fois sa position moyenne, qu'elle franchit pour se porter en arrière de cette ligne, mais à une distance environ moitié moindre que celle à laquelle elle s'était portée en avant. Alors elle revient de nouveau à la ligne médiane, la dépasse encore une fois de la même étendue que la première fois, et revient en arrière. Le même mouvement, suivant les mêmes phases, se produit ainsi indéfiniment et, sauf de très-légères différences, dans toute l'étendue de la courbe supérieure.

La courbe inférieure traduit les mouvements que l'aile exécute dans le sens vertical. Cette courbe est extrêmement facile à comprendre : les lettres H et B indiquent le *haut* et le *bas* des oscillations de l'aile; la ligne horizontale qui coupe le tracé correspond à la position de l'aile quand elle est bien horizontalement maintenue dans l'extension. De plus longs détails sont inutiles pour l'intelligence de cette figure : elle nous montre que, dans sa période de descente, l'aile ne se meut pas avec le même mouvement que dans la période d'ascension. Pour caractériser cette différence, je dirai que dans sa montée, l'aile se meut d'un mouvement accéléré d'abord, puis ralenti ; dans sa descente, le mouvement de l'aile subit, au dernier tiers de sa course, un temps d'arrêt à partir duquel sa descente est plus lente, ainsi que le montre le rebondissement de la courbe descendante.⁹²

A quoi attribuer ce rebondissement de la courbe, ce temps d'arrêt de l'aile qui s'abat ? Il semble très-rationnel de l'attribuer à la résistance de l'air qui intervient au maximum à ce moment de la descente où l'aile s'abaisse avec vitesse et où le plan de cette aile est vraisemblablement orienté de manière à trouver sur l'air la résistance maximum.

On verra plus loin comment se produisent les changements de plan de l'aile aux différentes phases de son parcours. Je me borne ici à l'étude des mouvements qu'exécute le squelette de l'aile, la partie qui correspondrait à la nervure antérieure, si l'on comparait l'aile d'un Oiseau à celle d'un Insecte.

Nous pouvons donc savoir à tout instant quelle est la position de l'aile par rapport à l'horizon, quelle est sa position par rapport au plan vertical qui passerait par les deux articulations scapulo-humérales. Mais ces renseignements que fournit l'inspection des deux courbes ci-dessus ne donnent que difficilement l'idée de la trajectoire de l'aile ; ils permettent de déterminer un à un les éléments de cette trajectoire sans la livrer tout entière aux regards, comme le fait la courbe précédemment obtenue et représentée figure 36 (1^{er} mémoire). Cette courbe était une ellipse dont le grand axe était incliné de haut en bas et d'arrière en avant.

Pour savoir si dans l'expérience présente le parcours de l'aile du Pigeon est sensiblement le même que celui de la Buse dans l'expérience ancienne, j'ai construit la courbe complète du parcours de l'aile dans l'une de ses révolutions, et je me suis servi pour cette construction des deux courbes de la figure 17. Voici comment on procède pour cette construction :

Supposons le problème résolu, et admettons que nous ayons sous les yeux la figure décrite par un point de l'humérus pendant une révolution de l'aile. Sur cette figure, imaginons une série de points placés les uns à côté des autres : chacun d'eux exprimera la position de l'aile à un instant donné ; il correspondra donc à un certain point de la courbe des mouvements de l'aile dans le sens antéro-postérieur, et à un certain point de la courbe des hauteurs de l'aile. Or, ces deux points des deux courbes différentes se trouveront nécessairement dans la même verticale, puisque, dans les conditions mêmes de l'expérience, nous avons eu soin de superposer exactement les extrémités des deux leviers, afin qu'elles écrivent dans une même verticale les mouvements qui se produisent à un même instant. On peut donc, en traçant sur la figure 17 des verticales en nombre suffisant pour couper chacune de ses courbes en un grand nombre d'endroits, obtenir, aux intersections de chacune des verticales avec les deux courbes, deux points dont la position, par rapport à la ligne des zéros, exprimera la position d'un point de la trajectoire de l'aile par rapport aux deux coordonnées qui serviront à la construire.

Voici, du reste, comment s'effectue cette construction. Pour donner plus de facilité à la mesure des positions des différents points de ces courbes, je les décalque toutes deux (fig. 18) sur un papier gradué en centimètres et en millimètres. Je trace en ligne pleine l'une des deux courbes, celle des mouvements dans le sens antéro-postérieur, dont le sens est désigné par les lettres A et P ; puis je reproduis par une ligne ponctuée la courbe des hauteurs avec les lettres H et B. Je superpose ces deux tracés de manière à confondre l'une avec l'autre les deux lignes des zéros. Ces deux lignes n'en forment plus qu'une située elle-même sur

l'une des divisions centimétriques horizontalement dirigées ; l'épaisseur plus grande du trait permet de reconnaître la position de cette ligne des zéros. De plus, j'ai eu soin de conserver dans le décalque des deux courbes la superposition verticale des points

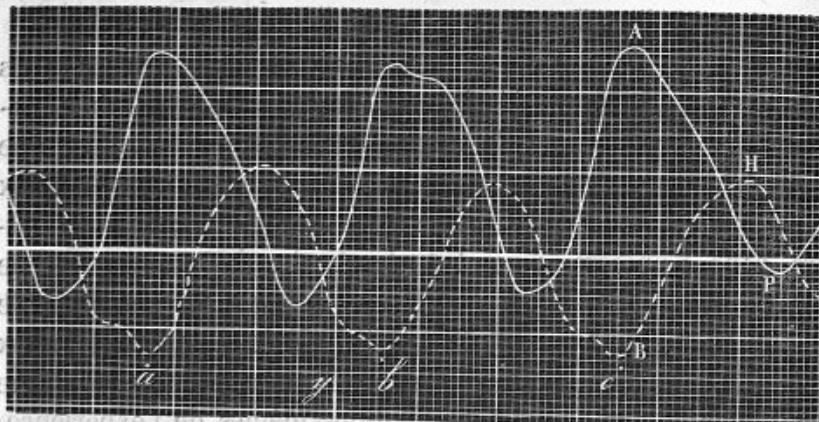


FIG. 18. — Transport de la figure 17 sur papier millimétriquement divisé ; superposition de ces deux courbes, de façon qu'elles aient une droite commune pour axe des abscisses.

correspondants de chacune d'elles ; on peut donc compter que, partout où une ligne verticale quelconque vient à couper les deux courbes, les intersections correspondent à la position que l'humérus de l'Oiseau occupe à cet instant, par rapport à deux plans perpendiculaires l'un à l'autre. L'intersection avec la courbe ponctuée exprimera, par la longueur de l'ordonnée menée de ce point à l'axe des abscisses, la position que l'aile occupe à cet instant par rapport à un plan horizontal ; l'intersection avec la courbe pleine exprimera la position de l'aile par rapport à un plan vertical.

Cette détermination est réalisée (fig. 19) pour une série de points de la trajectoire de l'aile dans l'espace, qui se trouve construite par points successifs de la manière suivante :

Soient deux lignes xx et yy , la première constituant l'axe des abscisses et la seconde celui des ordonnées. Convenons que tout ce qui est en haut de la ligne des zéros, dans la courbe pleine, c'est-à-dire tout ce qui correspond à un mouvement dans le sens

ARTICLE N° 18.

antérieur, devra se pointer à droite de la ligne des y . Inversement, tout ce qui est au-dessous des zéros dans la courbe pleine se pointera en arrière, c'est-à-dire à gauche de l'axe des y . La position par rapport à cet axe sera comptée parallèlement à l'axe des abscisses au moyen des divisions millimétriques.

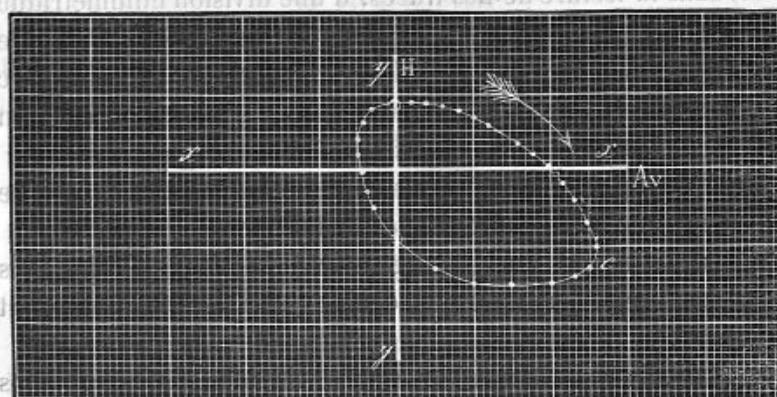


FIG. 49. — Figure décrite par le mouvement de l'aile du Pigeon, construite au moyen des deux courbes de la figure 48 [fig. 49 no 10 ; n° 10].
D'autre part, les différentes mesures prises sur la courbe des hauteurs de l'aile devront se pointer à la hauteur correspondante, comptée en dessus ou en dessous de la ligne des x , selon que ces points, dans la courbe des hauteurs, s'éloignent d'un certain nombre de millimètres, soit en haut, soit en bas de la ligne des zéros.

Prenons, comme point de départ, dans la construction de la courbe nouvelle, le point c choisi (fig. 48) sur la courbe ponctuée à l'un des instants où l'aile est arrivée à l'une de ses limites d'abaissement. Ce point, d'après la graduation millimétrique, nous indique que l'aile est abaissée de 43 divisions au-dessous de l'horizontalité. Suivons la verticale qui passe par le point c jusqu'à sa rencontre avec la courbe du mouvement de sens antéro-postérieur; l'intersection de cette verticale avec cette courbe nous indique que l'aile à ce moment était portée en avant de 24 divisions. Sur la courbe nouvelle, le point a devra donc être marqué en un point bien déterminé c , qui se

trouvera à l'intersection de la treizième division au-dessous de l'axe des x avec la vingt-quatrième à droite de l'axe des y (ce qui, d'après notre convention, correspond à 24 divisions du côté de l'avant).

Pour déterminer un second point de notre courbe, portons-nous, dans la lecture de nos tracés, d'une division millimétrique plus loin vers la droite; nous relèverons de la même manière que tout à l'heure la position de la verticale de ce point avec les deux courbes, et nous aurons, dans la figure nouvelle, un second point déterminé.

La série de points successifs obtenus de cette manière se trouve placée sur une courbe dont la flèche indique la direction.

En construisant ainsi la figure entière, on voit qu'après s'être portée en bas et en avant, cette courbe s'élève en revenant en arrière.

On peut, en rapprochant cette figure de celle que nous avions obtenue autrefois avec un autre appareil sur une autre espèce d'Oiseau; et en explorant le mouvement d'une autre partie de l'aile, on peut, dis-je, constater entre les deux courbes de frappantes ressemblances qui montrent bien que, dans le vol, les Oiseaux procèdent par des mouvements à peu près identiques.

En effet, de part et d'autre, l'os de l'aile décrit une sorte d'ellipse irrégulière à grand axe incliné en bas et en avant.

Ces expériences datant de deux ans et mes recherches ayant été suspendues depuis cette époque, je n'ai pu me rappeler assez sûrement la position des appareils qui m'ont servi à les exécuter. Il en est resté quelques incertitudes dans mes souvenirs relativement au sens de la rotation de l'aile. J'ai dû recommencer mes expériences dans des conditions d'installation plus parfaite des appareils. De nouveaux détails sur le mécanisme du vol ont été ainsi obtenus.

J'ai cherché, par exemple, à déterminer la vitesse et l'étendue réelles des mouvements de l'aile à chaque instant, à signaler les divers changements du plan de cet organe aux différentes phases de sa révolution.

Ces premières notions sont les éléments indispensables sur les-
ARTICLE N° 13.

quels seront basées les tentatives d'imitation du mécanisme du vol des Oiseaux.

CHAPITRE VI.

DES CHANGEMENTS DU PLAN DE L'AILE AUX DIFFÉRENTES PHASES DE SA RÉVOLUTION.

Description des appareils destinés à obtenir la courbe des changements de l'aile. — Rapports de cette courbe avec celle des autres mouvements. — Conclusions.

On a vu, au commencement de ces études, que l'aile de l'Insecte éprouve, sous l'influence de la résistance de l'air, des torsions qui changent à chaque instant l'inclinaison de son plan. Ces mouvements, tout à fait passifs, constituent l'essence du mécanisme du vol de l'Insecte, dont l'aile, à chacun de ses mouvements de sens alternatif, décompose la résistance de l'air et lui emprunte une force qui agit du côté de la nervure et sert à soutenir et à propulser l'animal. La structure de l'aile de l'Oiseau ne permet pas d'admettre chez lui l'existence d'un mécanisme semblable. Pendant l'ascension, cette aile ne présente pas à l'air un plan résistant; mais, grâce à l'imbrication des pennes qui s'ouvrent pour lui livrer passage, ce mouvement n'éprouve qu'une très-faible résistance et s'effectue en toute liberté. La phase d'abaissement est donc la seule où le vol de l'Oiseau présente des conditions analogues à celui de l'Insecte. Du reste, la courbe décrite par la pointe de l'aile de l'Oiseau diffère assez de celle que parcourt l'aile de l'Insecte pour prouver que, de part et d'autre, les conditions mécaniques sont différentes.

Il était indispensable de déterminer expérimentalement les différentes inclinaisons du plan à chaque phase de chacune de ses révolutions. En effet, pour estimer la valeur de la résistance que l'air oppose à tout instant du vol, il faut connaître les deux éléments de cette résistance : 1^o l'angle sous lequel le plan de l'aile vient frapper l'air; 2^o la vitesse avec laquelle ce choc s'effectue. Rien n'est plus facile que d'obtenir la seconde donnée du problème; nous la tirerons quand nous voudrons de la courbe qui représente la position de l'aile à chaque instant, courbe dont

la figure 19 fournit un exemplaire obtenu sur un Pigeon; mais ce qui présentait plus de difficultés, c'était d'obtenir l'indication des changements de plan de l'aile pendant le vol. Voici le mécanisme auquel j'ai recouru :

On sait qu'une tige articulée à un mouvement de Cardan, dont le centre de rotation est voisin de l'articulation scapulo-humérale, peut être rendue solidaire des mouvements de circumduction que l'aile exécute. L'expérience qui m'a servi à déterminer la courbe décrite par la pointe de l'aile est basée sur l'emploi d'une tige de ce genre. Mais le mouvement de Cardan, tout en obéissant aux flexions en tous sens qu'on imprime à la tige, ne traduit nullement les mouvements de torsion suivant l'axe de cette tige.

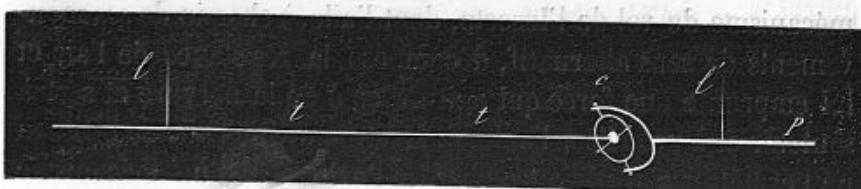


FIG. 20.

Soit donc (fig. 20) un appareil de ce genre, on pourra imprimer à la tige *t* toute espèce de mouvements dans le sens vertical ou dans l'horizontal; elle obéira à toutes les impulsions reçues. Mais si, prenant à la main l'extrémité de cette tige au niveau du levier *t*, qui s'en détache perpendiculairement, on cherche à imprimer au levier un mouvement de torsion, comme lorsqu'on tourne une vis, le Cardan ne permet pas au mouvement de se produire et la tige résiste à l'effort qu'on exerce. Supposons que derrière le Cardan et sur le prolongement de la tige *t*, il se trouve une autre tige cylindrique *p* pivotant dans un tube, cette tige tournera dans le tube sous l'influence des efforts de torsion qu'on exercera en tenant à la main le levier coudé *t*, et si la tige *p* porte elle-même un levier coudé *l*, situé dans le même planque *t*, on verra que ces deux leviers sont solidaires l'un de l'autre, et que tout changement de plan subi par le premier se transmet au second.

ARTICLE N° 18.

Dans ces conditions, si nous rendions le levier *l* solidaire des changements de plan que l'aile éprouve dans les différentes phases de sa révolution, ces changements seraient transmis au levier *l'*, qui pourrait à son tour agir sur un appareil explorateur, et en transmettre le signal sous forme d'un tracé. C'est précisément le moyen que j'ai employé dans mes expériences. Le levier *l* était couché sur le plan de l'aile de l'Oiseau tenu en position horizontale. Le levier *l'*, horizontal lui-même, était relié par un fil au levier d'un tambour explorateur placé au-dessus de lui et disposé de la même façon que dans les expériences décrites au chapitre précédent.

Quand on faisait basculer le plan de l'aile de façon à tourner la face supérieure de cet organe plus ou moins en arrière, la courbe enregistrée s'abaissait ; elle s'élevait, au contraire, quand on tournait ce plan de l'aile de manière à porter sa face supérieure en avant.

Mais une difficulté se présentait encore. Il n'était pas possible de fixer le levier *l* en un point de la tige *tt*, et d'autre part de l'immobiliser en un point de l'aile de l'Oiseau. En effet, le Cardan n'ayant pas le même centre de mouvement que l'articulation de l'aile, il s'ensuit que, dans les mouvements verticaux, il doit exister un glissement entre l'aile et la tige *tt*.

Il faut donc que le levier *l*, fixé aux plumes de l'aile, glisse librement sur la tige dans le sens de sa longueur, et cependant qu'il lui imprime sous forme de torsion tous les changements d'inclinaison que lui transmettent les plumes de l'Oiseau.

On verra à la figure 21 comment ce résultat a été obtenu.

Soit *tt* la tige qui doit suivre les mouvements de circumduction exécutés par l'aile. Cette tige présente des cannelures longitudinales profondes qui donnent à sa coupe l'apparence d'une étoile. Cette coupe est représentée en E sur le côté de la figure 21. De plus, elle passe dans un tube qui s'applique à sa surface extérieure et glisse librement. Mais à l'une des extrémités du tube est un fond métallique qui est percé d'une ouverture en étoile à travers laquelle passe la tige *tt*, dont chaque cannelure est logée

dans une branche de l'ouverture étoilée. Le levier *t* est soudé sur ce tube ; il peut donc avec lui se porter aux divers points de la longueur de la tige, ce qui assure la liberté du mouvement du vol, mais il ne peut changer de plan sans communiquer ce changement de plan au levier *t'*, qui en reçoit l'impression et en transmet le signal.

Après quelques expériences, je reconnus la nécessité d'apporter certains perfectionnements à mon appareil. Ainsi, le levier *t* avait des tendances à se tordre à cause du déplacement des pennes aux différents instants du vol ; je le remplaçai (fig. 21) par une



FIG. 21.

pièce à trois leviers mobiles tournant dans un même plan, autour d'une articulation commune, à la façon des lames d'un éventail. Chacune de ces petites branches finissait par un crochet. Après avoir attaché le tube à glissement sur la main de l'Oiseau, je liai l'extrémité de chacune de ces trois lames avec une des pennes de l'aile. Cette ligature, faite avec du fil de caoutchouc, m'a donné d'excellents résultats.

D'autre part, le levier *t'*, fig. 20, présentait de grands inconvénients. Chargé de transmettre ses mouvements à un tambour explorateur, cet appareil était défectueux à cause de son inégalité d'action. Je le remplaçai par une poulie d'un court rayon, située sur la tige même qui se prolonge en arrière du Cardan. Le fil *rr* qui doit transmettre les torsions de la tige s'enroule dans la gorge de cette poulie ; à ses deux extrémités sont les fils de caoutchouc qui assurent sa tension permanente. Enfin, quand l'appareil est sensibilisé d'une manière convenable, on fixe le fil dans la gorge de la poulie au moyen d'une goutte de cire à cacheter placée

ARTICLE N° 13.

sur un point où l'enroulement doit être permanent. De cette façon, la rotation de la poulie résultant de la torsion de la tige transmet toujours avec fidélité cette torsion au levier explorateur.

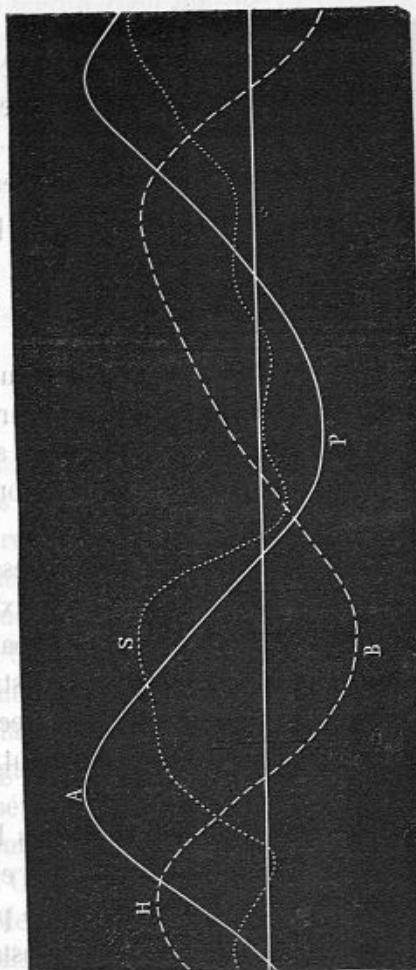


FIG. 22. — Tracé simultané des divers mouvements de l'aile d'une Busc. — La courbe AP indique les mouvements de l'aile en avant et en arrière. — HB exprime le mouvement de haut en bas. — La courbe ponctuée indique la torsion de l'aile autour de l'articulation scapulo-humérale ; plus la courbe s'élève au-dessus de l'une des abscisses, plus elle exprime que le bord postérieur de l'aile est relevé.

Pour terminer cette description déjà trop longue de l'appareil destiné à recevoir les signaux de l'élévation et de l'abaissement de l'aile, je me borne à dire que la pièce située à la base du levier *tt* est destinée à transmettre les mouvements verticaux et les mouvements horizontaux par deux systèmes de fils. Pour les mouvements verticaux, un double fil *v* passe dans la double

gorge d'une pièce courbée en arc de cercle et se rend au levier d'un tambour explorateur. Le fil *h* transmet à un autre appareil les mouvements dans le sens horizontal, c'est-à-dire antéro-postérieur.

Expérience. — On fait voler une Buse à laquelle cet appareil a été adapté, et l'on obtient à la fois les trois courbes représentées figure 22.

Avec ces triples données on peut construire non-seulement la trajectoire de l'aile, mais la série des inclinaisons du plan de cet organe aux divers points de son parcours.

La figure 22 montre les trois courbes obtenues à la fois au moyen de l'appareil.

La courbe tracée par un trait plein correspond aux mouvements que l'aile exécute dans le sens antéro-postérieur. Le point A et ses homologues correspondent à la position antérieure extrême de l'aile de l'Oiseau ; le point P à la position extrême postérieure.

La courbe formée de traits interrompus indique les hauteurs de l'aile dans l'espace ; le point H correspond au maximum de l'élévation de l'aile, et le point B à son plus grand abaissement.

Ces deux courbes dans l'espace permettent de construire par points la courbe fermée (fig. 23), représentant la trajectoire que l'aile parcourt autour de son centre de mouvement, qui est l'articulation de l'épaule (1).

C'est sur cette trajectoire que nous déterminerons l'inclinaison du plan de l'aile à chaque instant de son parcours elliptique.

A cet effet, il faut se reporter (fig. 22) à la courbe ponctuée, qui est l'expression des torsions de l'aile à différents instants. Les ordonnées positives et négatives de cette courbe correspondent aux tangentes trigonométriques des angles que l'aile fait avec

(1) Cette courbe n'est pas toujours fermée, mais on peut, à l'inspection des courbes de la figure 22, savoir quand on obtiendra pour la trajectoire de l'aile une courbe fermée. C'est quand les intersections de la courbe des hauteurs et celle des mouvements d'avant en arrière se produisent deux fois de suite dans des points homologues. Ce cas s'observe lorsque le vol est d'une régularité parfaite.

l'horizon (4). Elles permettent donc de tracer sur la figure 23 une série de lignes dont chacune exprime, par son inclinaison sur l'horizon, l'inclinaison que le plan de l'aile présentait à ce même instant de son parcours.

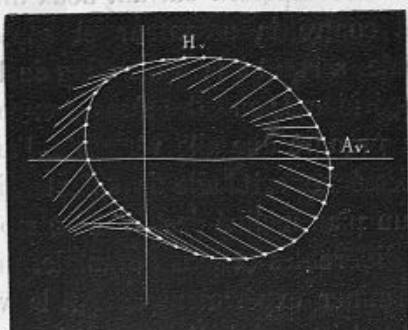


FIG. 23.

Le sens du mouvement de l'aile se lit de haut en avant, ce qui, sur la figure 23, se compte de haut à droite, de la lettre H aux lettres Av.

La figure 23 est en parfait accord avec la théorie qui ressort de toutes les expériences précédemment rapportées. Elle montre en effet que l'aile, dans son ascension, prend la position inclinée qui lui permet de couper l'air en trouvant le minimum de résistance; que dans la descente, au contraire, la position de son plan se renverse de telle sorte que la face inférieure de cet organe regarde en bas et en arrière. Il suit de là que dans sa période d'abaissement, l'aile, par son incidence oblique, décompose la résistance de l'air, et, tout en soulevant le corps de l'Oiseau, le propulse en avant. On voit aussi que l'inclinaison de l'aile change graduellement aux différentes phases de son abaissement et de sa descente. Dans cette dernière phase surtout se montre l'influence de la résistance de l'air sur l'orientation de l'aile : c'est en effet au moment où la vitesse d'abaissement atteint son maximum, que l'on voit le bord postérieur de l'aile se relever le plus fortement.

(4) Il faut de l'angle trouvé retrancher algébriquement une valeur constante : l'angle de 30 degrés que l'aile au repos fait avec l'horizon.

On peut presque tirer de l'expérience précédente les données nécessaires à l'évaluation du travail qu'un Oiseau effectue en volant. En effet, de l'angle sous lequel la résistance de l'air se présente sous la face inférieure de l'aile, on peut déduire la manière dont cette résistance se décomposera suivant deux directions : l'une, verticale, luttant contre la pesanteur et soutenant l'Oiseau ; l'autre, horizontale, servant à la translation de l'animal.

Une série d'expériences nouvelles s'ouvre encore devant nous. Elle consistera à prendre une aile véritable, l'aile d'une Buse, par exemple, à dessécher cette aile dans l'extusion, afin de s'en servir comme d'un plan incliné destiné à se mouvoir dans l'air avec des vitesses différentes et sous des angles différents.

Il faudra déterminer expérimentalement la valeur des deux composantes de la résistance de l'air pour chaque angle et pour chaque vitesse. On pourra ensuite, au moyen de ces éléments, déterminer la quantité de travail que l'aile effectue sur l'air à chacun de ses passages successifs de l'une des positions représentées figure 23 à la position suivante. La somme de ces travaux élémentaires constituera le travail total effectué par l'aile sur l'air à chacune des révolutions de l'aile de l'Oiseau.