

Bibliothèque numérique



Giraud-Teulon, Félix / Marey,
Etienne-Jules. - Physiologie de la
locomotion: étude rétrospective de la
théorie mécanique du vol des
oiseaux. / [Réponse de Marey à M.
Giraud-Teulon]

*In : Bulletin de l'Académie de
médecine, 1884, 2ème série,
tome XIII, n° 44, p. 1539-1565;
n° 45, p. 1590-1596*



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)
Adresse permanente : <http://www.biium.univ-paris5.fr/histmed/medica/cote?marey031>

Communication

PHYSIOLOGIE DE LA LOCOMOTION. — Etude rétrospective de la théorie mécanique du vol de l'oiseau.

Par M. GIRAUD-TEULON.

INTRODUCTION.

L'Académie n'a point oublié, — nous l'espérons pour nos efforts, — la discussion apportée par nous à cette tribune, il y a près d'une année, au sujet de l'un des principaux et plus intéressants problèmes de la locomotion animée, le mécanisme *du saut*, premier élément de la locomotion aérienne. Nous lui demandons la permission de reprendre devant elle la suite de ces études rétrospectives. L'indifférence manifestée par M. le professeur Marey, à l'endroit du mécanisme particulier qui caractérise le détachement du sol, dans la course et dans le saut, nous a fait craindre que ce même principe, auquel la généralité des physiologistes rattache la locomotion dans l'air et dans l'eau (1), n'eût été, au grand péril des conclusions, négligé par ce savant, dans son célèbre mémoire sur l'aviation ou locomotion de l'oiseau.

L'examen que nous allons faire, à ce point de vue, du chapitre consacré à ce problème dans la *Machine animale* de M. Marey, va nous montrer que nous ne nous trompons pas sur ce point.

I

a. Objet et description du vol: conditions que cet acte doit remplir.

L'appareil auto-mobile, animé, que l'on nomme oiseau, et dans la construction duquel sont accumulées les dispositions anatomiques les plus propres à diminuer son poids, mais dont

(1) La natation et le vol, dit M. Milne Edwards, sont des mouvements analogues au saut, mais qui ont lieu dans des fluides dont la résistance remplace, jusqu'à un certain point, celle du sol dans ce dernier phénomène (*Cours élémentaire de zoologie*, p. 209).

la densité n'en demeure pas moins considérablement supérieure à celle du fluide dans lequel il est appelé à se mouvoir, doit, pour réaliser cet objet, être détaché du sol, enlevé dans l'air, puis soutenu à telle ou telle hauteur, enfin transporté dans un sens ou dans un autre.

Il n'est pas besoin d'ajouter que la force qui produira ces résultats, il doit la trouver en lui, la créer par lui-même.

Or quels instruments a-t-il à sa disposition pour cela ? Chacun a répondu : ses ailes, mises en mouvement par la force musculaire, ses ailes, par leurs battements successifs. Décrirons-nous, dans une vue d'ensemble, l'apparence qu'offre aux yeux chacune des révolutions de ces organes ? Non ; le tableau en est banal. Une description suffisante jaillira, chemin faisant, de la discussion des divers temps de l'acte. Elle est d'ailleurs partout. Disons seulement que cet acte, que nous venons de nommer, comme tout le monde, révolution de l'aile, n'est pas, à proprement parler, une *révolution*, mot qui représente un acte continu, périodique. Non ; cet acte se compose de deux *temps* ou mouvements nettement séparés, et déterminant, chacun, l'arrêt précis de l'autre. Dans le premier (mouvement d'élévation), l'aile est portée du repos, *en haut et en avant*, par son bord antérieur tranchant et mince, sous l'inclinaison la plus propre à provoquer, de la part du milieu, la moindre résistance. Dans le second, l'aile déployée est, toute sa surface développée, abattue *de haut en bas*, et plus ou moins *d'avant en arrière*, sur l'air sous-jacent, qu'elle frappe brusquement.

b. Principes présidant à l'acte que nous venons de décrire, et conséquences mécaniques qui en dérivent, dans l'état actuel de la science.

La question qui se présente maintenant est celle-ci : le premier de ces temps étant accompli, les ailes portées en haut, et plus ou moins en avant, comment un abaissement plus ou moins rapide de ces surfaces, s'abattant sur l'air sous-jacent, plus ou moins d'avant en arrière, détermine-t-il, à la fois, l'*élévation* et la *propulsion* de l'oiseau ?

Ce problème est résolu depuis longtemps d'une manière, en apparence au moins, satisfaisante.

La physiologie moderne, précisant les idées formulées il y a plus de deux siècles par Borelli, reconnaît, dans la succession des battements des ailes, l'origine d'une suite de *bonds*, les uns très peu sensibles, les autres plus ou moins étendus, de l'oiseau sur l'air. Ces bonds, analogues au *saut*, et répondant au même mécanisme que lui, sont produits par la réaction soudaine et élastique de l'air, refoulé par l'aile, à la suite de l'arrêt subit du mouvement d'abaissement, c'est-à-dire de la *percussion*, du *battement* qui le termine.

Le système entier de l'animal, rendu instantanément rigide et solidaire par le conflit subit des releveurs avec les abaisseurs de l'aile arrêtés dans leur mouvement, est alors repoussé de *bas en haut* et *d'arrière en avant*, par la réaction de l'air refoulé, et par une impulsion une fois reçue, comme l'est un animal sauteur, et suivant les lois de la balistique (*Principes de mécanique animale*, Giraud-Teulon, 1858).

Nous disons de *bas en haut* et *d'arrière en avant*, parce que, dans la généralité des cas, surtout si le vol est vigoureux et rapide, le coup d'aile est dirigé de haut en bas, et plus ou moins *d'avant en arrière*; et que, dans les circonstances mêmes où il serait, en apparence, très rapproché de la verticalité, l'inclinaison de *bas en haut* et *d'avant en arrière* du plan inférieur de l'aile, due à la différence de la flexibilité de son bord ou tranchant antérieur et de celui formé par les barbes des plumes, introduit dans la résultante du mouvement une composante horizontale, *d'arrière en avant*.

Ce mécanisme, généralement admis par la physiologie moderne, n'est point accepté au Collège de France. Il nous sera permis d'exposer et de discuter la conception nouvelle qu'on propose de lui substituer.

II

a. Considérations générales préliminaires relatives au rôle rempli dans le vol par l'appareil musculaire de l'oiseau.

Les recherches nouvelles de M. le professeur Marey sur le mécanisme de la locomotion de l'oiseau dans l'air s'ouvrent par

une série de questions qui, par leurs énoncés, semblent envisager toutes les faces de ce vaste et important problème. L'auteur annonce, en effet, qu'il va s'occuper successivement :

1° De la conformation de l'oiseau, dans ses relations avec le vol, embrassant la structure de l'aile, ses courbures, son appareil musculaire ;

2° De la force musculaire de l'oiseau, de la rapidité de la contraction de ses muscles ;

3° De la forme de l'oiseau, de sa stabilité; des conditions favorables qu'il présente au planement ;

4° Enfin des rapports de la surface des ailes au poids du corps chez les oiseaux de différentes tailles.

Toutes questions qui, prenant pour texte quelqu'un des principaux attributs de l'appareil moteur, doivent nous faire entrevoir, comme terme de cette étude de détail, un tableau complet et nouveau des rapports de cet appareil avec l'acte complexe qu'il doit réaliser : l'élévation, le soutien et la translation de l'animal dans l'air. Une première remarque cependant ne laisse pas de nous causer quelque appréhension : l'auteur se montre très concis, en ce qui concerne l'analyse descriptive de l'appareil, au point de vue anatomo-physiologique.

L'exposé très bref qu'il en fait n'est qu'un résumé succinct de ce que renferment tous les traités d'anatomie comparée. Ce n'est donc pas par la discussion directe des rapports des leviers osseux avec les puissances (muscles) qui leur sont appliquées, que l'auteur cherchera à pénétrer dans la mécanique du vol ; il nous le déclare à l'avance : « Ne demandons, nous dit-il, à l'anatomie des organes du vol que ce qu'elle peut fournir, c'est-à-dire la prévision des forces que l'oiseau peut développer et du sens dans lequel elles sont dirigées » (p. 220).

Ainsi donc M. Marey n'envisagera l'appareil musculaire qu'au point de vue de son degré d'énergie et de la rapidité de son action, et nullement sous celui du *mode* et du *sens* de cette action. Ce qui nous a surpris. Se proposant, comme il l'annonce, de construire un automate volant, sur le modèle de l'oiseau, sa pensée dominante nous paraissait devoir être de mettre préalablement en lumière le genre d'action à imiter dans l'instrumentation rêvée.

Nous glisserons rapidement sur cette partie du travail de M. Marey, dont aucune des conclusions ne se rapporte bien directement à l'objet même qu'il semblait s'être proposé, à savoir le mécanisme intime de cet acte si curieux de la locomotion de l'oiseau.

Toutes les considérations que suggèrent à l'auteur les diverses expériences dont nous venons de donner les titres, pour rationnelles qu'elles soient, chacun a pu, et depuis longtemps, les enfanter sans effort. Ajoutons que le caractère de généralité et le vague de leurs conclusions permettant de les appliquer à tous les modes d'action que l'on puisse imaginer réalisés par ces puissants moteurs, elles ne nous conduisent, en définitive, à rien de particulier, relativement à l'espèce et au genre de ces mécanismes, ou qui nous mette sur la voie pour les découvrir.

C'est seulement dans la seconde partie de ce chapitre que l'auteur ouvre un premier aperçu sur la façon dont il se représente le *modus instrumentalis* du vol. Et ce mode mécanique, auquel M. Marey va soumettre tous les phénomènes de la locomotion aérienne de l'oiseau, c'est tout simplement le principe auquel est dû le mouvement du *cerf-volant*.

L'auteur, à l'appui de cette idée, appelle en témoignage les exemples suivants :

- 1^e Le vol dit à voile;
- 2^e L'analyse de la descente de l'oiseau d'un lieu élevé;
- 3^e Une forme particulière du vol de certains rapaces, connue en fauconnerie sous le nom de la *Ressource*;
- 4^e Enfin les divers modes ou formes de planement.

Or tous ces exemples sont entièrement classiques, ainsi que les analyses auxquelles ils ont donné lieu, et sur lesquelles il n'y a point de dissensitments. M. Marey n'y ajoute rien, si ce n'est peut-être une disposition, mal justifiée, à en voir jaillir la solution même du problème du vol.

Mais les mécanismes auxquels obéissent ces divers actes sont seulement ceux qui règlent la descente, ou modèrent la chute d'un lieu élevé, et se résolvent, en définitive, dans le simple rôle de parachutes.

Celui de la *Ressource* demande à la pesanteur elle-même les

éléments d'une remontée *partielle*, seulement partielle. Aucun d'eux ne saurait donc jeter le moindre jour sur la dynamique de la montée première ou initiale, l'unique problème à résoudre, et que ces formes de vol supposent déjà accomplis.

Dans toute cette étude, un seul cas se rattache à ce fait, plus digne que tout autre de la qualification de capital, de la montée, de l'élévation première. On le rencontre dans l'analyse du planement ascendant, faisant suite au planement horizontal, ou plutôt descendant, dans les circonstances où l'oiseau est porté plus haut que l'origine de la descente. Alors, à l'énergie ascensionnelle due à la force vive créée pendant la descente par la force accélératrice de la pesanteur, se joint nécessairement une seconde force, agissant de bas en haut, « celle produite, dit avec raison M. Marey, par les coups d'aile précédents ».

Ce sera là le nœud de la question, là seulement commencera la véritable étude. Nous allons y pénétrer à la suite de l'auteur.

III

a. Des mouvements de l'aile de l'oiseau pendant le vol. Recherches nouvelles de M. Marey.

Détermination expérimentale de la trajectoire de l'aile. — « On a vu, dit M. Marey, à propos du mécanisme du vol chez l'insecte, que l'expérience fondamentale a été celle qui a révélé le parcours de la pointe de l'aile à chacune de ses révolutions. La connaissance du mécanisme du vol découlait, pour ainsi dire, naturellement de cette première notion.

« Pour le vol de l'oiseau, la même détermination est également nécessaire » (*Machine animale*, p. 244).

Nous aurons plus loin l'occasion de montrer le peu de fondement, en mécanique, d'une telle assimilation : nous nous bornerons, pour le moment, à signaler les éclatantes différences que présentent, dans ces deux embranchements si distincts, au point de vue anatomique, les organes appelés à réaliser la fonction du vol. D'une part, chez l'insecte, une simple lamelle plate, terminée en palette, portée et mise en mouvement par

un axe-levier rectiligne unique; de l'autre, un système articulé, formé de trois leviers mobiles, indépendants, et dont chacun, obéissant à des actions séparées, roule sur l'extrémité du précédent.

Les ressemblances dans les actes ne sont pas beaucoup plus saisissantes : « D'après M. Marey, les mouvements propres de l'aile de l'insecte ne consistent qu'en abaissements et élévations suivant la verticale : ils sont aisément expliqués par le système musculaire. »

Quant aux variations d'inclinaison de leurs plans dont M. Marey fait dépendre les mouvements constitutifs du vol, l'auteur les attribue exclusivement à la résistance de l'air. Or en analysant dans ses détails le mécanisme conçu à cet effet par notre collègue, si nous y découvrons effectivement la possibilité de lui voir produire un mouvement *en avant* de l'animal, il nous est, par contre, absolument interdit d'y apercevoir l'ombre d'un élément *élévateur*.

C'est cependant ce même mécanisme que nous allons voir M. Marey étendre et appliquer à la production du vol de l'oiseau; et nous nous demandons avec étonnement comment une action aussi simple que celle attribuée à l'oscillation de haut en bas de la rame ou palette rectiligne de l'insecte exige, chez l'oiseau, l'intervention d'appareils relativement aussi complexes.

Mais n'anticipons pas et suivons l'auteur dans sa marche.

Le lecteur trouvera, de la page 245 à la page 252, la description des appareils imaginés et mis en usage pour la détermination de la trajectoire qui va, chez l'oiseau comme chez l'insecte, révéler tous les mystères du vol.

Avant de nous expliquer sur leur mérite ou sur l'appropriation des méthodes employées, nous courrons tout de suite aux conclusions; leur analyse rendra notre tâche plus facile et notre jugement plus assuré.

Les voici telles que les formule M. Marey :

« Dans le cours d'une révolution de l'aile, l'extrémité mobile de l'organe décrit une trajectoire elliptique dont le *grand axe* est dirigé de *haut en bas* et d'*arrière en avant* » (p. 267).

Et l'auteur ajoute :

« L'importance de cette détermination est tellement grande,

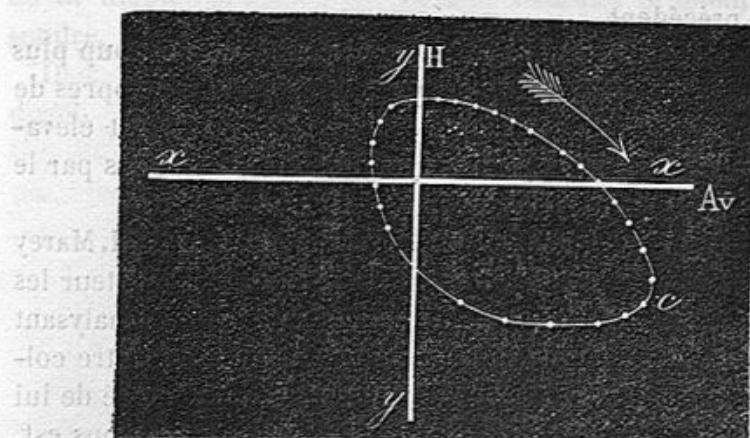


Fig. 107 de la *Machine animale* de M. Marey.

qu'elle fait pardonner les longs et fastidieux détails qui l'ont fournie. »

b. Analyse et discussion de cette trajectoire.

M. Marey s'arrête, avec une satisfaction peu dissimulée, sur ce résultat, tout en constatant qu'il est directement en contradiction avec toutes les observations connues, y compris les siennes propres.

Quelques lignes plus loin (p. 245) et en plus d'un passage, il dit, en effet, et répète :

« L'action de l'aile, pendant le vol, ne consiste pas seulement en élévarions et abaissements alternatifs ; il suffit de regarder un oiseau qui passe, en volant, au-dessus de nos têtes, pour constater que l'aile se porte aussi *d'avant en arrière* à chaque battement. »

Comment une si éclatante opposition entre les données physiologiques et les documents autographiques a-t-elle échappé à notre collègue ? C'est ce que nous n'essayerons pas de déterminer à priori. Ce que l'on peut conclure seulement d'un tel empressement à enregistrer cette donnée nouvelle, c'est que

l'observation physiologique n'occupe pas une grande place dans les préoccupations de l'auteur.

L'anatomie lui tient-elle plus à cœur? Nous avons quelques raisons d'en douter. Voici, par exemple, ce qu'elle nous apprend en ce qui concerne les rapports articulaires des organes en jeu dans cet acte :

L'articulation de l'aile à l'épaule, centre du mouvement de l'organe, appartient à la classe des condylarthroses (Cruveilhier).

Les mouvements cardinaux qu'elle permet sont de deux espèces et consistent :

1^o En un mouvement d'élévation et de retour (abaissement) directs, dans un plan vertical voisin du parallélisme à l'axe du corps; mouvements très étendus *en haut* et *d'arrière en avant*, mais très nettement limités *en bas et en avant*, et avant même d'arriver à la verticale, par un emboîtement réciproque de la tête articulaire et de sa cavité;

2^o En un deuxième mouvement cardinal d'abduction et d'adduction, dans un plan perpendiculaire au précédent. Enfin ces deux mouvements en charnière permettent, entre leurs directions cardinales prises comme limites, tous les degrés de circumduction de l'humérus, circumduction bornée, par conséquent, et qui se trouverait comprise dans une surface enveloppante, ayant pour section droite une sorte d'ellipse à *grand axe dirigé de haut en bas et d'avant en arrière*.

Une condition anatomique aussi peu sujette au caprice eût dû frapper notre collègue.

L'ellipse en question, qui doit contenir celle de la trajectoire, est tout juste l'inverse de la courbe relevée par M. Marey. On s'en ferait une idée assez rapprochée en regardant l'épure de cette dernière à l'envers.

L'anatomie, en cette rencontre, prend donc parti pour la physiologie commune, en désaccord en cela avec les relevés graphiques de notre honré collègue.

c. La trajectoire de l'aile ne saurait être une courbe continue.
Mais pour sérieux que soit ce choc entre les expériences de

l'auteur et l'observation commune, nous avons encore d'autres conflits, non moins graves, à signaler entre elles.

Et nous demanderons d'abord à notre collègue comment il concilie le caractère de continuité de sa trajectoire de l'aile, l'absence de toute inflexion ou de point de rebroussement dans son périmètre, avec le genre du mouvement observé.

Nous avons signalé, au début de ce travail, le caractère nettement interrompu dans sa continuité, du mouvement alternant d'élévation et d'abaissement de l'aile, dans le vol. Ce mouvement se compose de deux temps parfaitement distincts, dont

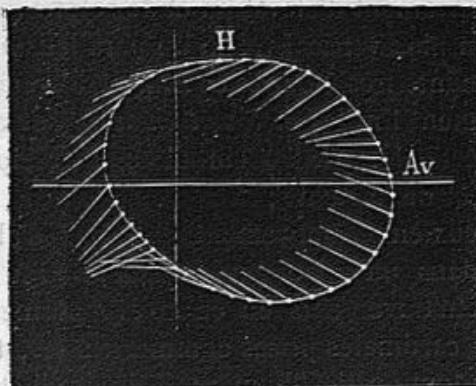


FIG. 111 de la *Machine animale* de M. Marey
(complément de la figure 107).

l'un sert de limite à l'autre. Et, si le passage de l'élévation à l'abaissement peut demeurer inaperçu de l'œil et de l'oreille, il n'en va assurément pas de même de l'autre limite.

En ce point, le plus bas, l'aile *bat*, frappe l'air ; le changement de direction est objectivement souligné par un bruit sec, une saccade ; il est le type des actes instantanés.

En ce point donc, tout au moins l'épure devrait présenter une inflexion brusque, en rapport avec un changement de direction qui ne mesure pas moins de 180 degrés, un retour de l'aile sur ses pas. Or qu'y voyons-nous ? La courbe, dans sa région inférieure, celle qui correspond à cette transformation instantanée du mouvement, présente une longue portion continue, une tangente horizontale, comprenant une longue série

d'éléments, et cela quand la nature des choses y impose un point de rebroussement des plus accentués!

Nous pouvons l'avancer sans crainte : l'appareil enregistreur qui n'enregistre pas cette circonstance capitale, bien plus, qui inscrit le fait contraire, mérite assurément une réprimande; la trajectoire dont il fournit les éléments n'a rien de commun avec le battement de l'aile.

Mais nous n'en avons pas fini avec les étonnements que provoque, dans tous ses aspects, cette courbe singulière; et elle n'est pas moins difficile à défendre au seul point de vue de la dynamique.

C'est par les propriétés de ce graphique que M. Marey justifie sa théorie du vol suivant le mécanisme des plans inclinés ou du cerf-volant. C'est elle qui doit, par conséquent, représenter aux yeux la proposition dans laquelle notre collègue résume son mécanisme :

« Le plan de l'aile, en s'abaissant, décompose, par son obliquité, la résistance de l'air et, tout en soulevant le corps de l'oiseau, le propulse en avant. »

Si nous nous reportons alors aux courbes 107 et 111 qui ont fourni à M. Marey ces résultats, nous trouvons en effet que, lors de sa descente, l'aile commencerait tout d'abord à être portée directement *en avant*, puis *en bas* et *en avant*, jusqu'au point le plus déclive de son parcours, résultat absolument opposé à ce que nous indique, comme à l'auteur, l'observation pure et simple du fait qui nous montre l'aile se dirigeant *en bas* et *en arrière*. Ces deux circonstances ne pourraient coexister qu'en admettant que la réaction fût supérieure à l'action, ce que nous ne supposons pas être accepté par l'auteur.

Eliminons donc, avec lui, le témoignage de nos yeux et acceptons, pour un moment, comme correct le graphique apporté par M. Marey à l'appui de ses idées sur le mécanisme en question.

La réaction de l'air pousse donc l'aile *en avant*.

Or, si nous considérons l'épure, nous constatons que cette supériorité de la réaction de l'air sur l'action de l'aile se manifeste dès le premier instant du mouvement, par conséquent

longtemps avant que le fluide ait eu le temps d'acquérir le moindre ressort : circonstance évidemment en contradiction avec la loi de croissance de la pression proportionnellement avec le carré de la vitesse.

Enfin ! dans ce conflit entre deux corps de masses si disproportionnées, le déplacement observé se montrerait en grand excès du côté de la masse de beaucoup la plus considérable !

Voilà qui est fait pour donner à réfléchir.

Passons maintenant au déplacement en *hauteur*; car l'auteur nous dit bien que, dans son mécanisme, l'oiseau est tout à la fois soulevé et propulsé en avant.

Nous nous retournons vers l'épure, et y cherchons la force élévatrice, la composante verticale du mouvement. Vaine tentative ! De cette réaction dans le sens vertical, nous ne trouvons nulle trace.

D'où vient ce singulier partage d'une résultante simple, unique, qui doit affecter une direction oblique à l'horizon ?

Des deux composantes qui doivent nécessairement la former, l'épure n'en révèle qu'une, celle du mouvement horizontal ! Qu'est donc devenue la composante élévatrice ?

Ce qu'elle est devenue dans le mécanisme du vol de l'insecte ; elle n'existe pas.

La pesanteur serait-elle donc, dans le vol, une quantité négligeable, pour que le physiologiste en tienne aussi peu de compte ?

Nous ne sommes pas les premiers, paraît-il, à témoigner de quelque scepticisme à l'endroit de ces relevés, dits expérimentaux.

Nous rencontrons, en effet, dans la dernière publication de M. Marey (*Supplément à la méthode graphique*, p. 27), la remarque mélancolique que voici :

« Cette inscription (fig. 107), péniblement obtenue, au moyen d'instruments compliqués et délicats, ne paraît pas avoir inspiré beaucoup de confiance à ceux qui s'occupent de l'étude du vol. »

N'y a-t-il donc, pour expliquer la défiance à l'endroit de ces données expérimentales, que des considérations tirées de leur délicatesse et de leur complexité ?

Si l'on jette un coup d'œil d'ensemble sur l'exposition qu'en donne M. Marey, on pourrait bien être amené à y reconnaître, en outre, plus d'une anomalie soit physiologique, soit d'interprétation.

Voici le principe sur lequel elles sont établies : nous laisserons parler M. Marey :

« La comparaison des mouvements de l'oiseau avec ceux d'un schéma n'exige pas, nous dit-il, que ces mouvements s'effectuent dans les conditions du vol libre. Pourvu que l'oiseau, même entravé dans ses mouvements, batte des ailes avec l'intention de voler, nous pouvons étudier les actes musculaires avec leurs caractères de force, d'étendue et de durée. Un oiseau qu'on aurait suspendu à un fil, et qui baltrait des ailes, pourrait, par exemple, être comparé à un appareil artificiel, suspendu de la même façon. »

Contre un pareil plan d'expériences, les objections affluent d'elles-mêmes. Comment ! l'oiseau suspendu à un fil, et battant des ailes, vous représente l'oiseau libre ? Mais alors pour quoi comptez-vous la pesanteur ? Et comment une disposition expérimentale, qui décharge l'oiseau du principal obstacle qu'il ait à vaincre, va-t-elle nous renseigner sur le mécanisme par lequel l'oiseau en liberté triomphe de cet obstacle, véritablement capital !

Il y a même apparence que cette circonstance n'est pas étrangère à l'absence, dans l'épure, de toute composante verticale.

Mais si, d'une part, l'oiseau en expérience se trouve sous l'un des aspects de la question, débarrassé de son poids, si on l'envisage sous d'autres rapports, on peut, au contraire, le soupçonner d'être, en d'autres moments, plus ou moins écrasé par un excès de charge. Car il n'est pas, dans le fait, simplement suspendu à un fil. Attelé au centre d'un cercle métallique, de forme elliptique, et doué d'élasticité, il ne peut s'élever ni s'abaisser, sans éprouver une résistance verticale, dans le sens où il veut se porter. Et, en cet état, il doit, en outre, tirer sur l'extrémité d'un long bras de levier ou treuil horizontal.

Or qui vous assure qu'au milieu de telles entraves, quoi-

que invité à travailler *horizontalement*, l'oiseau ne fera pas des efforts pour fuir dans une direction oblique, ou même verticale?

M. Marey nous dit bien : « Il suffit que l'oiseau ait l'intention de voler, pour qu'on puisse comparer ses actes à ceux du vol libre. »

Mais vous n'avez pas reçu à cet endroit ses confidences, et il n'y a qu'une chose de certaine ici, c'est que l'oiseau emprisonné, à la gêne, doit vouloir s'échapper, se soustraire à la pression qu'il éprouve de la part de son corset; et la direction qu'il donnera à ses essais de fuite dépendra du sens de la pression la plus pénible pour lui. Car il ne suffit pas qu'il soit attelé à un levier horizontal pour qu'il éprouve le besoin de partir dans cette direction. Il n'est assurément pas dans ses habitudes de tirer des fardeaux, et sa disposition la plus probable, si nous nous en rapportons à notre propre expérience, serait plutôt l'affolement.

Nous sommes donc tout à fait en droit de supposer que l'animal, dans ces expériences qui sont instituées pour l'étude du vol horizontal, se trouve beaucoup plutôt redressé qu'étendu horizontalement.

Mais nous n'avons pas besoin de conjectures. L'observation, le fait concourent ici avec l'induction. Si, en effet, nous considérons la donnée apportée par les graphiques, et qui montre les pennes portées *en avant*, au moment du plus grand abaissement, nous pouvons affirmer que, loin d'affecter la direction horizontale, l'oiseau a le tronc redressé, qu'il est dans l'attitude du vol *en hauteur*. Nous renvoyons M. Marey à ses propres épreuves photographiques, aux planches 13 et 19 du *Supplément à la méthode graphique*.

Nous rappellerons, à ce propos, le fait anatomique signalé plus haut, et tiré des rapports mutuels des surfaces articulaires. Lors de l'abaissement de l'aile, l'emboîtement réciproque de ces surfaces arrête entièrement la descente de l'*humérus*, avant que l'axe de cet os n'ait atteint, d'arrière *en avant*, le plan perpendiculaire à l'axe du corps mené par le centre de mouvement.

Pour que l'extrémité mobile de l'*humérus* passe *en avant* de

cette verticale, il est donc nécessaire que le tronc qui le porte se soit lui-même rapproché de cette ligne. Au moment où a été relevé le graphique, l'oiseau devait donc être dans la position représentée par les images photographiques les plus inférieures de la planche 19 du *Supplément à la méthode graphique*.

Une autre circonstance joue sans doute un rôle dans cette incorrection de l'expérience ou de l'interprétation du graphique. Dans la construction même de l'épure, le zéro de la graduation repose sur une donnée fautive.

L'origine des coordonnées a été fixée en contradiction avec la donnée anatomique, rappelée ci-dessus, et relative à l'emboîtement réciproque des surfaces articulaires, en contradiction, également, avec la direction de l'humérus, dans ses rapports avec l'axe du corps de l'animal.

Ainsi chez le pigeon, animal choisi par M. Marey pour ses expériences, la main et les rémiges qui la continuent font, avec la direction de l'humérus, et lors de leur plus grande extension relative, un angle ouvert *en avant*, et qui s'élève à plus de 25 degrés.

IV

Conséquences théoriques déduites par M. Marey des expériences qui précédent ; sa théorie du vol.

« D'après toutes nos expériences, dit en se résumant M. Marey, c'est pendant la descente de l'aile que se crée tout entière la force motrice qui soutient et dirige l'oiseau dans l'espace. »

Cette opinion est celle de tous les observateurs, ainsi que de tous les physiologistes. Mais chez ces derniers la raison de cette affirmation est tout anatomique : dans l'élévation, l'aile est dirigée par son releveur, de façon à développer le moins possible de résistance de la part de l'air ; cette résistance devant logiquement, dans ce sens, s'ajouter à l'action de la pesanteur. Dès lors toute l'action efficace est à chercher dans le mouvement opposé.

Pour M. Marey, les raisons de cette différence sont de tout autre nature :

« Pas plus pour l'oiseau que pour l'insecte, nous dit notre collègue, l'appareil musculaire ne rend compte du parcours de l'aile » (p. 274).

Le releveur de l'aile, ou petit pectoral, n'a, suivant lui, rien à faire dans ce résultat; cette ascension serait exclusivement due à la vitesse acquise pendant la descente. Voici ses propres paroles :

« Pour expliquer l'ascension de l'oiseau pendant ce temps de l'élévation de l'aile, il nous semble indispensable de faire intervenir l'effet de *cerf-volant*, dont il a déjà été question.

» L'oiseau animé de vitesse présente ses ailes à l'air, sous forme de *plans inclinés*: il se produit alors [un effet analogue à celui des appareils planants, qui transforment *leur vitesse acquise en ascension*. »

... La vitesse acquise pendant la descente de l'aile! Mais, dans les conditions conçues par M. Marey, il n'y en a pas de vitesse acquise pendant la descente! Si dans sa théorie, l'aile descendante s'arrêtait subitement, oui, il y aurait lieu à un dégagement de force vive, cela est incontestable. Mais dans l'hypothèse où se place M. Marey, il ne saurait en être ainsi. Dans sa doctrine, l'aile ne s'arrête pas subitement, son mouvement expire de lui-même. M. Marey parle bien des deux mouvements alternatifs de l'aile, comme d'une révolution de l'organe. Mais l'aile n'accomplit pas une révolution continue; les deux mouvements successifs sont très distincts l'un de l'autre, et complets tous les deux. Ils commencent et finissent l'un et l'autre à zéro, ou par le *repos*, et dès lors tout le travail moteur a été absorbé par le travail résistant. Telle est la conséquence forcée de l'omission faite par M. Marey, en tant qu'élément mécanique, du *battement* comme terme subit de l'abaissement, rapproché de ce fait, constant pour tous, que *toute* la force motrice du vol est créée dans l'abaissement.

b. Maintenant, étant admis que toute la force génératrice du mouvement de l'oiseau est produite uniquement dans la phase de l'abaissement des ailes, comment M. Marey se représente-t-il le mode d'action de cette force? Voici ce qu'il nous dit à ce sujet :

« Le plan qui nous a guidé, dans l'étude du vol de l'insecte, devra également être suivi pour celle du vol de l'oiseau » (p. 218).

Nous nous sommes expliqués déjà sur la légitimité de cette assimilation de l'aile chez l'oiseau et chez l'insecte. Nous n'y reviendrons pas. Si le mécanisme duquel M. Marey fait dépendre le vol de l'insecte devait s'appliquer à l'oiseau, il pourrait sans doute, pour ce dernier comme pour le premier, rendre plus ou moins compte du mouvement de translation horizontale, c'est-à-dire produire une composante horizontale plus ou moins efficace. Mais, dans l'un comme dans l'autre cas, il est absolument impuissant à engendrer une composante verticale, c'est-à-dire à soulever ou même à soutenir l'animal contre l'action de la pesanteur.

Ce qu'il va nous être facile d'établir.

Reprendons dans ses principes l'analyse du mécanisme du vol suivant M. Marey :

Qu'il s'agisse de l'insecte, qu'il s'agisse de l'oiseau, tout l'effet à attendre est produit par l'action de pression de l'aile sur l'air et la réaction de celui-ci (Théorie du plan incliné et du cerf-volant).

Et ces actions sont, avons-nous fait remarquer déjà, et à saliété, des actes d'un caractère absolument continu. Nul choc, nul arrêt brusque n'y interviennent, de leur début à la cessation de leur activité.

L'abaissement de l'aile, dans l'esprit de M. Marey (voyez les trajectoires), est un acte de même nature.

N'étant pas, dans cette doctrine, brusquement suspendu par un arrêt subit, et d'autre part constituant un mouvement complet, *il commence et finit par le repos*; sa vitesse terminale est nulle; $V=0$. Tout le travail moteur a été consommé par le travail résistant (dans lequel il faut compter le déplacement éprouvé par l'oiseau). Celui-ci demeure alors au repos, attendant les effets de la révolution prochaine de l'aile.

Mais cette attente *dans le repos* n'est pas l'attente dans l'immobilité. Pendant la phase ascensionnelle qui va suivre, comme pendant la période de l'abaissement précédent, la pesanteur n'a pas fait abandon de ses droits. Et nous voyons, dans la

note ci-dessous (1), quels peuvent être numériquement les

(1) Les conditions dynamiques présentées par le battement d'ailes qui ne battent pas, mais glissent ou s'appuient sur l'air, sont exactement celles qu'offrent deux rames appliquées à un bateau, si l'on suppose également chez celles-ci que le mouvement s'éteigne sans brusquerie, qu'il expire sans choc. Le bateau s'arrête alors en même temps que les rames; il représente le travail résistant, comme elles le travail moteur. Tout finit à zéro, simultanément. Il importe ici de ne pas confondre ce cas avec celui où une impulsion vive de la rame, brusquement suspendue, marque la fin soudaine d'une action, d'abord continue. Là il y a arrêt soudain, à-coup, dégagement de force vive, et le bateau continue un certain temps sa marche, en vertu de cette seule impulsion.

Transportons maintenant ces actes dans le milieu aérien.

Imaginons l'oiseau suspendu, comme le bateau sur l'eau, c'est-à-dire sous-trait, par hypothèse, à la loi de la pesanteur. Supposons alors que les ailes exécutent un battement qui appuie sur l'air et ne le frappe pas — le mouvement de M. Marey; — à la fin de l'abaissement, l'oiseau et l'air refoulé par l'aile se seront déplacés en sens contraire et dans le rapport inverse de leurs masses respectives; et ce rapport n'est pas beaucoup moindre que celui de 700 à l'unité.

Un litre d'air pèse..... 1^{er}, 30
Un litre d'eau..... 1000 grammes.

Il est aisé d'ailleurs de le calculer. L'aile du pigeon (l'animal qui a servi aux expériences de M. Marey) bat moyennement, nous dit notre collègue, huit fois par seconde (*Supplément à la méthode graphique*, p. 28). Partons de là. Supposons que cette aile développée atteigne une longueur totale de 30 centimètres. Admettons, en outre, que le point d'application de la résultante des pressions réciproques de l'aile et de l'organe, situé vers le milieu du triangle alaire, parcoure dans sa descente une hauteur de 20 centimètres (ce sont là des suppositions arbitraires, sans doute, mais moyennes), cette distance mesurera approximativement le refoulement moyen des couches d'air pendant l'abaissement.

D'après la loi d'un rapport inverse aux masses, le déplacement connexe et en sens opposé, c'est-à-dire de bas en haut, du centre de gravité de l'oiseau, sera environ 700 fois moindre, ou $\frac{m. 20}{700}$, soit trois dixièmes de millimètre!

Par huitième de seconde, dans l'hypothèse de la soustraction de l'action de la gravité, l'oiseau sera donc soulevé, porté de bas en haut, de trois dixièmes de millimètre, la période ascensionnelle de l'aile ne devant figurer ici que pour mémoire.

Supposons maintenant que ledit mouvement soit exécuté dans les conditions

effets de cette force pendant le *huitième de seconde* auquel M. Marey évalue, en moyenne, la durée d'une révolution de l'aile (?).

Pendant l'abaissement, le soulèvement de l'oiseau a été de trois dixièmes de millimètre, mettons (pour nous garantir de toute possibilité d'erreur), mettons un millimètre entier, soulèvement plus que compensé par une chute isochrone soixantequinze fois plus considérable ($0^m,076$), action de la pesanteur pendant ce même huitième de seconde.

d. Signification du coup d'aile.

Tel est donc l'unique effet à attendre du mouvement d'abaissement de l'aile, si l'on suppose qu'elle obéisse au mécanisme du cerf-volant ou des plans inclinés, à savoir :

L'irrémissible entraînement de l'oiseau suivant la loi de la chute des graves.

Dans notre étude sur la course et le saut, nous avions déjà démontré l'impossibilité d'une séparation complète de l'animal et du sol, pour courte qu'elle fût, sans l'intervention d'un effet de balistique, c'est-à-dire d'un dégagement de force vive et de sa transformation instantanée en quantité de mouvement imprimée, une fois pour toutes, au mobile.

L'exemple qui fait l'objet de cette dissertation, en élargissant l'étendue de nos premières remarques, met en plus grande évidence encore la nécessité de cette transformation instantanée. Il permet même de pénétrer plus avant dans la raison d'être de ce mécanisme spécial.

naturelles ; rendons à la pesanteur ses droits. De combien, pendant ce huitième de seconde, l'oiseau sera-t-il déprimé ?

Le calcul en est simple : si, pendant une première seconde, la gravité doit faire parcourir au corps pesant 5 mètres de chute ($4^m,90$), les espaces parcourus sous l'influence de la gravité étant proportionnels aux carrés des temps, l'oiseau devra, dans un huitième de seconde, descendre de $\frac{5}{64}$, soit $0^m,078$.

Ainsi donc, 7 centimètres et demi de chute pour moins d'un demi-millimètre de soulèvement ! L'énormité relative de ces chiffres dispense de discuter l'exactitude absolue des moyennes sommaires que nous avons adoptées.

Reportons-nous au caractère différentiel si remarquable qui distingue les mouvements accélérés continus des mouvements brusquement suspendus : « Dans une machine en mouvement, tant que le mouvement s'accélère, une partie seulement de la puissance fait équilibre aux résistances, et l'autre partie augmente la vitesse de la machine. Le travail moteur dû à la puissance tout entière surpassé donc le travail résistant total de tout le travail que produit la seconde partie de la puissance. » (Delaunay, § 134.)

Il suit de là que si l'on arrête brusquement une machine lors du maximum de sa vitesse, toute cette seconde partie de la puissance formant l'excès du travail moteur sur le travail résistant total devenu disponible, la *force vive*, peut être utilisée, comme quantité de mouvement, ou force nouvelle.

Or cette force nouvelle entre en jeu sans nulle perte de temps, et cette propriété se trouve remplir ici une nécessité de premier ordre. N'oublions pas qu'entre un abaissement de l'aile et le suivant existe une lacune dans la production de la force motrice, lacune créée par la phase ascensionnelle, laquelle laisse, pendant son accomplissement, le mobile sans défense contre la gravité.

Cette intermittence d'action motrice se montre ici sans voile; mais le mécanisme, quel qu'il fût, la devait renfermer en lui. Nulle force biologique, on le sait, ne saurait déployer un effort continu : l'un des caractères de toute force animée est l'intermittence.

Il y avait donc, pour la nature, obligation de parer, à l'avance, à cette intermittence ; et on a pu, dans la note précédente, en apprécier numériquement la portée considérable. Aussi l'interruption subite du mouvement accéléré, au moment de sa plus grande vitesse, n'a pas seulement pour résultat de tirer des agents moteurs le plus grand effet utile qu'il soit possible, mais, en outre, de le dégager à un moment si précis, que nul vide ne se peut produire par où la pesanteur se trouve seule en activité.

Que notre collègue n'ait point reconnu cette loi physiologique, nous ne pouvons nous en étonner, l'ayant vu la repousser dans le mécanisme du saut, où elle est moins enveloppée.

Mais qu'il ait fait aussi délibérément, dans l'observation, omission du phénomène, si sensible, du battement, de la percussion, du choc de l'air, l'essence même du coup d'aile, voilà qui est fait pour surprendre.

Nous ne doutons pas que ces mots : coup, percussion, choc, battement n'aient, grammaticalement, le même sens pour M. Marey et pour nous-même, quand nous parlons l'un et l'autre la langue de M. Jourdain, quand nous faisons de la dynamique sans le savoir. Il y a des mots dans toutes les langues qui portent avec eux leur définition. Frapper et pousser; coup et pression ne seront jamais confondus, dans quelque dialecte que ce soit; pas plus que les mots jouissance et douleur, plaisir ou peine. Mais en est-il de même dans la discussion doctrinale soulevée dans l'espèce?

Il suffit de parcourir la monographie tout entière dont nous donnons ici la substance; il suffit de considérer les trajectoires auxquelles s'est arrêté M. Marey, pour en rapporter la certitude qu'en aucun point de ce travail, ces termes, sous sa plume ou dans ses graphiques, ne représentent l'idée ou le simple indice d'un choc, d'une détente, de l'arrêt subit d'un mouvement en plein cours d'exécution. Le *coup d'aile*, en tant que *coup*, n'a point de place dans la doctrine de M. Marey. Or ce n'est ni une idée, ni une conception théorique, ni une simple vue de l'esprit, cette notion du battement. C'est un fait d'observation, aussi familier à l'œil et à l'oreille de l'enfant que de l'expérimentateur le plus consommé. Comment ne pas reconnaître le *saut* le plus manifeste dans les allures de ces innombrables passereaux, que nous rencontrons chaque jour, et dont le vol se compose de longs bonds paraboliques, au moyen desquels ils dévorent si rapidement l'espace? La dernière publication photographique de M. Marey en donne, en tête de sa planche 13, un saisissant exemple avec cet exergue:

« Dans la figure 62, l'oiseau (une grive) tient ses ailes presque fermées et se lance comme un projectile jusqu'à un nouveau coup d'ailes. »

Comment notre collègue marie-t-il ce fait d'observation, constaté de sa main, avec la théorie du cerf-volant? Une explication sur ce point n'eût pas été de trop.

V

Attribution par M. Marey de l'idée mère de sa théorie à Borelli.

Au moment de clore son étude et de résumer sa doctrine, notre honoré collègue nous réservait un nouvel étonnement:

« C'est dans Borelli, nous dit-il, qu'on trouve la première idée juste sur le mécanisme du vol de l'oiseau. L'aile, dit cet auteur, agit sur l'air comme un coin (p. 283, 284, *Machine animale*). »

» En développant la pensée du savant physiologiste de Naples, on dirait aujourd'hui que l'aile de l'oiseau agit sur l'air, à la façon d'un *plan incliné*, pour produire contre cette résistance une réaction qui pousse le corps de l'animal en *haut et en avant*.

» On nous a reproché, dit en terminant M. Marey, d'aboutir à une théorie dont l'origine remonte à plus de deux siècles; nous préférons de beaucoup une ancienne vérité à la plus neuve des erreurs; aussi nous permettra-t-on de rendre au génie de Borelli la justice qui lui est due, en ne réclamant pour nous que le mérite d'avoir fourni la démonstration expérimentale d'une vérité déjà soupçonnée. »

Nous ignorons quel est le critique visé dans cette justification. Pour nous, si nous avions, dans cet ordre d'idées, un reproche à articuler à l'adresse de M. Marey, ce ne serait assurément pas celui de trop approfondir les travaux de ses prédécesseurs. Mais nous sommes trop heureux de rencontrer enfin dans l'œuvre de notre collègue une proposition inattaquable, pour ne pas la saluer avec empressement au passage: « Une vérité ancienne, proclame-t-il avec une haute autorité, est de tous points préférable à la plus neuve des erreurs! »

L'élevation, sinon la nouveauté de cette pensée, nous interdit évidemment de la discuter; mais l'intérêt de cette même vérité nous autorise, croyons-nous, à en scruter l'application dans l'espèce.

Si par hasard nous allions y découvrir que l'emprunt fait, dans cette circonstance, au passé, par M. Marey, consiste, au

contraire, dans la substitution à une vérité, aujourd'hui acquise, d'une ancienne erreur justement oubliée !

Comment ! ce serait Borelli qui aurait fondé la théorie du vol, c'est-à-dire le mécanisme de l'*élévation* et du *transport* de l'oiseau dans les airs, sur une action de coin produite par des plans inclinés !

Si l'acte du vol ne consistait, comme le suppose implicitement notre collègue, que dans ce second mouvement, le transport horizontal de l'oiseau, nous ne saurions nier qu'en effet Borelli a cru pouvoir expliquer le vol par le mécanisme rappelé par M. Marey. Et nous ajouterons qu'en cela il a commis une *regrettable* méprise, que notre respect pour son génie nous fait *regretter* de voir mise au jour ; le reproche n'en sera pas pour nous. Mais si le principe essentiel du vol consiste, au contraire, dans l'*élévation* de l'oiseau, dans *sa victoire*, constamment renouvelée, sur la *pesanteur* ; si, en outre, ce triomphe repose mécaniquement, comme il est constant, sur l'effet du battement, de la percussion de l'air par l'aile, sur un mécanisme de la nature du *saut*, ce principe capital, mais, c'est tout justement celui même que nous devons au génie de Borelli. C'est un fait facile à vérifier, tout au long, dans la série des propositions 191-192-196-197-199 du traité *De motu animalium*.

Dans les deux premières de ces propositions se trouve même, très positivement appréciée, la distinction mécanique à établir entre un mouvement accéléré mais continu des ailes, et un mouvement subitement suspendu ; entre l'abaissement simple, et le battement proprement dit. Malheureusement, quand il s'est agi de la composante horizontale du mouvement, de la simple translation *d'arrière en avant*, l'illustre physiologiste a commis une grave erreur d'observation. Borelli considérait le coup d'ailes comme toujours directement perpendiculaire à l'horizon, dans le vol ordinaire, régulier, et ne se rendait alors clairement compte que de la production du mouvement *de bas en haut*, par le mécanisme du saut : *frequentibus saltibus*. Mais, en même temps, la composante horizontale lui échappait. Il crut la découvrir dans le refoulement *en dedans*, lors de l'abaissement de l'aile, des plumes *extrêmes*

de l'aile, plus flexibles, moins résistantes que les leviers solides qui les portent (1). De cette inclinaison relative résultait, dans sa pensée, une disposition en coin à *sommet postérieur* des deux ailes descendantes jouant un rôle de plans inclinés, propre à produire, sur le corps de l'animal, une impulsion horizontale *d'arrière en avant*.

Or ce point de vue est aussi contraire à l'observation qu'aux principes de la dynamique.

D'une part, en effet, il suffit de voir un oiseau voler, au-dessus ou au-devant de soi, pour reconnaître qu'en aucun instant de leur abaissement les extrémités mobiles des ailes ne se rapprochent l'une de l'autre de plus près que leurs attaches fixes au corps de l'animal. Et quant à la théorie, on comprendrait difficilement comment la marche en avant de l'oiseau pourrait être facilitée, et à fortiori *produite*, par une disposition qui donnerait au système mobile la forme d'un prisme s'avancant par sa base. Ce qui est vrai et admis par chacun, y compris M. Marey, c'est que par le fait de leur plus grande flexibilité, les plumes de la *base de l'aile* (et non pas les extrêmes) demeurent, lors de l'abaissement, retenues plus en haut, retardées dans leur marche par la résistance de l'air, et que la face inférieure de l'organe présente ainsi un plan incliné de *bas en haut et d'avant en arrière*. Une composante horizontale peut naître facilement de cette disposition. Ainsi donc, s'il est à regretter pour l'œuvre de Borelli qu'il ait commis, dans la détermination de la composante horizontale du transport de l'oiseau, une telle erreur d'observation et de principe, cette tache ne saurait lui enlever l'honneur de la découverte de l'origine et de la nature véritables de la force, qui élève et soutient l'oiseau dans les airs.

Or, en ce qui concerne cette dernière, elle ne figure en aucun endroit de la théorie de M. Marey. Son auteur nous dit bien que la réaction du plan incliné se traduit par une impul-

(1) Et ideo necesse est ut pennarum extremitates A et F (les pointes des ailes, les extrémités des rémiges) ad invicem approximentur : quâ propter alæ formam cunei acquirunt cujus acies tendit versus A, F. Tales autem cunei facies comprimentur utrinque à vento ascendentē. Ergo necesse est ut cuneus exprimatur, expellaturque versus basim ejus.

sion de l'animal *en haut* et en avant. Mais, dans sa trajectoire, la propulsion seule trouve place. Et quant à ce qui regarde Borelli, il lui prête, dans cette même association, un facteur que n'y fait point figurer le professeur de Naples : l'action de coin imaginée par lui, ne s'adressant qu'à la propulsion seule.

Mais il n'est pas moins regrettable que l'auteur de la *Machine animale* ait recueilli cette proposition erronée, et l'ait entourée de soins, comme une conquête précieuse pour ses propres doctrines. M. Marey, en effet, ne devait pas se faire illusion, relativement au fait d'observation sur lequel Borelli a bâti la théorie du coin qui fend l'air par sa base. Le savant professeur n'admet pas plus que nous que les ailes, lors de leur abaissement, se rapprochent, *en arrière*, par leurs extrémités. Il se donne même assez de peine, on l'a vu tout le long de cette discussion, pour établir qu'elles vont, au contraire, devant l'une de l'autre, *en avant*.

Par quel processus de logique l'honorable professeur a-t-il donc pu être conduit à faire d'une erreur de fait, évidente pour lui, la base d'une théorie ? Comment un représentant attitré de la méthode expérimentale peut-il donner pour fondement à une doctrine scientifique une prétendue observation de fait, plus inexacte encore pour lui que pour tout autre ?

Nous ne nous chargeons pas de l'expliquer.

VI

CONCLUSION

Si nous voulons nous résumer, nous sommes obligé de conclure que le mécanisme du vol de l'oiseau, ou du coup d'ailes, tel que le conçoit M. le professeur Marey, est aussi impuissant à l'élever qu'à soutenir l'animal dans les airs.

Comme, d'autre part, l'oiseau, reposant sur le sol, ne peut se procurer l'espace nécessaire au jeu de ses ailes, qu'après s'être élevé à quelque distance de terre, c'est-à-dire après avoir accompli un saut ordinaire sur ses pattes (*saltus communis*), et que notre honoré collègue n'a point fait connaître encore qu'il admit enfin, pour ce dernier acte, le mécanisme

de la détente ou de l'à-coup, il s'ensuit irrésistiblement que l'oiseau de M. Marey ne peut ni s'élever dans l'air, ni même quitter la terre.

Ce n'était pas là ce que nous faisait entrevoir le hardi professeur, en donnant essor, non pas à l'oiseau, mais à son essai sur le mécanisme de cet acte si curieux :

« La reproduction du mécanisme du vol, disait-il à sa dernière page, préoccupe aujourd'hui bien des chercheurs ; nous n'hésitons pas à avouer que ce qui nous a soutenu dans cette laborieuse analyse des différents actes du vol de l'oiseau, c'est le ferme espoir d'arriver à imiter, d'une manière de moins en moins imparfaite, ce type admirable de la locomotion aérienne.

» Dans nos essais, qui ont été interrompus pendant les deux dernières années (ceci était écrit en 1873), nous avions obtenu déjà quelques succès... Le problème de la locomotion aérienne, considéré naguère comme une utopie, est abordé aujourd'hui d'une manière vraiment scientifique.

» Le plan des expériences est tout tracé, etc., etc. »

Si ce plan déjà tracé est toujours celui conçu en 1873, et dont nous venons d'analyser les principes, si c'est celui des plans inclinés pressant l'air à la façon du cerf-volant ; si M. Marey n'y a point donné accès au mécanisme du saut et de la nataction, ce que nous force d'admettre son silence depuis notre communication du 15 janvier, le sort de l'automate construit sur ce plan n'est pas moins tracé dans la discussion qui précède.

L'auteur ayant négligé, comme nous venons de le reconnaître, de donner place, dans sa théorie, à nulle composante verticale propre à tenir en échec la pesanteur, le triomphe final et même immédiat de cette dernière est suffisamment assuré.

Lancé dans l'air d'un lieu élevé, l'oiseau artificiel de M. Marey ne pourra ni s'y soutenir, ni à plus forte raison s'y éléver ; il obéira à la loi de la chute des graves, tempérée, il est vrai, par les propriétés de parachute des plans inclinés. Mais s'il est à terre, faute d'un saut préalable, il lui sera défendu de la quitter.

M. MAREY : M. Giraud-Teulon me permettra, j'espère, de ne pas répondre aujourd'hui à ce long réquisitoire. Je m'étonne, du reste, de voir déjà notre collègue diriger ses attaques contre ce que j'ai écrit sur le mécanisme du vol chez les insectes et les oiseaux. Se serait-il décerné la victoire sur la question relative à la locomotion terrestre ?

On se souvient peut-être que nous étions restés en complète dissidence sur une question de fait. Aussi, ne voulant pas fatiguer l'attention de l'Académie par une discussion stérile, j'avais promis à mon honorable contradicteur de lui apporter des preuves expérimentales à l'appui de mon opinion. Si d'autres occupations m'ont empêché de tenir plus tôt ma promesse, que M. Giraud-Teulon veuille bien m'excuser ; je m'acquitterai avec lui dans une prochaine séance.

Mais, en ce qui concerne le vol des oiseaux, je doute qu'il y ait entre nous quelque entente possible. Nous procédons, en effet, de façon tout opposée.

Mon honorable contradicteur pose en principe que dans tout mode de locomotion, l'animal procède par *à-coup* et frappe brusquement l'air, le sol ou l'eau qui lui sert de point d'appui. Il faut donc, de par ce principe, que l'aile de l'oiseau frappe l'air d'un coup sec, et, si quelque expérience prouve qu'il n'en est pas ainsi, cette expérience est fausse.

Dans les études que j'ai entreprises sur le mécanisme du vol, j'ai directement interrogé la nature, et, comme l'observation est incapable de surprendre les mouvements si rapides des ailes, j'ai procédé comme en d'autres cas analogues, et j'ai confié à des instruments délicats le soin d'inscrire la forme de ces mouvements. Cette inscription, répétée sur différentes espèces d'oiseaux et avec des appareils modifiés de diverses manières, m'a donné des résultats concordants. Enfin, comme un surcroît de preuves n'est jamais superflu, j'ai été heureux de constater que l'analyse photographique du vol venait encore confirmer ces premiers résultats.

Pour M. Giraud-Teulon, ces preuves sont non avenues, puisqu'elles sont en désaccord avec la théorie. J'estime, au contraire, que les théories sont non avenues quand elles ne concordent pas avec les faits.

des eaux contaminées dans l'épidémie de Gênes; et qu'il était urgent de les transmettre sans délai à l'Académie.

Discussion

Sur la physiologie de la locomotion (1).

M. MAREY: J'espérais, en ajournant ma réponse à M. Giraud-Teulon, que la lecture de sa critique me révélerait quelque objection dont la portée m'aurait échappé à l'audition de son plaidoyer *pro domo sua*. Il n'en est rien, et je pourrais borner ma réponse aux quelques paroles que j'ai dites à la dernière séance; ce serait ménager l'attention de l'Académie pour des questions plus actuelles. Il m'a semblé toutefois que, sous une forme très concise, on pourrait préciser le débat et laisser aux juges compétents le soin de choisir entre deux opinions contraires.

Dégagée de ses effets oratoires dont je suis loin de contester le charme, l'argumentation de notre honorable collègue peut se résumer en une proposition qu'il me permettra d'exposer dans sa nudité: mes expériences sont vicieuses, dit-il, parce qu'elles ne présentent nulle indication « d'un choc, de l'arrêt » subit d'un mouvement en plein cours d'exécution ». Choc dont l'existence est, pour M. Giraud-Teulon, la condition nécessaire de toute espèce de locomotion animale.

Je dis, au contraire, que tout choc est soigneusement évité dans la machine animale; que les chocs constituent une cause de perte de travail, ce que je me suis longuement attaché à démontrer (2) et que tous les actes musculaires, quelque rapides que soient les mouvements qu'ils engendrent, commencent et finissent lentement. Voilà, si je ne me trompe, une contradiction bien formelle au point de vue des principes; elle conduit nécessairement à des applications pratiques opposées.

(1) Voy. p. 1539.

(2) *La méthode graphique*, p. 302.

Si j'avais l'ironie aussi facile que mon contradicteur, je le représenterais construisant une machine où le piston viendrait frapper de grands coups aux deux extrémités du cylindre à vapeur afin de produire « un arrêt subit d'un mouvement en plein cours d'exécution », mais je trouverais peu courtoises ces représailles de langage, et, sans faire ressortir le côté étrange des objections qui me sont opposées, je me bornerai à défendre, au moyen de preuves de divers genres, les faits que j'ai avancés.

1° *Le corps peut se détacher du sol par une brusque flexion des jambes, sans recevoir aucune impulsion ascendante analogue à celle du saut.*

J'ai donné à cet égard une première sorte de preuve, tirée des indications d'un dynamomètre inscripteur.

Quand on est monté sur la plate-forme de l'instrument, la ligne tracée (voy. la figure) s'élève à un niveau qui exprime le poids du corps. Toute impulsion ascendante produite par nos muscles aura sa réaction sur l'instrument et élèvera le tracé encore plus haut; mais si, fléchissant brusquement les jambes, nous cessons de poser sur le dynamomètre, la pression de nos pieds deviendra nulle et la ligne tracée tombera à zéro. C'est exactement ce que traduit la courbe du dynamomètre.

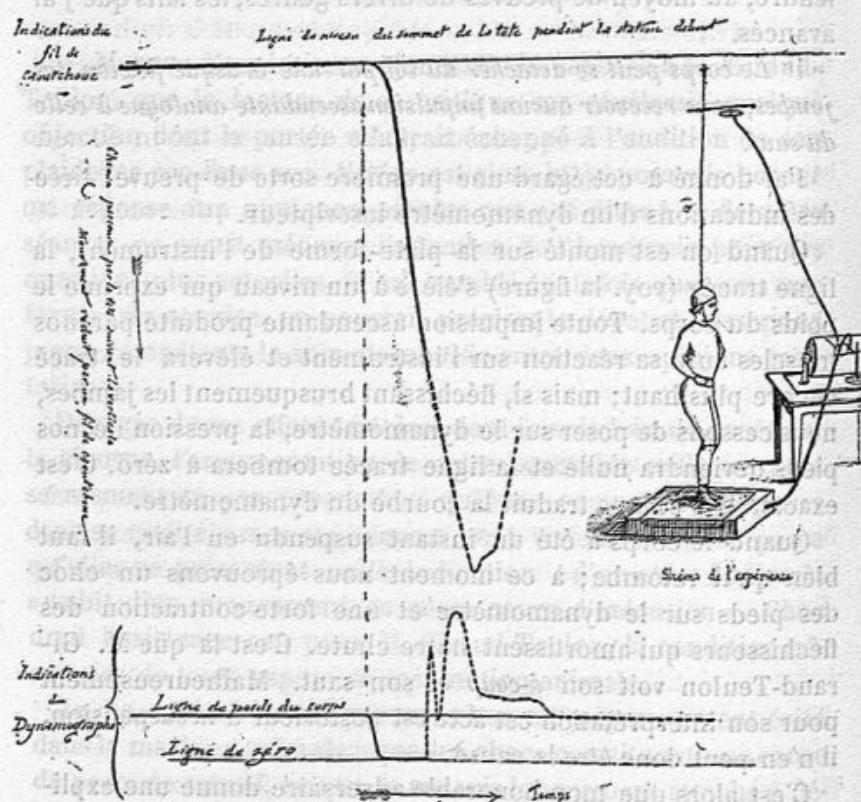
Quand le corps a été un instant suspendu en l'air, il faut bien qu'il retombe; à ce moment nous éprouvons un choc des pieds sur le dynamomètre et une forte contraction des fléchisseurs qui amortissent notre chute. C'est là que M. Giraud-Teulon voit son *à-coup* et son saut. Malheureusement pour son interprétation cet acte est postérieur à la suspension, il n'en peut donc être la cause.

C'est alors que mon honorable adversaire donne une explication que je transcris sans en comprendre la portée: « *La séparation instantanée du corps d'avec le dynamomètre coïncide avec la suspension soudaine du mouvement d'abaissement (1).* » En attendant que d'autres, plus heureux, trouvent dans cette phrase un argument à m'opposer, il me sera permis de montrer que, contrairement à son texte très précis, l'abaissement du

(1) Séance du 15 janvier 1884, p. 86, lignes 1 et 2.

corps ne cesse pas brusquement et continue même pendant que les pieds sont détachés du sol.

Il suffit, comme preuve, d'inscrire, en même temps que la courbe du dynamomètre, celles des mouvements du corps suivant la verticale. Mais comme ces mouvements sont d'une grande étendue, il faut les réduire à une plus petite échelle pour en proportionner l'amplitude à celle des tracés du dyna-



momètre. A cet effet j'ai recouru à l'artifice suivant : Supposons qu'un fil de caoutchouc d'un mètre de longueur soit fixé par une de ses extrémités et qu'en tirant sur l'autre on allonge le fil de manière à le rendre deux fois plus long. Chaque fraction de la longueur du fil aura doublé de longueur, comme le fil tout entier, et si nous considérons le premier centimètre de longueur du fil à partir du point fixe, cette partie ne se sera

allongée que de 2 centimètres. Imprimons à l'extrémité mobile du fil les déplacements les plus variables dans le sens de sa longueur, ces déplacements se répéteront fidèlement, mais à une échelle réduite dans les parties du fil plus voisines du point d'attache. On aura donc, en prenant le mouvement à différents points de la longueur d'un fil élastique, le moyen de réduire à l'échelle voulue les déplacements imprimés à l'extrémité de celui-ci.

Un croquis annexé à la figure ci-jointe montre un homme monté sur le dynamomètre. Une calotte bien attachée sur la tête de cet homme porte un fil de caoutchouc, qui se fixe d'autre part au plafond. Enfin, sur un point de ce fil voisin de son attache supérieure, est adapté le levier d'un tambour à air qui reçoit les mouvements et les envoie à un style qui trace sur le cylindre au-dessus du style du dynamomètre.

On exécute alors l'expérience précédente et l'on obtient à la fois le tracé dynamométrique des phases de la pression des pieds sur le sol et celui des mouvements verticaux du corps lui-même. En comparant les deux figures, on constate que le corps s'abaissait quand la pression diminuait sur le dynamomètre, et qu'il a continué à s'abaisser pendant que le dynamomètre accusait une pression nulle, c'est-à-dire quand les pieds ne posaient plus sur le sol; enfin que l'abaissement a continué encore quand les pieds ont touché le sol et pendant que la contraction musculaire amortissait la chute et en ralentissait le mouvement (1).

Ce phénomène me semble si bien défini par le concours des deux ordres de courbes, qu'il serait superflu d'ajouter une preuve nouvelle. On me permettra cependant, en présence de la ténacité de mon adversaire, de donner une démonstration d'un autre ordre.

J'ai l'habitude, après avoir analysé un phénomène de mécanique animale, d'en faire la synthèse, à titre de contrôle, et de construire quelque appareil schématique reproduisant le

(1) J'ai représenté dans la figure par un trait plein les phases du mouvement qui ont précédé la chute des pieds sur le sol, et par une ligne ponctuée les phases qui l'ont suivie.

phénomène. M. Demeny, mon préparateur à la station physiologique, trouvant la méthode bonne, a construit pour l'édification de M. Giraud-Teulon le petit appareil que voici.

C'est une masse de plomb portée sur un pied comme le serait un chandelier. Ce pied peut s'allonger sous l'effort d'une traction, mais un ressort intérieur tend à le raccourcir. J'allonge le pied de l'appareil et le maintiens en allongement au moyen d'un cliquet, puis je le mets sur la table. Il est dans la position d'un homme debout, les jambes allongées. Pour imiter la flexion subite de jambe, je fais partir le cliquet ; aussitôt le pied se raccourcit, l'appareil reste un instant suspendu en l'air et retombe sur son pied. Il a reproduit toutes les phases du phénomène physiologique décrit tout à l'heure, et personne assurément ne dira que cet appareil ait sauté en l'air.

Je suis presque confus d'avoir à recourir devant l'Académie à ces démonstrations multiples d'un phénomène si simple, mais ce n'est pas moi qui ai provoqué le débat. Au reste, ces démonstrations que j'accumule ne serviront probablement à rien. M. Giraud-Teulon n'a-t-il pas un argument tout prêt ?

Ce qui est admissible en mécanique rationnelle ne l'est pas en physiologie (1).

Est-il bien nécessaire, après cette profession de foi de notre honorable collègue, d'entreprendre avec lui une discussion sur des principes de mécanique ? Et n'a-t-il pas lui-même ruiné la valeur de ses arguments ?

Restons donc sur le terrain des faits et voyons si les affirmations de M. Giraud-Teulon, en ce qui concerne le mécanisme du vol, sont plus admissibles.

Ma théorie du vol de l'insecte est fausse d'après lui ; avec les battements d'ailes que je suppose, jamais l'insecte ne s'élèvera contre la pesanteur. Et pourtant, il y a bien une vingtaine d'années que j'ai construit un appareil schématique battant des ailes suivant ma théorie et s'élevant contre la pesanteur, à cette seule condition que le plan d'oscillation de ses ailes soit orienté de façon à rendre verticale la force impulsive que la

(1) Séance du 15 janvier 1884.

machine emprunte à la résistance de l'air. Des centaines de personnes ont vu fonctionner cet appareil, et, si M. Giraud-Teulon eût désiré connaître ce qu'il était si pressé de critiquer, je me serais fait un plaisir de répéter devant lui ma démonstration expérimentale.

Il y a quelques années, un jeune expérimentateur, mort prématurément, Alphonse Penaud, a construit sur le type insecte un appareil qui s'envole à une grande distance, empruntant sa force motrice à la détente d'un fil de caoutchouc tordu.

Pour le vol de l'oiseau, même genre d'objections. M. Giraud-Teulon procède de la même manière : il nie que les mouvements de l'aile en avant soient anatomiquement possibles. Qu'il prenne donc un oiseau mort et le tiènne, entre deux doigts, suspendu par le bout des ailes, il verra que l'articulation humérale se prête fort bien à ce mouvement.

Physiologiquement, cet acte est-il impossible ? Qu'il veuille bien regarder les photographies du pigeon au vol, il se convaincra qu'à certains instants les ailes sont tellement portées en avant, que la tête de l'oiseau vu de profil disparaît entièrement sous ses ailes et qu'on ne voit plus, dans l'image, qu'une aile et une queue.

Mais on pourrait objecter que cette position ne correspond pas à la descente de l'aile. Or, j'ai publié des figures où l'on voit sur cette aile portée en avant que les pennes sont recourbés par en haut sous l'influence de la pression de l'air. N'est-ce pas la preuve évidente que ces ailes portées en avant s'abaissent à ce moment même ?

J'arrive à l'argument final : M. Giraud-Teulon, s'érigent en prophète de malheur, m'annonce que, tel que je le conçois, un oiseau mécanique ne s'élèvera jamais contre la pesanteur. En général, les prophéties faites après coup ont quelques chances de se vérifier. Celle de M. Giraud-Teulon n'a pas même ce mérite. J'ai dans mon laboratoire depuis cinq ou six ans un appareil construit par M. Victor Tatin suivant la théorie que j'ai émise et cet appareil vole à la façon d'un oiseau, parcourant 15 à 20 mètres en direction horizontale, un peu moins en direction ascendante, jusqu'à ce qu'il ait épuisé la force du ressort qui fait mouvoir ses ailes. L'habile expérimentateur qui a con-

struit cet appareil l'a varié de différentes manières suivant le type d'oiseau dont il voulait imiter le vol; ses travaux sont publiés; ils ont été récompensés par l'Association française et par l'Académie des sciences; ses expériences ont été vues par un grand nombre de personnes. Cette fois encore il était facile à M. Giraud-Teulon de constater *de visu* ce qu'il s'est trop hâte de déclarer impossible.

M. GIRAUD-TEULON: Je prie M. le Président de vouloir bien m'inscrire afin de prendre la parole dans la prochaine séance pour répondre à M. Marey.

M. MAREY: Je dois m'absenter de Paris pendant deux ou trois mois; j'aurai donc le regret d'interrompre cette discussion.

M. GIRAUD-TEULON: Voilà dix mois que ce débat est pendant devant l'Académie et ce n'est qu'aujourd'hui que M. Marey répond aux objections que je lui ai présentées relativement à sa théorie du saut. Je ne puis remettre encore cette discussion et je lui demande la permission de la continuer, même en son absence.

M. MAREY: A votre aise.

— A cinq heures cinq minutes, la séance est levée.

Le Secrétaire perpétuel,

L'éditeur-gérant, G. MASSON.

J. BÉCLARD.

BOURLTON.— Imprimeries réunies, A, rue Mignot, 2, Paris.