

Bibliothèque numérique

medic@

Marey, Etienne-Jules. - Le problème  
mécanique du vol

In : *Revue scientifique*, 1888,  
*XLII*, n° 10, p. 289-300



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)  
Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/histmed/medica/cote?marey057>

# REVUE SCIENTIFIQUE

---

## (REVUE ROSE)

DIRECTEUR : M. CHARLES RICHET

2<sup>e</sup> SEMESTRE 1888 (3<sup>e</sup> SÉRIE).

NUMÉRO 10.

(25<sup>e</sup> ANNÉE) 8 SEPTEMBRE 1888.

### PHYSIOLOGIE

COURS D'HISTOIRE NATURELLE DES CORPS ORGANISÉS  
AU COLLÈGE DE FRANCE

M. MAREY.

#### Le problème mécanique du vol.

Messieurs,

Nous avons étudié l'an dernier la structure de l'oiseau, et l'anatomie nous a révélé, dans la conformation de son appareil locomoteur, d'intéressantes particularités qui sont manifestement en harmonie avec la fonction du vol, mais qui, à elles seules, sont incapables de l'expliquer. Nulle part, en effet, plus que dans le problème qui nous occupe, l'anatomie ne se montre impuissante à éclairer le mécanisme de la fonction.

Plus tard, passant en revue les observations sans nombre que nous ont léguées les naturalistes, les fauconniers, les voyageurs, nous y avons trouvé des renseignements de haute importance sur les conditions générales dans lesquelles se produit le vol, et sur les types divers qu'il présente chez les différentes espèces.

D'un accord unanime, les observateurs admettent que certains oiseaux volent *à voile* quand il fait du vent; que certains autres volent *à rame* par tous les temps, c'est-à-dire battent des ailes régulièrement avec une fréquence variable suivant leur taille et leur structure. Les mille évolutions du vol, les manœuvres de l'essor et de l'atterrissement, les changements de direction, les planements et les glissements sur l'air, en un mot tout

ce que l'œil peut discerner, a été vu et assez bien décrit par les auteurs anciens ou modernes.

Une seule chose a constamment échappé à l'observation, car elle lui est inaccessible, c'est *le coup d'aile* proprement dit. En effet, sur la plupart des espèces d'oiseaux, cet acte est trop rapide pour que l'œil en puisse saisir les phases et les détails souvent fort compliqués.

Heureusement, les méthodes expérimentales suppléent à l'imperfection de nos sens; avec leur secours, les mouvements les plus rapides et les plus complexes sont aujourd'hui faciles à saisir. L'*inscription mécanique* des mouvements et la *photochronographie* (1), appliquées à l'analyse des différents actes du vol, ont fait connaître les phases du coup d'aile avec les réactions qu'elles produisent sur le corps de l'oiseau.

Ces deux méthodes ont donné des résultats concordants, mais la seconde présente une supériorité marquée. Elle offre, en premier lieu, l'avantage d'étudier les mouvements d'un oiseau entièrement libre, tandis que, pour l'*inscription mécanique* des mouvements de l'aile, il fallait adapter à l'oiseau des appareils toujours suspects d'altérer plus ou moins les mouvements du vol. En second lieu, la *photochronographie* analyse avec une précision égale les mouvements des ailes par rapport à l'oiseau et les déplacements de l'oiseau lui-même dans l'espace.

On peut donc aborder l'étude du vol de l'oiseau,

(1) Voir, pour la description de cette méthode et de ses applications, la conférence que j'ai faite au congrès de l'*Association française pour l'avancement des sciences*; Nancy, 1886. — *Revue scientifique*.

comme tout autre problème de mécanique, en suivant un plan méthodiquement tracé : en déterminant tour à tour les conditions *cinématiques* et *dynamiques* de ce genre de locomotion. C'est le plan qui sera suivi dans ces études.

## I.

## CINÉMATIQUE DU VOL DES OISEAUX.

Sans revenir sur les principes de la méthode photo-chronographique ni sur la description des appareils qu'elle emploie, je dois signaler les difficultés spéciales que présentait l'étude du vol et les dispositions particulières auxquelles il a fallu recourir pour les surmonter.

Les mouvements de l'aile sont si complexes qu'il faut, pour en suivre toutes les phases, recueillir un très grand nombre d'images, dix au moins, pendant la durée d'un coup d'aile. Il s'en suit que, même en opérant sur un oiseau à battements peu fréquents, le goéland, qui donne environ 5 coups à la seconde, les images devraient se reproduire au moins 50 fois par seconde. Or la translation de l'oiseau dans l'espace n'est pas assez rapide pour que des images aussi nombreuses s'échelonnent sur la plaque sensible sans se superposer en partie, ce qui en amène de la confusion. La figure 43 montre une série d'images successives où cette confusion se produit. Elle renferme toutefois des renseignements fort importants : ainsi, elle montre l'ondulement générale de l'axe du vol, la trajectoire des différentes parties de l'aile, les phases de déploiement et de repliement de cet organe. Mais, pour tirer parti d'une figure aussi chargée de documents, il faut s'être longtemps exercé dans des conditions beaucoup plus simples.

Un moyen se présente, toutefois, pour concilier la multiplicité des images avec la netteté de chacune d'elles, c'est de recueillir à la fois deux séries photographiques dans lesquelles les images alternent exactement entre elles. Une des séries sera formée des images qui se suivront dans l'ordre représenté par les nombres impairs 1, 3, 5, 7, l'autre correspondra aux nombres pairs 2, 4, 6, 8.

Pour cela, on construit un appareil à deux chambres noires et à deux objectifs. Les deux plaques sensibles se trouvent, l'une à droite, l'autre à gauche, derrière le disque fenêtré tournant qui produit les éclairages intermittents. Supposons que le disque n'ait qu'une seule fenêtre : celle-ci, dans son transport rotatif, éclairera tour à tour la glace de gauche, puis celle de droite, et comme ces deux glaces sont situées aux extrémités d'un même diamètre du disque, les images s'y produiront d'une manière régulièrement alternante. Tout disque percé d'un nombre impair de fenêtres donnera lieu à une alternance pareille des images, car au moment où une fenêtre éclairera l'une des plaques, l'autre plaque se trouvera précisément masquée par le plein du disque et dans l'intervalle de deux fenêtres.

Un disque à trois fenêtres faisant cinq tours par seconde donnera deux séries de 15 images chacune, soit 30 images par seconde, et il ne se produira pas de confusion.

La figure 44 a été ainsi obtenue ; on a superposé les deux séries, en se repérant, pour la position de chacune d'elles, sur des fils verticalement tendus au-devant du champ obscur.

Les flèches indiquent l'ordre dans lequel doivent se lire les images successivement représentées.

Pour bien connaître les attitudes de l'aile d'un oiseau, il ne suffit pas de les photographier sous un seul aspect. Les images prises d'un seul point de vue ne donnent qu'une idée incomplète des formes qu'elles représentent, car elles ne sont que la projection des contours de ces formes sur un plan. La peinture et le dessin, avec les jeux d'ombre et de lumière et en tenant compte des lois de la perspective, arrivent, il est vrai, à représenter certains objets comme s'ils étaient réellement placés devant nous ; toutefois l'illusion n'est complète que pour les objets qui nous sont familiers. Or, quand nous voulons exprimer la forme réelle et les proportions d'un édifice ou d'une machine, nous les représentons sous des aspects différents : plan, coupe et élévation. De même, les photographies, si parfaites qu'elles puissent être au point de vue de la perspective et des ombres, ne peuvent nous faire connaître les attitudes différentes de l'oiseau qu'à la condition d'être prises à la fois sous différents aspects. On y arrive avec la disposition représentée figure 45.

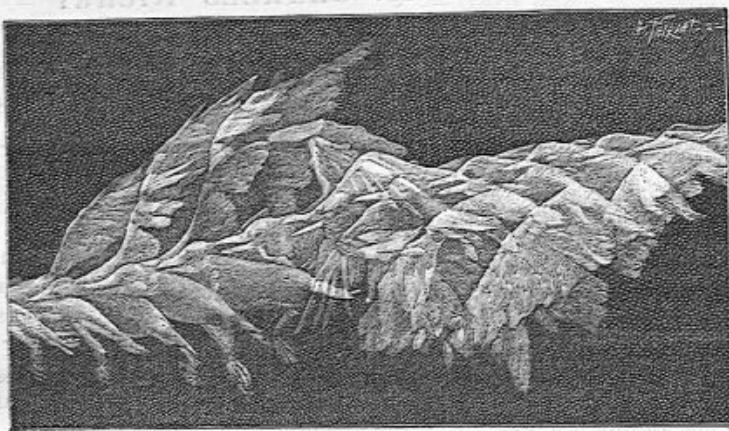


Fig. 43. — Attitudes successives du goéland dans un coup d'aile; images très nombreuses (50 par seconde); confusion produite par la superposition de ces images.

Trois appareils photochronographiques sont braqués à la fois sur l'oiseau qui vole, et trois champs obscurs sont disposés perpendiculairement entre eux, de façon que, pour chaque série d'images, l'oiseau se détache sur un fond parfaitement noir.

Pour montrer qu'il est indispensable de voir sous des aspects différents chacune des attitudes de l'oiseau, nous rapprocherons l'une de l'autre deux séries d'images d'un goéland au vol, l'une (fig. 46) prise de côté, et l'autre prise d'en haut (fig. 47). On voit comment chacune de ces séries d'images se complète par l'autre et l'on comprend l'insuffisance des documents fournis par l'une quelconque de ces séries si elle était isolée.

Dans le vol du pigeon, vers la fin de leur phase d'abaissement, les ailes se portent fortement en avant, en se rapprochant l'une de l'autre; cela se voit assez bien (fig. 48) dans la série en projection verticale en *a*; et pourtant il est difficile d'imaginer, d'après cette série toute seule, à quel point les deux extrémités des ailes sont voisines l'une de l'autre. On est étonné de voir en *a'*, sur la série en projection horizontale, que les ailes se touchent presque par leurs pointes.

A un autre instant, quand l'aile commence à remonter, elle forme une sorte de voile concave, ouverte en avant en *b* dans la série projetée verticalement. Mais il serait difficile de comprendre la torsion qu'elle éprouve, si l'image *b'* en projection horizontale ne montrait comment cette surface est contournée, se dressant suivant un plan vertical dans sa partie externe, au niveau des

rémiges primaires, tandis qu'elle forme, dans sa partie interne, une calotte qui semble répondre à une portion de spère.

A la fin de leur remontée en *c*, les ailes s'adossent l'une à l'autre, comme on le voit mieux en *c'*, et se touchent même tout à fait dans les premiers instants du vol, en produisant un choc sonore que Virgile a déjà décrit et qu'il a comparé à l'entre-choquement de deux mains qui applaudissent; le poète dit, en parlant d'une colombe qui s'envole d'un toit:

[*Rita pennis*

... *Plasumque exter  
Dat tecto ingentem....*

(*Énéide*, I. V, v. 215)

On conçoit que, pour obtenir l'expression complète de chacune des attitudes de l'oiseau, il ne faille pas négliger les documents fournis par les photographies prises suivant un troisième aspect, celles qu'on recueille en plaçant l'appareil photochronographique, suivant le prolongement de l'axe même du vol.

Mais si l'on se reporte à la figure 45, on comprend que, malgré ses déplacements, l'oiseau formera toujours son image sur le même point de la plaque sensible, l'axe de son vol se trouvant sur le prolongement de l'axe optique principal de l'objectif photographique. Dans les images ainsi obtenues, les ailes de l'oiseau occupent seules des positions différentes, suivant qu'elles s'élèvent ou s'abaissent; mais les images successives du corps se confondent en se superposant les unes aux autres.

Pour avoir des images distinctes, verticalement projetées sur un plan perpendiculaire à l'axe du vol, il



Fig. 44. — Images alternantes d'un goéland au vol.  
Les flèches indiquent l'ordre dans lequel se lit la succession des images.

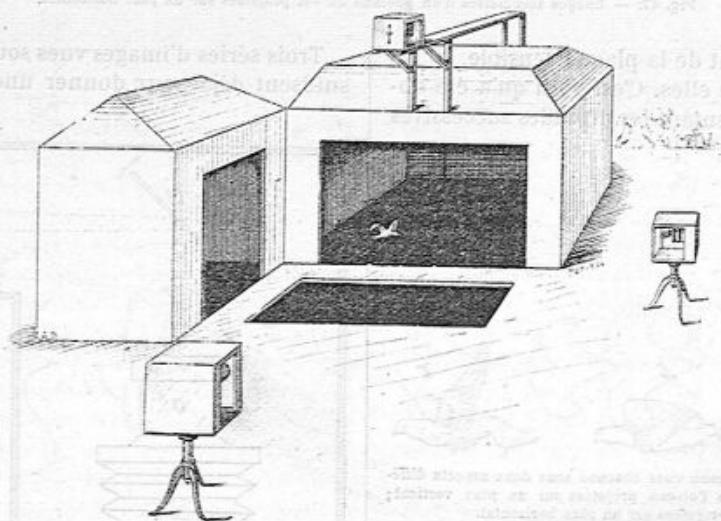


Fig. 45. — Disposition des trois champs obscurs et des trois appareils photochronographiques pour obtenir simultanément trois séries d'images projetées sur des plans différents.

faut dissocier ces images au moyen de certains artifices. L'un des meilleurs procédés consiste à placer (fig. 49) au-devant de l'objectif un miroir plan argenté

sur sa face antérieure, placé dans un plan vertical et incliné à 45° sur l'axe du vol d'une part, et sur l'axe optique principal de l'appareil photochronographique

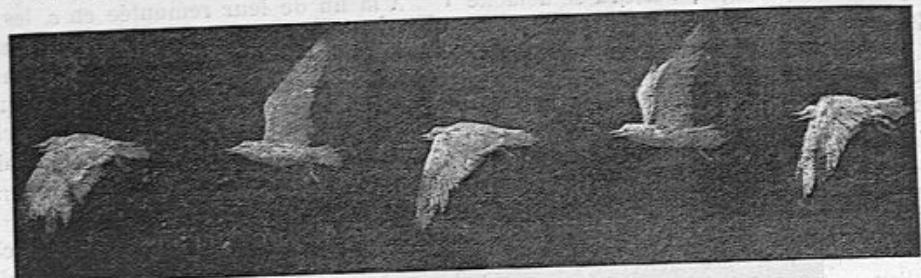


Fig. 46. — Images successives d'un goéland projetées sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol.

d'autre part. On imprime à ce miroir un mouvement de rotation uniforme et très lent autour de son axe, pendant qu'on prend les images successives de la façon ordinaire. Les images viennent alors se former, cha-

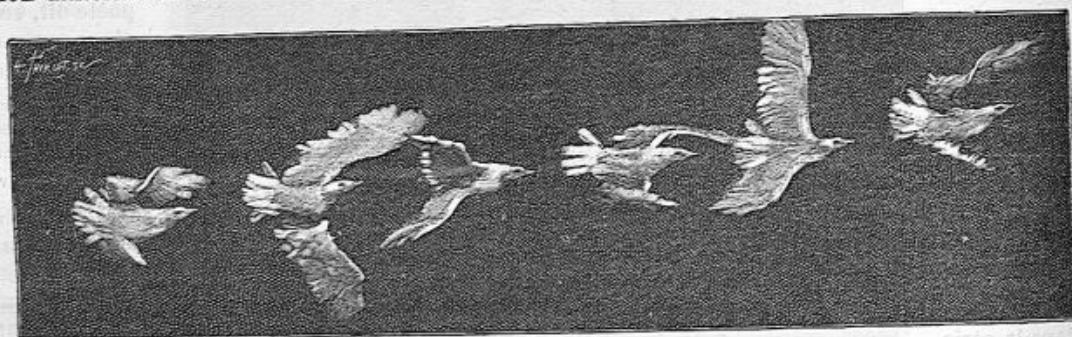


Fig. 47. — Images successives d'un goéland au vol projetées sur un plan horizontal.

cune en un lieu différent de la plaque sensible, et ne se confondent plus entre elles. C'est ainsi qu'a été obtenue la figure 50 représentant les attitudes successives



Fig. 48. — Trois attitudes d'un pigeon vues chacune sous deux aspects différents. — a, b, c, attitudes de l'oiseau projetées sur un plan vertical; a', b', c', les mêmes attitudes projetées sur un plan horizontal.

d'un goéland qui volait un peu obliquement dans la direction de l'appareil (fig. 50).

On peut donc multiplier à l'infini les aspects divers sous lesquels seront prises les images de l'oiseau, puisque l'axe de son vol peut présenter des orientations variées par rapport à l'axe des objectifs simultanément braqués sur lui.

Trois séries d'images vues sous des aspects différents suffisent déjà pour donner une idée précise de l'atti-

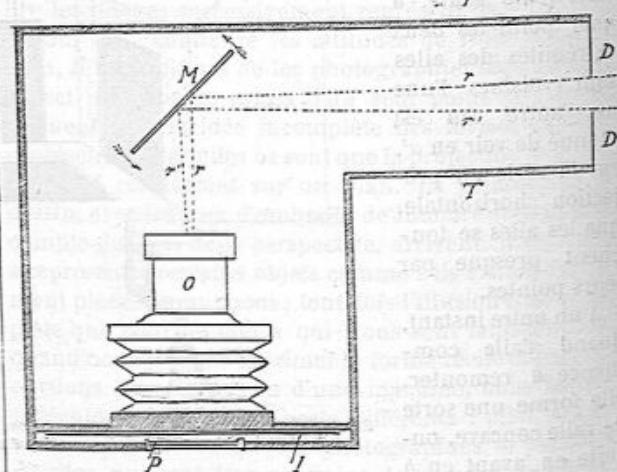


Fig. 49. — Disposition du miroir tournant M pour la dissociation des images qui se produiraient successivement sur un même endroit de la plaque photographique.

tude que présente un oiseau à des instants successifs d'un coup d'aile. On a réuni dans le tableau (fig. 51)

trois séries de ce genre prises sur un goéland. En A sont disposées dix images projetées sur un plan horizontal et représentant l'oiseau vu d'en haut, à des instants équidistants d'un coup d'aile; en B, les mêmes

attitudes sont représentées en projection sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol; en C, l'oiseau est vu obliquement d'avant et de côté.

Si nous suivons dans ces trois séries les mouvements



Fig. 50. — Images dissociées d'un goéland qui vole dans la direction de l'appareil.  
La série entière correspond à un seul coup d'aile dont la durée est de 1/5 de seconde.

d'un point du corps, de l'articulation carpienne de l'aile par exemple, nous voyons que ce point s'élève et s'abaisse en même temps qu'il s'approche et s'éloigne tour à tour de l'axe du corps. On voit, en comparant

les images synchrones sur les séries A et B, que c'est au début de la remontée de l'aile que le carpe se rapproche le plus du corps de l'oiseau, et que c'est dans le milieu de la phase d'abaissement (image 1), quand

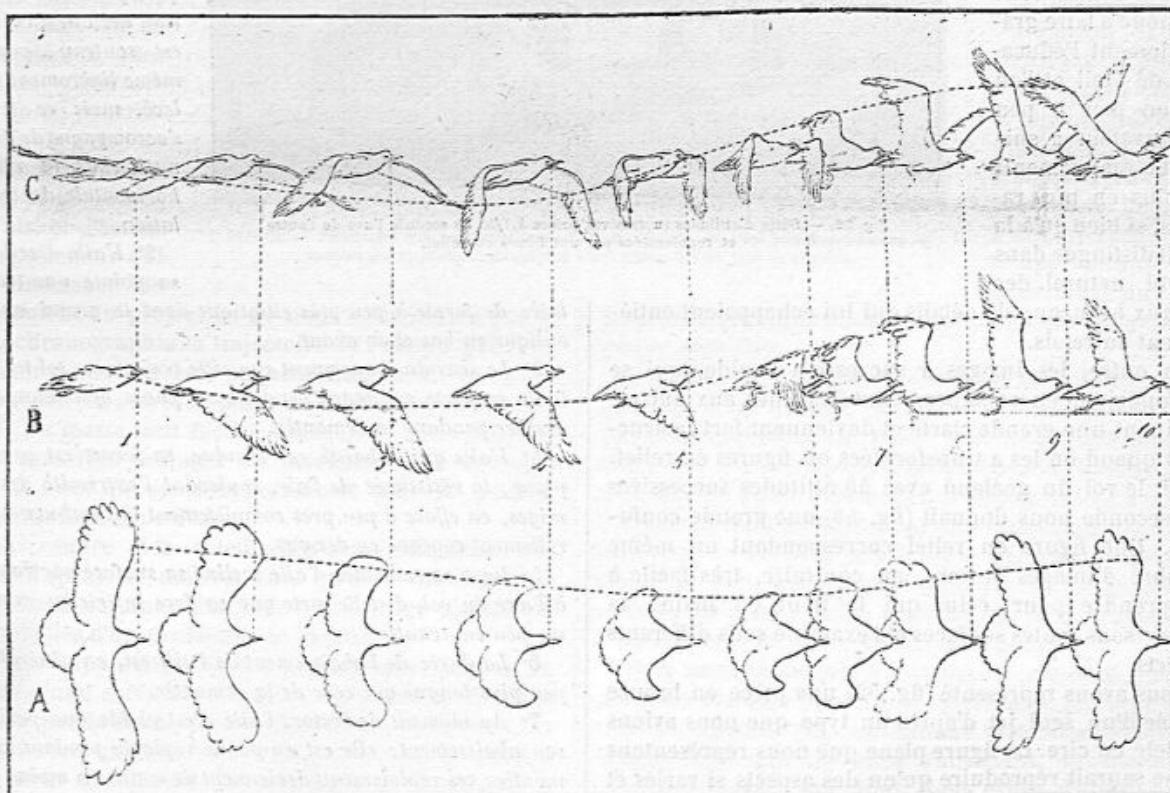


Fig. 51. — Tableau des attitudes successives d'un goéland et trajectoires d'un point de son aile, projetées en A sur un plan horizontal; en B, sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol; en C, sur un plan vertical oblique par rapport à cet axe.

l'aile est étendue au maximum, que le carpe est le plus éloigné du corps. Ce tableau nous montre donc que les oscillations verticales de la région carpienne sont dans un rapport assez compliqué avec les oscillations hori-

zontales. On ne saurait bien exprimer la relation de ces deux sortes de courbes que par les inflexions d'une tige solide courbée suivant deux sens différents. C'est, du reste, aux figures solides qu'il faut recourir en pa-

reil cas, ainsi que l'a fait M. Carlet lorsqu'il a voulu représenter la trajectoire d'un point du corps de l'homme dans la marche.

Du reste, les images photochronographiques renferment tous les éléments nécessaires pour déterminer, à chaque instant, la position de chaque point du corps de l'oiseau et même pour modeler des figurines correspondant chacune à l'une des attitudes que présente l'oiseau pendant un battement de ses ailes. Ces figures en relief constituent la plus parfaite expression des phases du mouvement dont on veut montrer le caractère. En les disposant dans un zootrope, on fait assister le spectateur à la succession périodique de ces phases et on lui donne l'illusion absolue des mouvements de l'oiseau. En outre, il est possible de ralentir à volonté la période des mouvements de l'aile, à tel point que l'œil en suive aisément toutes les phases (1).

On arrive par cette méthode à faire graduellement l'éducation de l'œil et l'on amène peu à peu l'observateur à suivre des mouvements de plus en plus rapides, si bien qu'à la fin, il distingue dans le vol naturel des oiseaux beaucoup de détails qui lui échappaient entièrement autrefois.

En outre, les images à succession rapide, qui se confondaient en se superposant les unes aux autres, prennent une grande clarté et deviennent fort instructives quand on les a transformées en figures en relief. Ainsi, le vol du goéland avec 50 attitudes successives par seconde nous donnait (fig. 43) une grande confusion. Une figure en relief correspondant au même nombre d'images devient, au contraire, très facile à comprendre pour celui qui la tient en main, la tourne sous toutes ses faces et l'examine sous différents aspects.

Nous avons représenté (fig. 52) une pièce en bronze coulée d'un seul jet d'après un type que nous avions modelé en cire. La figure plane que nous représentons ici ne saurait reproduire qu'un des aspects si variés et si instructifs que donne l'original.

Vous pourrez étudier ces figures en relief avec ou sans l'emploi de zootrope, à la Station physiologique où elles sont tous les jeudis à votre disposition. Et vous verrez que l'emploi du modelage donne seul l'expres-

sion complète et vraiment scientifique des formes et des attitudes. Malheureusement, la nécessité d'introduire dans des livres les descriptions morphologiques ne permet que l'emploi du dessin trop souvent insuffisant. Les images stéréoscopiques donneraient, dans bien des cas, une idée moins imparfaite des objets représentés.

Mais c'est le langage surtout qui est impuissant à décrire les différentes phases des mouvements de l'oiseau; je n'y recourrai que pour énumérer, sous une forme sommaire, les principaux faits sur lesquels doit se baser l'étude dynamique et mécanique du vol. Voici quels sont ces faits qui résultent soit de l'observation, soit de l'emploi des différentes méthodes expérimentales appliquées à l'étude du vol des oiseaux.

1<sup>o</sup> L'abaissement des ailes soulève légèrement le corps de l'oiseau et accroît sa vitesse de translation horizontale; tandis que, pendant l'élévation des ailes, l'oiseau est soutenu, parfois même légèrement soulevé, mais ce temps s'accompagne de diminution de la vitesse horizontale de translation.

2<sup>o</sup> L'aile décrit par sa pointe une trajectoire de forme à peu près elliptique dont le grand axe est oblique en bas et en avant.

3<sup>o</sup> Le sens du mouvement sur cette trajectoire est tel, que l'aile se porte en avant pendant sa phase descendante, en arrière pendant sa remontée.

4<sup>o</sup> L'aile qui s'abaisse est étendue, sa forme est presque plane; la résistance de l'air, soulevant l'extrémité des rémiges, en efface à peu près complètement la courbure naturellement concave en dessous.

5<sup>o</sup> Dans sa remontée, l'aile incline sa surface par rapport à l'axe du vol, de telle sorte que sa face inférieure regarde un peu en avant.

6<sup>o</sup> La durée de l'abaissement de l'aile est, en général, un peu plus longue que celle de la remontée.

7<sup>o</sup> Au moment de l'essor, l'aile n'est rigide que pendant son abaissement; elle est en partie repliée pendant la remontée; ces repliements deviennent de moins en moins prononcés, chez les grands oiseaux, à mesure que le vol s'accélère.

8<sup>o</sup> A l'essor, la remontée de l'aile s'accompagne de rotation des rémiges sur leur axe longitudinal. Ces rémiges ferment l'air individuellement par leur tranche, laissant entre elles des intervalles par lesquels l'air passe librement.

Tels sont les faits bien établis qui peuvent déjà ser-

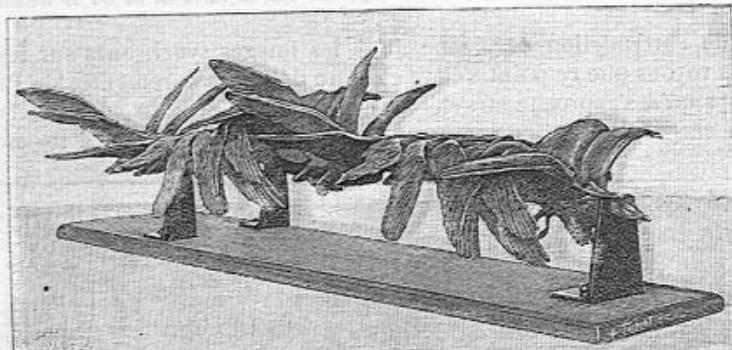


Fig. 52. — Série d'attitudes successives prises à 1/50 de seconde l'une de l'autre et représentées par une figure en relief.

(1) Voir, pour la description du zootrope, *la Nature*, 3 déc. 1887.

vir de base à l'interprétation mécanique du coup d'aile.

Ils permettent en effet de mesurer les forces qui sont en jeu dans le vol des oiseaux, d'apprécier les résistances que l'air présente à l'aile qui le rencontre sous différentes incidences; enfin, de mesurer le travail mécanique dépensé par l'oiseau pour se soutenir et se transporter dans l'air.

## II.

### DES FORCES QUI AGISSENT DANS LE VOL RAMÉ.

Quand on connaît la masse d'un corps et le mouvement dont il est animé, on peut en déduire les forces qui interviennent pour produire ce mouvement. Ainsi, en balistique, si on connaissait les positions successives d'un boulet sur sa trajectoire, à des instants déterminés, on en pourrait déduire la force de la poudre qui l'a lancé, la résistance de l'air et l'action de la pesanteur qui ont influencé le mouvement du projectile. Or nous connaissons par la photochronographie la trajectoire de l'oiseau qui vole, ses inflexions diverses, ses accélérations et ses ralentissements; en outre, le poids de l'oiseau et, par conséquent, sa masse sont faciles à mesurer; nous pouvons donc, sans rien préjuger du mécanisme du vol, mesurer la force qui soutient l'oiseau et celle qui produit sa translation dans l'air.

Pour rendre plus intelligible cette estimation des forces d'après les mouvements qu'elles impriment à des masses connues, étudions d'abord les conditions plus simples d'un problème de balistique.

Devant l'appareil photochronographique, lançons, au moyen d'une sorte de catapulte, une sphère blanche éclairée par le soleil. Non seulement nous suivons sur le cliché les inflexions de la trajectoire du projectile, mais nous connaissons les positions qu'il occupait à des intervalles de temps connus, à chaque cinquantième de seconde dans le cas présent.

La figure 53 montre cette trajectoire et permet d'en caractériser géométriquement la forme qui est très sensiblement celle d'une parabole.

Si l'on rapporte à des coordonnées rectangulaires les positions successives du mobile à des intervalles de

temps égaux, on pourra (fig. 54) suivre séparément l'effet des deux forces qui agissent sur lui à chaque instant.

D'une part, le déplacement horizontal du projectile mesuré sur l'axe horizontal est sensiblement uniforme, il est donc produit par une force qui avait cessé d'agir dès le début du mouvement que nous observons : cette force est la détente d'un ressort.

D'autre part, le déplacement vertical, mesuré sur l'axe vertical, est sensiblement uniformément accéléré; il est donc l'effet d'une force constante, la pesanteur.

La valeur relative de ces forces peut se déduire du mouvement que chacune d'elles a imprimé à la masse du projectile. Enfin, comme on connaît la valeur absolue de la pesanteur, c'est-à-dire le poids du projectile, on peut comparer à ce poids, c'est-à-dire évaluer en grammes la force du ressort propulseur, si l'on connaît le temps pendant lequel ce ressort a agi.

De même, si l'on connaît le poids d'un oiseau et si la photochronographie donne les positions qu'il a occupées dans l'espace à des intervalles de temps connus, on pourra calculer les

forces qui sont intervenues pour le soutenir et le transporter dans l'air.

Soit (fig. 55) une série d'images photochronographiques d'un goéland au vol. Sur chacune de ces images, choisissons un point bien défini qui ne soit caché par les ailes à aucun instant de leur battement: l'œil répond à peu près à ces conditions, mieux encore l'extrémité du bec. En joignant par une ligne ponctuée les positions de l'œil sur la série des images successives, on aura une courbe sinuuse qui montre que l'œil de l'oiseau a subi, pendant un coup d'aile, des alternatives d'élévation et d'abaissement.

Tous les observateurs s'accordent à admettre, qu'aux premiers instants du vol principalement, le corps des oiseaux éprouve des oscillations verticales, s'élevant chaque fois que les ailes s'abaissent, s'abaissant à chaque remontée des ailes. Nous avons, d'autre part, constaté, en les inscrivant, ces oscillations du corps de l'oiseau; leur existence n'est donc point douteuse. Est-ce à dire que la masse de l'oiseau éprouve les oscillations que présente un point particulier du corps? Nous allons voir qu'il n'en est rien et que cette masse suit très sensiblement une trajectoire rectiligne.

La masse d'un corps doit être considérée comme

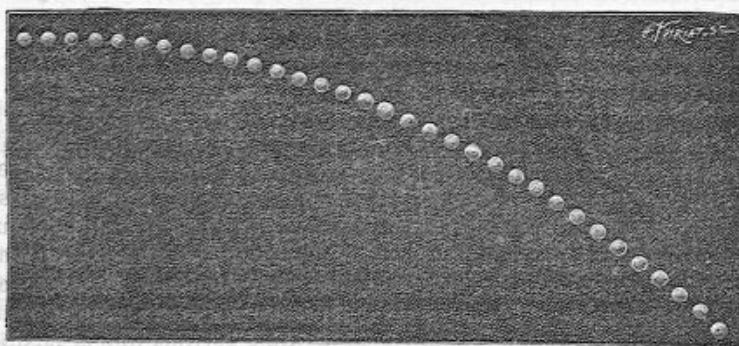


Fig. 53. — Trajectoire d'un projectile lancé horizontalement, avec ses positions successives données par la photochronographie à des intervalles de 1/50 de seconde.

ayant pour siège le centre de gravité de ce corps. Si, dans un projectile de forme sphérique et de structure homogène, le centre de gravité se confond avec le centre de figure, il n'en est plus de même pour un corps de forme irrégulière ou de densité inégale dont les différentes parties se déplacent les unes par rapport aux autres.

Dans un oiseau qui bat des ailes, le centre de gravité se déplace dans le corps sous l'influence de ces battements : il monte quand les ailes s'élèvent, descend quand les ailes s'abaissent, en un mot, se déplace de maintes manières à

l'intérieur du corps. Il peut donc se faire que le centre de gravité de l'oiseau se meuve sur une droite, tandis que chaque point du corps, individuellement considéré, présenterait un mouvement d'oscillation plus ou moins marqué, une trajectoire plus ou moins compliquée.

Pour rendre ce fait plus sensible, nous recourrons encore à la photochronographie. Au lieu d'une sphère unique, lançons devant le champ noir deux sphères de volumes inégaux réunis par un fil (fig. 56) ; ces deux masses, animées au départ d'un mouvement de rotation, vont se comporter l'une par rapport à l'autre à peu près comme un astre avec son satellite. Aucune des deux sphères ne suivra la trajectoire parabolique, mais décrira autour d'elle des oscillations d'autant plus prononcées que sa masse sera plus petite. Et, pendant ce temps, le centre de gravité du système se mouvrira sur la courbe parabolique, sans s'en écarter jamais.

La masse du corps de l'oiseau et la masse de ses ailes, changeant à chaque instant de position l'une par rapport à l'autre, s'influencent de la même façon que les boules conjuguées et s'impriment réciproquement des oscillations auxquelles le centre de gravité, c'est-à-dire la masse de l'oiseau ne participe pas.

Pour faire la part des oscillations apparentes de l'oi-

seau et de celles de son centre de gravité, il faut déterminer la position de ce point dans le corps de l'animal pendant les deux phases opposées, d'élévation et d'abaissement des ailes et voir si, à ces instants, le point qui représente la masse de l'oiseau participe aux déplacements oscillatoires dont les différents points matériels du corps sont animés.

La vieille méthode employée par Borelli pour déterminer la position du centre de gravité dans le corps d'un homme nous servira pour déterminer les déplacements du centre de gravité dans le corps de l'oiseau.

seau, suivant que les ailes sont élevées ou abaissées. Plaçons un goéland mort sur une planchette à bascule, après avoir disposé les ailes dans l'attitude d'élévation, et marqué sur le corps de l'oiseau la hauteur à laquelle est situé le centre de gravité. Abaissons maintenant les ailes, et déplaçons le corps de l'oiseau jusqu'à ce qu'il soit de nouveau en équilibre sur la planchette à bascule. Nous verrons que la position nouvelle du centre de gravité est environ 3 centimètres et demi plus bas que tout à l'heure. Ce déplacement de 35 millimètres que le centre de gravité a subi en raison des changements d'attitudes des ailes devra se retrancher de l'amplitude des oscillations apparentes de l'oiseau ; le reste constituera l'oscillation réelle de sa masse.

Dans la figure 55, une ligne ponctuée, passant par la série des positions de l'œil, donne l'oscillation apparente de ce point du corps de l'oiseau. D'autre

part, les signes formés d'une croix au milieu d'un cercle marquent les positions du centre de gravité de l'oiseau dans les instants extrêmes d'élévation et d'abaissement de ses ailes.

Si nous projetons cette figure sur un écran blanc, en l'agrandissant jusqu'aux dimensions réelles, nous déterminerons directement l'amplitude des oscillations qu'il s'agit de mesurer. A cet effet, traçons une droite tangente à deux minima de l'oscillation de l'œil ; puis,

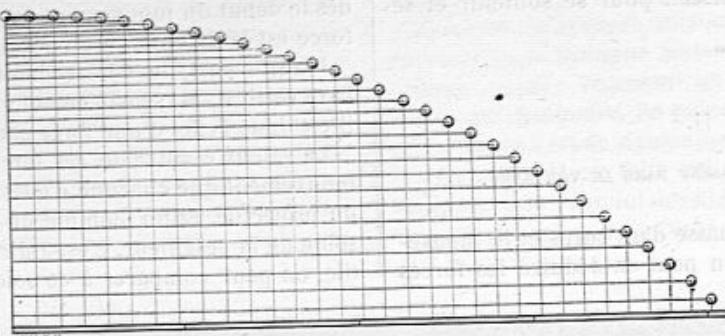


Fig. 54. — Positions successives du projectile rapportées à deux axes, l'un vertical, l'autre horizontal.

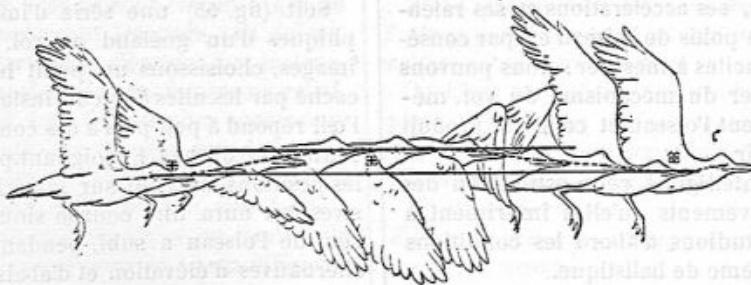


Fig. 55. — Trajectoire ondulante de l'œil d'un goéland pendant le vol.

par un maximum de ces oscillations, menons une parallèle à cette droite; l'intervalle des deux lignes mesure l'amplitude de l'oscillation de l'œil : il était, sur la figure en dimensions réelles, de 0<sup>m</sup>,045.

Quant au centre de gravité de l'oiseau, c'est à peine s'il oscille : les signes qui en marquent la place sur la figure 55 sont à peu près sur une même ligne droite. L'écart réel qu'ils présentaient par rapport à cette droite était de moins d'un centimètre. Or, avec les moyens grossiers dont nous disposions pour déterminer la position du centre de gravité pendant les différentes attitudes de l'oiseau, une approximation d'un centimètre est négligeable, et nous pouvons admettre que, dans le vol horizontal, la masse de l'oiseau se transporte sensiblement suivant une ligne droite (1).

Cette première donnée permet de mesurer l'une des forces qui interviennent dans le vol de l'oiseau et d'affirmer que l'action de ses ailes sur l'air engendre une force verticale, c'est-à-dire opposée à la pesanteur, et constamment égale au poids de l'oiseau. Ce poids, pour le goéland sur lequel nous avons opéré, était de 623 grammes.

Un calcul analogue va conduire à apprécier la force qui transportait horizontalement l'oiseau, d'après l'accélération imprimée à chaque instant à la masse de son corps.

De même que pour le projectile dont la marche a été représentée figure 54, la vitesse horizontale de l'oiseau peut être évaluée, à chaque cinquantième de seconde, d'après l'espace horizontalement parcouru par son œil entre deux images successives ; ces images étant, comme ci-dessus, agrandies aux dimensions réelles.

Les espaces parcourus par l'œil de l'oiseau dans chacun des cinquantièmes de seconde contenus dans la durée d'un coup d'aile étaient les suivants :

Phase d'abaissement de l'aile.	Phase de remontée de l'aile.
1 <sup>e</sup> 50 <sup>e</sup> de seconde . . . . .	0 <sup>m</sup> ,118      1 <sup>e</sup> . . . . . 0 <sup>m</sup> ,136
2 <sup>e</sup> — . . . . .	0 <sup>m</sup> ,124      2 <sup>e</sup> . . . . . 0 <sup>m</sup> ,128
3 <sup>e</sup> — . . . . .	0 <sup>m</sup> ,129      3 <sup>e</sup> . . . . . 0 <sup>m</sup> ,123
4 <sup>e</sup> — . . . . .	0 <sup>m</sup> ,134      4 <sup>e</sup> . . . . . 0 <sup>m</sup> ,118
5 <sup>e</sup> — . . . . .	0 <sup>m</sup> ,137      5 <sup>e</sup> . . . . . 0 <sup>m</sup> ,115

D'après ces données, nous allons d'abord construire la courbe des vitesses de l'oiseau pendant la durée d'un coup d'aile.

Sur la droite OX, prise comme axe des abscisses, élevons (fig. 57), à des distances égales les unes des

(1) Il est bien entendu que cette conclusion ne s'applique pas aux oiseaux à vol sautillant comme la grive, le pivert, etc.; dans ces espèces, en effet, les battements des ailes présentent des temps d'arrêt pendant lesquels l'oiseau suit toujours une trajectoire sinuose; nous n'entendons parler actuellement que du vol soutenu et régulier.

autres, les ordonnées 1 2 3 4 5, dont les longueurs correspondent respectivement aux espaces parcourus par l'oiseau pendant les instants 1<sup>e</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> de la phase d'abaissement des ailes; puis, les ordonnées 1', 2', 3', 4', 5', dont les longueurs expriment les espaces parcourus pendant les instants successifs correspondants de la phase d'élévation des ailes.

Les sommets réunis de toutes ces ordonnées donnent la courbe ponctuée *a b c*, *courbe des vitesses*, qui montre l'accroissement de vitesse du vol pendant l'abaissement de l'aile, son ralentissement pendant la phase de remontée. Cette première notion est parfaitement d'accord avec ce que l'inscription mécanique nous avait montré autrefois relativement aux variations de la vitesse du vol pendant la durée d'un coup d'aile.

Cette courbe exige toutefois une correction pour exprimer exactement les variations de la vitesse de l'oiseau. En effet, demême que pour les oscillations verticales, il faut distinguer, dans les variations

de vitesse, le déplacement de l'œil de l'oiseau, du déplacement de son centre de gravité. L'expérience par la méthode de Borelli fait voir que, dans l'abaissement, les ailes étant portées en avant, le centre de gravité s'avance dans le corps de l'oiseau ; que dans la remontée, au contraire, les ailes étant portées en arrière, le centre de gravité recule, et que l'écart entre ces deux positions extrêmes est de 0<sup>m</sup>,015 environ. Si nous admettons, ce qui est sensiblement vrai, que ces déplacements du centre de gravité dans le corps de l'oiseau se fassent d'un mouvement uniforme, nous devons, pour exprimer la vitesse réelle de l'oiseau, allonger chacune des ordonnées 1 2 3 4 5 de quantités régulièrement croissantes, dont le total représente 15 millimètres; nous allongeons également les ordonnées 1' 2' 3' 4' 5' de quantités régulièrement décroissantes. De cette façon, la courbe réelle de la vitesse du centre de gravité de l'oiseau, c'est-à-dire de sa masse, deviendra la courbe pleine *a' b' c'*.

De cette première courbe, nous tirerons celle des accélérations, en portant en ordonnées sur la ligne OX les différences de longueurs des ordonnées consécutives de la courbe des vitesses. Cette nouvelle courbe *a'*, représentée dans le bas de la figure 57 par une série de petits traits, montre que l'accélération de l'oiseau est tantôt positive et tantôt négative : elle exprime la valeur réelle de ces accélérations et ralentissements ; enfin, elle va permettre de mesurer les forces qui agissaient alternativement pour pousser l'oiseau d'arrière en avant, puis d'avant en arrière.

En effet, les forces sont proportionnelles aux accélérations qu'elles communiquent à une même masse en un temps donné. De sorte que, sachant que la pesanteur imprimerait à l'oiseau une accélération de 9<sup>m</sup>,80 à chaque

seconde, ou de 0<sup>m</sup>,0039 à chaque cinquantième de seconde, nous n'avons qu'à comparer à cette dernière valeur l'accélération exprimée à chaque instant par la courbe  $a'$  pour connaître, à ces instants, le rapport

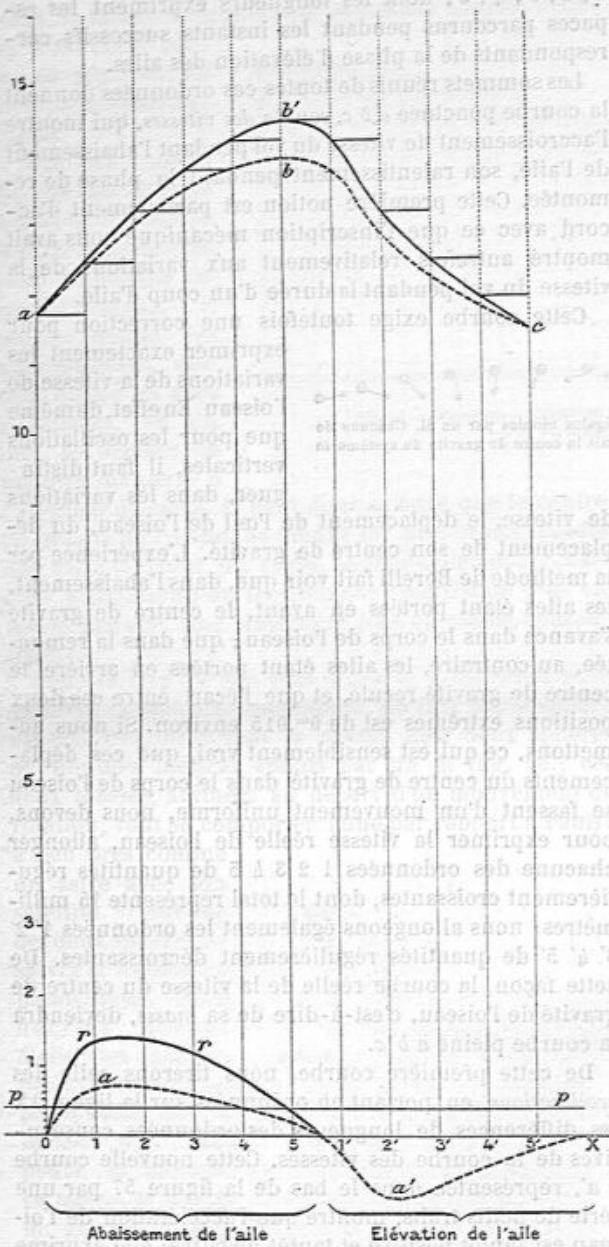


Fig. 57. — Courbes des vitesses et des accélérations de l'oiseau pendant la durée d'un coup d'aile. Les ordonnées sont en grandeur réelle.

de la force accélératrice à 623 grammes, poids de l'oiseau.

On a tracé (fig. 57) la droite  $p p$ , en réunissant tous les sommets d'une suite d'ordonnées dont la hauteur est de 0<sup>m</sup>,0039 ; cette droite exprime l'accélération constante que la pesanteur imprime, en un cinquantième

de seconde, aux corps qui lui sont librement soumis. En comparant à chacune de ces ordonnées de la ligne  $p p$  celles de la courbe  $a'$ , on aura la valeur en grammes de la force accélératrice qui agit sur l'oiseau.

*Exemple.* — A l'instant deuxième de l'abaissement de l'aile, l'accélération horizontale est de 0<sup>m</sup>,006, celle qui produirait la pesanteur étant 0<sup>m</sup>,0039. La force accélératrice est donc les 60/39 de 623 grammes (poids de l'oiseau), c'est-à-dire 958 grammes.

En opérant ainsi pour la série des points de la courbe  $a'$ , on trouve les valeurs suivantes pour la force qui propulse l'oiseau pendant l'abaissement des ailes et pour celle qui ralentit le vol pendant leur remontée :

Période d'abaissement.	Période d'élevation.
1 <sup>e</sup> 50 <sup>e</sup> de seconde. . . + 0 gr.	1 <sup>e</sup> 30 <sup>e</sup> de seconde. . . — 159
2 <sup>e</sup> — . . . + 958	2 <sup>e</sup> — . . . — 1303
3 <sup>e</sup> — . . . + 798	3 <sup>e</sup> — . . . — 798
4 <sup>e</sup> — . . . + 798	4 <sup>e</sup> — . . . — 479
5 <sup>e</sup> — . . . + 479	5 <sup>e</sup> — . . . — 479

Les valeurs que nous venons d'indiquer pour la force horizontale qui accélère le vol pendant l'abaissement de l'aile ne s'appliqueraient qu'au mouvement d'une masse dans l'espace libre, tel que le mouvement d'un astre. Dans le vol de l'oiseau, la résistance de l'air s'oppose continuellement à la force qui produit sa translation horizontale ; les évaluations de cette force d'après l'accélération de la masse de l'oiseau sont donc trop faibles, car cette accélération n'est produite que par l'excès de la force propulsive sur la résistance de l'air.

On arrive à mesurer approximativement cette résistance d'après les considérations suivantes :

A partir du moment de l'essor, un oiseau gagne graduellement de la vitesse jusqu'à un maximum, variable pour chaque espèce, et qui ne peut être dépassé. Cette limite imposée à la vitesse de l'oiseau est du même ordre que celle qui s'oppose à l'accélération indéfinie d'un navire en marche par exemple ; la résistance de l'air pour l'oiseau, celle de l'eau pour le navire, limitent la vitesse en équilibrant entièrement les forces propulsives.

Mais un oiseau qui a atteint la limite de sa vitesse moyenne présente encore, comme la photochronographie le montre, des alternatives d'accélérations et de ralentissements qui tiennent à ce que l'action propulsive de ses ailes est intermittente, au lieu que la résistance de l'air est continue.

La courbe  $a'$  qui, dans sa partie négative donne aux instants successifs, 1' 2'...5' la mesure des ralentissements de l'oiseau, donne en même temps la valeur de la résistance de l'air qui les produit. Les deux phases opposées d'accélération et de ralentissement, qui s'observent tour à tour, étant sensiblement égales en durée et en intensité dans la figure 57, on est en droit de conclure que la résistance de l'air, quand elle

agit seule, a la même valeur que la force accélératrice. Or cette dernière n'est autre que l'excès de la force qui propulse l'oiseau sur la résistance continue de l'air. La force horizontale réellement produite par l'oiseau à chaque abaissement des ailes sera donc le double de celle qui se manifeste par l'accélération qu'elle produit; Il faudra donc doubler les valeurs que nous avons indiquées dans le tableau ci-dessus et admettre les chiffres suivants :

*Force horizontale pendant l'abaissement des ailes.*

1 <sup>er</sup> 50 <sup>e</sup> de seconde. . . . .	0
2 <sup>e</sup> — — — —	1916
3 <sup>e</sup> — — — —	1596
4 <sup>e</sup> — — — —	1596
5 <sup>e</sup> — — — —	958 (1)

Vous voyez combien sont inégales les deux forces qui agissent dans le vol : l'une, en effet, égale constamment le poids de l'oiseau qu'elle soutient, contre la pesanteur; pour le goéland, sujet de nos expériences, cette force avait pour valeur 623 grammes; l'autre, au contraire, essentiellement discontinue, puisqu'elle n'agit que pendant la phase d'abaissement des ailes, a pour valeur maxima 1916 grammes environ.

Beaucoup d'auteurs ont cherché à évaluer la force de l'oiseau, mais ils sont arrivés à des valeurs dont les écarts énormes sont bien faits pour enlever toute confiance dans ce genre de calculs. Ainsi, tandis que Borelli (2) estime que la force de l'oiseau égale environ 3000 fois son poids, Cayley (3) pense que, pour propulser l'oiseau dans l'air, il suffit d'une force égale à 1/30 de son poids.

On remarquera toutefois que les calculs établis jusqu'ici manquaient d'une base expérimentale et s'appuyaient tous sur certaines hypothèses qui attribuaient à l'oiseau des mouvements dont la réalité ne pouvait être confirmée par l'observateur.

Nos évaluations, au contraire, sont basées sur des données expérimentales; leur précision dépend tout entière de celle des documents sur lesquels nous avons opéré.

Or, dans la mesure des temps et des espaces parcourus, la photochronographie comporte une très grande précision. Le disque fenêtré, exactement divisé et réglé dans son mouvement de rotation par un régulateur bien construit, contrôlé, du reste, dans sa marche par

(1) Dans cette évaluation, nous supposons constante la résistance de l'air à chaque instant de l'abaissement de l'aile, tandis qu'en réalité cette résistance, croissant à peu près en raison du carré de la vitesse de l'oiseau, aura des valeurs différentes, puisque la vitesse est elle-même variable pendant cette phase. Mais les corrections qu'il y aurait à faire de ce chef sont peu importantes et nécessiteraient des calculs assez difficiles; nous n'en tiendrons pas compte ici.

(2) Borelli, *De motu animalium*, CXXII.

(3) *Journal de Nicholson*, t. XXIV, p. 164, traduit dans *L'Aéronaute*.

les méthodes chronographiques, donne des images dont les successions sont équidistantes avec une approximation de 1/50 000 de seconde au plus.

Quant à la détermination des positions de l'oiseau dans l'espace, son exactitude dépend entièrement de la netteté des images et par conséquent de la perfection des appareils optiques dont on s'est servi. Avec les objectifs photographiques du commerce, si l'on veut avoir des images fortement éclairées, ce qui est nécessaire pour les courtes poses de 1/1000 de seconde et au-dessous, il faut recourir aux courts foyers. Dès lors, les images fort petites qu'on obtient doivent être soumises à des agrandissements considérables qui risquent de les déformer et qui, dans tous les cas, donnant une

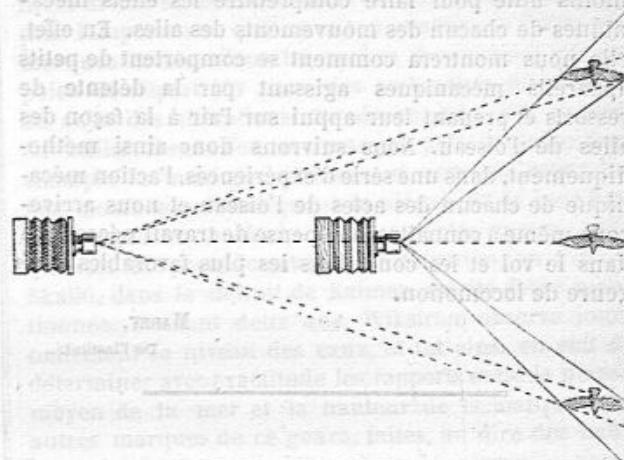


Fig. 58. — Influence de la distance de l'objet en mouvement sur la position apparente des images.

grande importance au grain de la gélantine, rendent incertains les contours des images et, par conséquent, la position des points de repère. Or quelques millimètres d'erreur dans la position de ces points altèrent beaucoup l'estimation des vitesses de l'oiseau.

Si, pour avoir des images plus grandes, on rapproche l'appareil photographique de l'objet en mouvement, les indications sont faussées par les mouvements parallactiques.

Soit (fig. 58) l'appareil situé à une courte distance du lieu où passe l'oiseau, celui-ci apparaîtra sous des incidences différentes aux différents lieux de son passage : il sera d'abord vu obliquement, de telle sorte que sa tête sera visible et sa queue cachée; plus loin, il sera vu exactement de profil; à la fin, on le verra de nouveau obliquement, mais par l'arrière.

Ces effets dus à la perspective diminuent à mesure qu'on place l'appareil plus loin de l'objet et que les rayons qui vont de l'un à l'autre tendent de plus en plus à devenir parallèles entre eux. Il faut nécessairement, pour obtenir des images aussi parfaites que possible, employer des objectifs à long foyer et à grande ouverture, permettant d'opérer de loin et d'avoir ce-

pendant de grandes images puissamment éclairées.

La photochronographie exige donc, comme la photographie stellaire, des appareils spéciaux d'une grande puissance que l'insuffisance de ressources matérielles m'a empêché jusqu'ici de faire construire.

Et maintenant que vous connaissez la limite des erreurs que comporte l'emploi de la photochronographie dans l'analyse des mouvements du vol, vous admettrez, tout en désirant voir perfectionner encore cette méthode, qu'elle nous fournit déjà une base précise pour l'analyse cinématique du vol.

Cette nouvelle méthode, qui permet d'estimer les forces qui agissent dans le vol de l'oiseau, ne sera pas moins utile pour faire comprendre les effets mécaniques de chacun des mouvements des ailes. En effet, elle nous montrera comment se comportent de petits appareils mécaniques agissant par la détente de ressorts et prenant leur appui sur l'air à la façon des ailes de l'oiseau. Nous suivrons donc ainsi méthodiquement, dans une série d'expériences, l'action mécanique de chacun des actes de l'oiseau et nous arriverons même à connaître la dépense de travail nécessaire dans le vol et les conditions les plus favorables à ce genre de locomotion.

MAREY,  
De l'Institut.

## PHYSIQUE DU GLOBE

### Les variations de niveau des côtes de Suède.

Dans le domaine de la géographie physique, aucune question n'a captivé l'intérêt du grand public des pays du Nord à un plus haut degré que celle qui traite des variations de niveau de la presqu'île scandinave, par rapport à la mer qui l'entoure. On voit fréquemment, dans la presse quotidienne, des observations sur l'élévation et l'abaissement de la côte suédoise, qui semblent prouver l'existence d'un mouvement oscillatoire de cette presqu'île. En ce qui concerne la Suède, en particulier, l'élévation progressive des côtes au-dessus du niveau de la mer est presque passée en article de foi. Il convient, toutefois, de faire exception pour les parties méridionales de ces côtes qui paraissent, au contraire, soumises à un abaissement continu. C'est presque donner un témoignage de patriotisme que de croire à cette élévation de notre terre et d'en chercher des preuves, comme autrefois il convenait à tout bon Suédois de se passionner à l'idée que son pays était le plus ancien de la terre, le berceau de l'humanité. Et cette question de « l'abaissement de l'eau », ou de « l'élévation de la terre », qu'on l'appelle comme on voudra, mérite certainement, de la part de nous autres Sué-

dois, une attention toute particulière, puisque c'est chez nous qu'on a observé ce phénomène caractéristique pour la première fois, et qu'on en a fait un sujet d'études approfondies. A ce point de vue, la Suède est une terre classique. Maint savant étranger, méfiant d'abord et complètement opposé à cette opinion, a été convaincu de l'existence de cette instabilité après avoir étudié le phénomène sur place. Nous n'avons qu'à rappeler le cas de Charles Lyell, qui, après son voyage en Suède en 1834, défendit, avec autant d'ardeur qu'il en avait mis auparavant à la combattre, la théorie du *gradual rising of the land in certain parts of Sweden* (élévation graduelle de certaines parties de la terre suédoise).

Si l'on ne peut nier qu'une variation du niveau des terres, par rapport à celui de la mer, ait réellement eu lieu, non seulement sur les côtes suédoises, mais presque en tous les points de la terre où l'on a étudié cette question ; si, de plus, on ne peut nier qu'un changement de ce genre se soit manifesté dans notre siècle même, on ne veut pourtant pas dire par là que ce phénomène soit encore progressif ni surtout qu'on l'ait complètement compris. Moins encore oserait-on prétendre que le dernier mot ait été dit sur les causes de ces élévations ou de ces abaissements singuliers : que ces causes soient à chercher dans les mouvements de l'écorce terrestre ou dans ceux de la surface de la mer.

Pendant les dernières années, cette question intéressante a attiré de nouveau l'attention des hommes de science, et, par les travaux des chercheurs allemands en particulier, elle a été placée sur un terrain qui mérite, au plus haut point, de fixer celle du grand public instruit. C'est là ce qui détermine l'auteur de cet article à donner un court exposé de l'origine de la question et de son développement pendant ces dernières années (1).

On admet généralement que Celsius, l'astronome renommé d'Upsal, s'aperçut le premier que la mer semblait se retirer des côtes avoisinantes en découvrant des roches et des écueils. Avant lui, cependant, plusieurs savants suédois avaient déjà observé ce phénomène (si apparent du reste qu'il était généralement connu des habitants des côtes avant que les savants se fussent mis à l'étudier), et ils avaient écrit sur ce sujet de courts traités : entre autres Urban Iljärne, déjà en 1702, et Em. Swedensborg, en 1719. Iljärne cite plusieurs îles de la mer Baltique qui étaient autrefois moins élevées au-dessus de la mer. Mais ces écrits passèrent presque inaperçus, et la question ne donna lieu

(1) Dans un travail remis à l'Académie royale des sciences de Suède et encore inédit, l'auteur a traité cette question d'une façon plus détaillée et a rendu compte, en même temps, des observations faites par lui, pendant plusieurs années, sur ce même sujet.