

180

G.-L. TAVERNE

AVIATION
NATURELLE

Préface de M. E. BOURDELLE

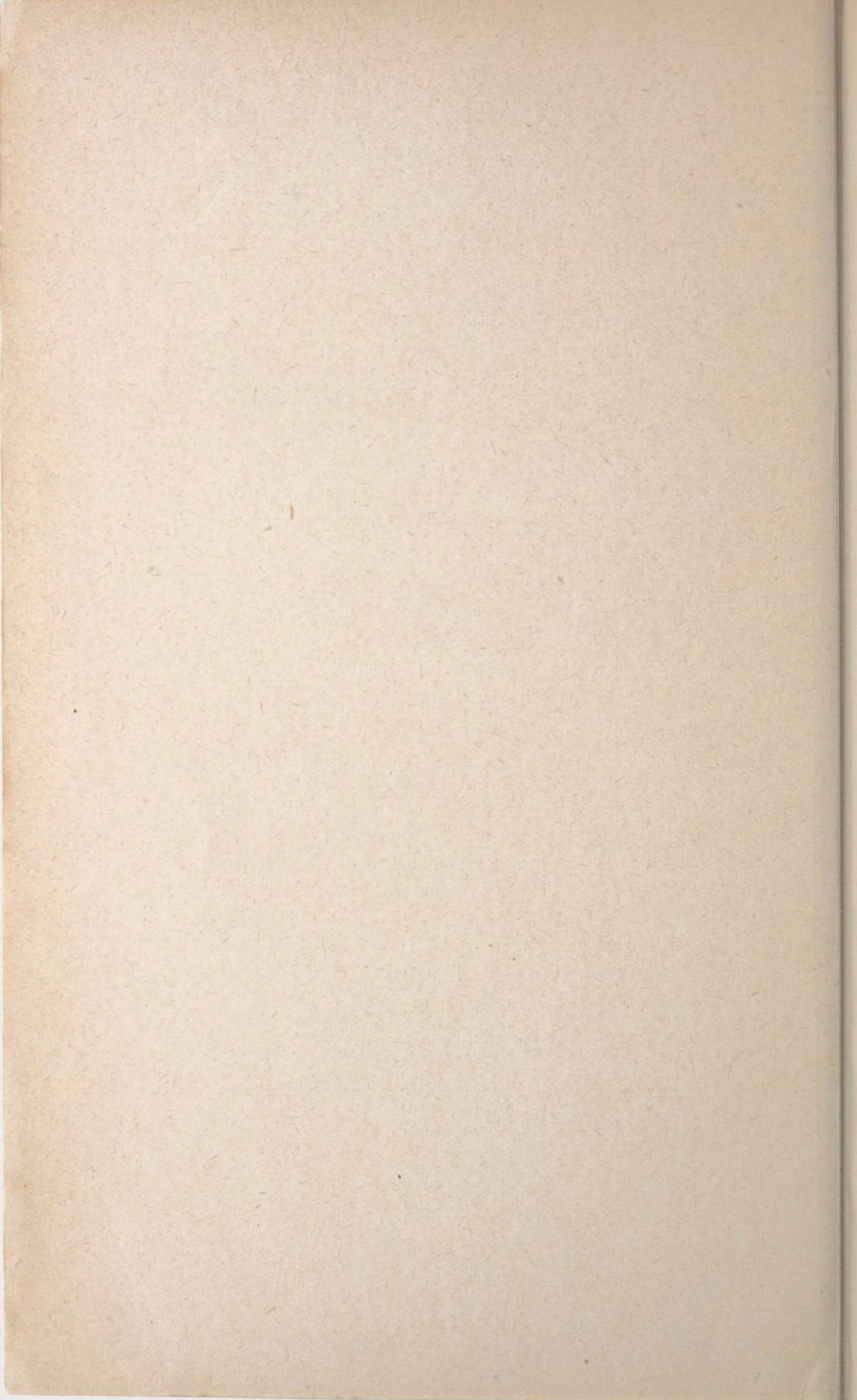


G. DOIN & C^{ie}, ÉDITEURS A PARIS

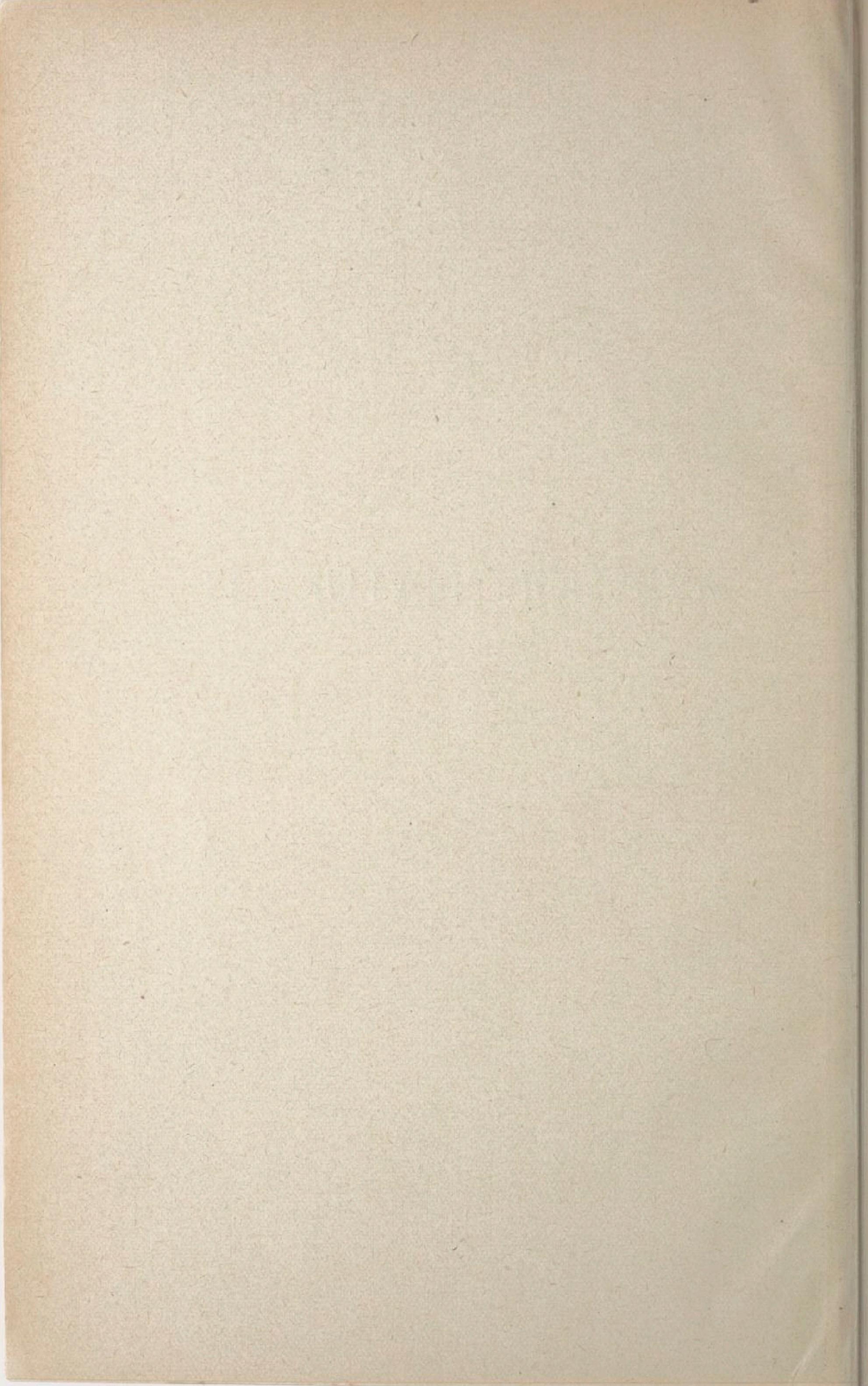
1934

LIBRAIRIE DES SCIENCES
AÉRONAUTIQUES
F. LOUIS VIVIEN
48, RUE DES ÉCOLES
PARIS (V^E)

1331-106



AVIATION NATURELLE



Gaspard-Louis TAVERNE

AVIATION NATURELLE

Études sur la mécanique animale
en vue d'applications aux machines locomotrices
et spécialement à l'aéroplane

Préface de M. E. BOURDELLE

Professeur au Muséum National d'Histoire Naturelle

AVEC 20 FIGURES DANS LE TEXTE

« C'est donc à l'observation de la
Nature qu'il faut revenir sans cesse
pour comprendre la signification des
différents actes de la locomotion
aérienne »

E. J. MAREY, *Le vol des oiseaux*.

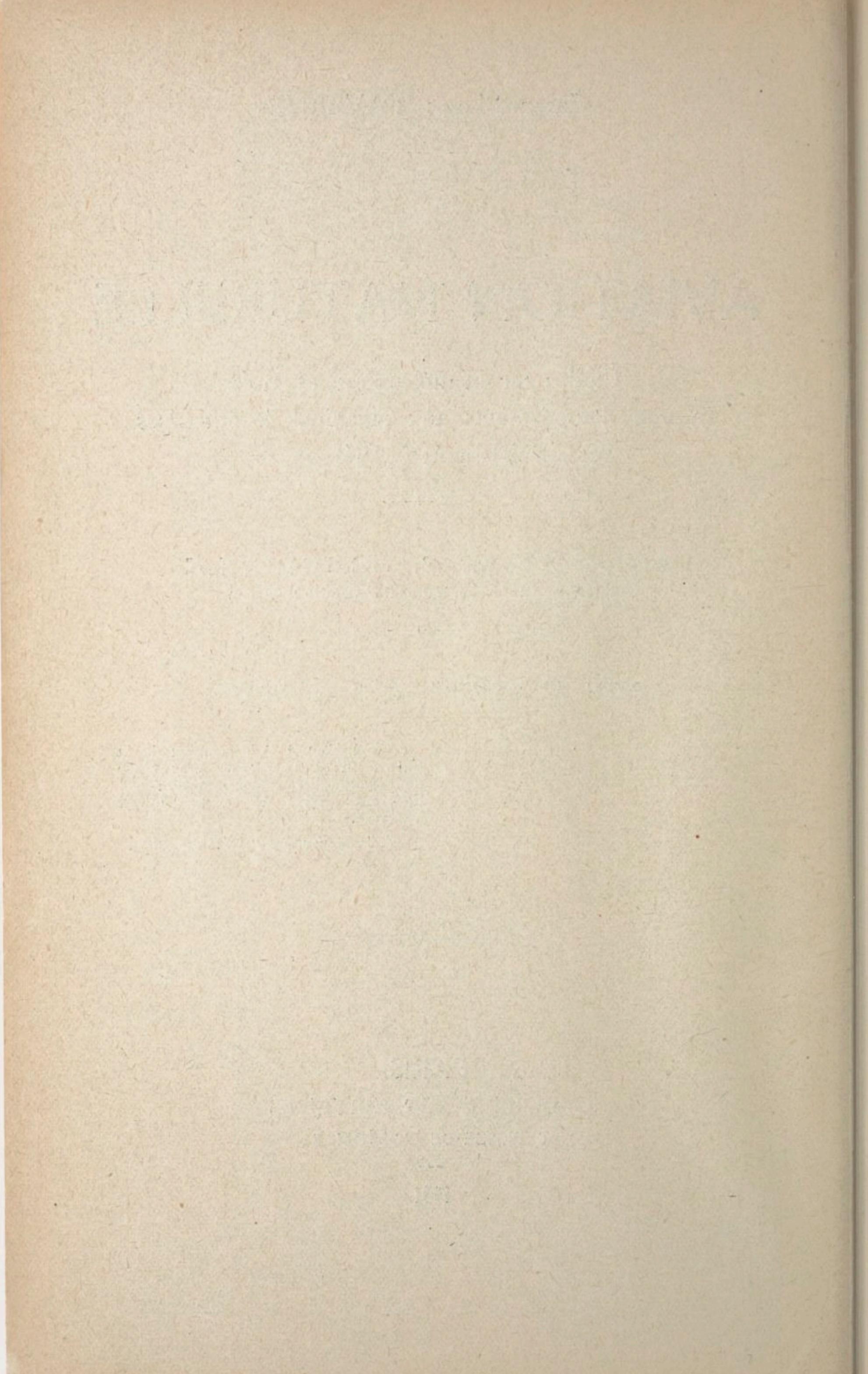


PARIS

G. DOIN & C^{ie}, ÉDITEURS

8, PLACE DE L'ODÉON, 8

1931

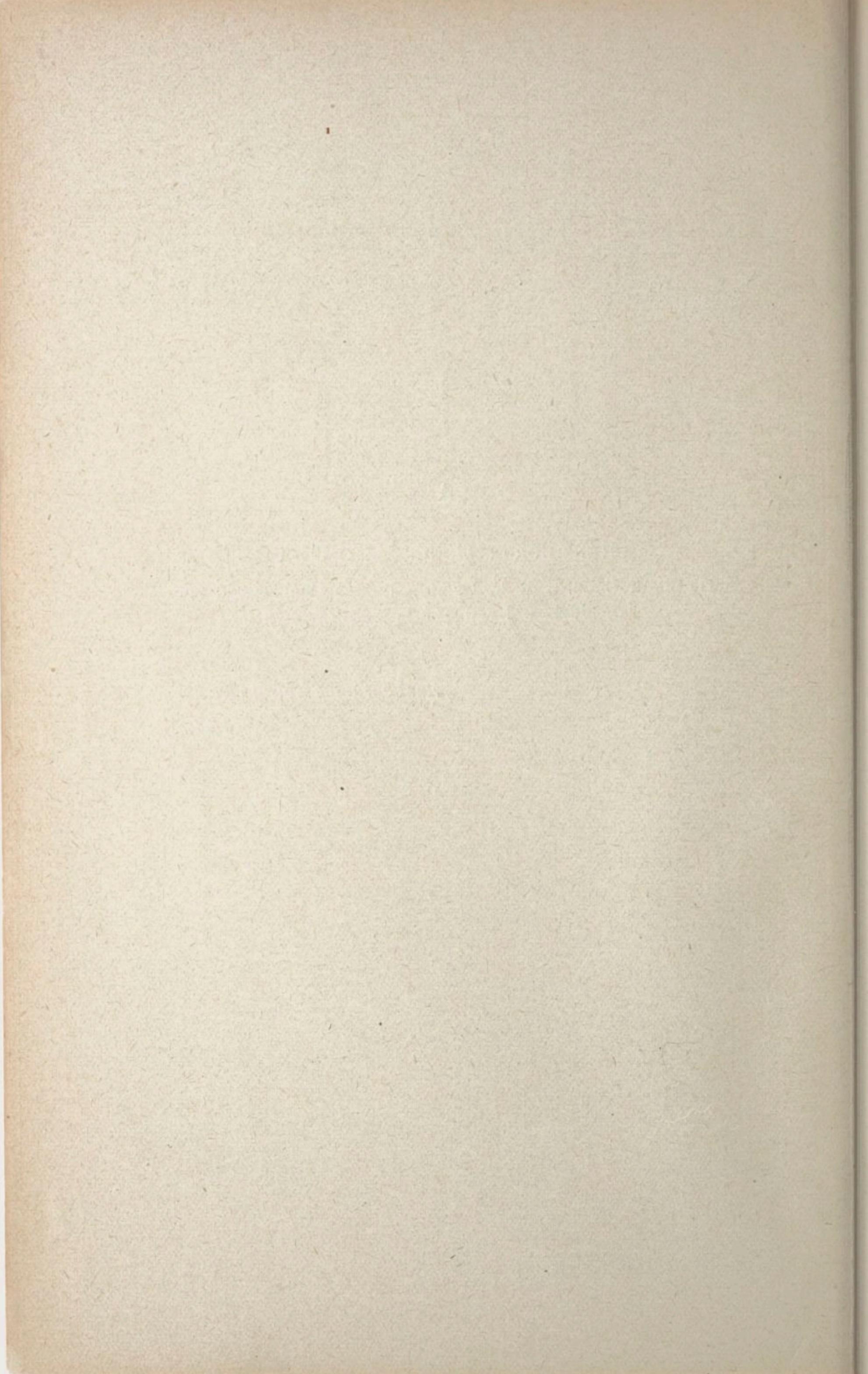


A

MONSIEUR MAURICE MARGOT

Directeur Général de la Compagnie des Chemins de Fer
de Paris à Lyon et à la Méditerranée

Respectueux hommage.



PREFACE

Parmi tous les problèmes susceptibles de solliciter la curiosité de l'esprit humain, celui du vol a été l'un des plus attirants. L'Homme, en effet, soit qu'il ait voulu marquer une sorte de suprématie dans le domaine terrestre ou supra-terrestre, soit qu'il ait voulu satisfaire un caprice, a toujours cherché à se donner des « ailes » et ses tentatives, d'abord puériles ou rudimentaires, sont vite devenues sérieuses et ont mis progressivement en jeu les cerveaux les plus éminents. C'est ainsi que des naturalistes, des physiologistes, des physiciens et des mathématiciens se sont attachés et s'attachent de plus en plus à l'étude du vol naturel ou artificiel et il serait trop long de dresser ici la liste de tous ceux qui ont apporté des lumières sur cette passionnante question. Il nous paraît cependant impossible de ne pas faire exception pour quelques-uns de ces chercheurs et de ne pas rappeler les noms de DUBOCHET, MOUILLARD, ALIX, MAREY, RICHEL, COUSIN, ANTHONY, MAGNAN, CEMICHEN, d'une part, CHABRIER, AMANS, KUNCKEL D'HERCULAIS et BULL d'autre part, parmi les Français, et ceux de HUBER, PRECHTL,

PETTIGREW, HENDLEY, PARSEVAL, MAXIM, MULLENHOFF, LILIENTHAL, KRESS, etc..., parmi les étrangers, qui se sont tout spécialement occupés du vol des oiseaux et des insectes.

A l'heure actuelle, le nombre des travailleurs de toute formation intéressés aux problèmes du vol est considérable, et nombreuses sont les publications qui leur sont relatives. Il semble bien cependant que, d'une façon générale, les études poursuivies se rapportent principalement à l'aviation et aux aéroplanes et que celles qui traitent du « Vol biologique », si l'on peut s'exprimer ainsi, soient plus rares et plus imparfaites. Cela n'a rien que d'assez naturel, car, envisagé ainsi, le problème se présente des plus complexes, et rares sont ceux qui peuvent l'aborder dans son ensemble.

Après d'illustres prédécesseurs, M. TAVERNE, très assoupli aux disciplines biologiques et mathématiques nécessaires, lui a consacré de longues méditations. Il a pensé que l'application des lois générales de la mécanique aux organes de propulsion des animaux pouvait être poussée beaucoup plus loin qu'on ne l'avait tenté jusqu'ici ; qu'il convenait d'approfondir, à la lumière de ces lois, non seulement les mouvements apparents des membres, mais la constitution et les réactions de leurs tenants dans les parties profondes ; que les problèmes de morphologie et de morphogénie des espèces susceptibles de voler ne pouvaient être envisagés qu'en

rapport avec ces lois et enfin qu'à l'exemple des « Théoriciens du Navire » la forme dans les espèces volantes devait être considérée en tenant compte des propriétés du milieu ambiant.

Ce sont les résultats de ces réflexions, dont certains éléments ou principes fondamentaux ont déjà été communiqués au public (1), que M. TAVERNE a voulu résumer dans cette brochure.

Dans le cadre général que nous venons d'indiquer, il expose des aperçus particuliers, il développe des idées originales, il cherche à établir sur le vol des principes nouveaux tant au point de vue biologique qu'au point de vue mécanique.

C'est ainsi qu'après avoir bien montré toute la différence qu'il y a entre le vol des aéroplanes et celui des oiseaux, il établit au contraire la similitude qui existe entre l'action de la nageoire caudale des poissons et celle des ailes des oiseaux. Il précise les diverses formes de vol, il étudie tout spécialement, afin de bien le différencier, le vol *godillé* des insectes et il rapproche ce vol godillé de celui de certains poissons volants tels que l'exocet.

Chez les oiseaux, outre des observations intéressantes sur la constitution des rémiges, sur le rôle actif de l'aile à la remontée, il étudie l'orientation générale des os et pose, en complétant ainsi

1. Voir notamment : *Bulletin du Muséum d'Histoire Naturelle*, année 1926, p. 260 et 364. Comptes rendus du Congrès des Sociétés savantes en 1927 (Sciences).

LAMARCK et W. ROUX, le principe de la croissance qui domine toute la morphologie du squelette des oiseaux, comme des vertébrés en général. Chemin faisant, il établit, selon des vues personnelles, la formule algébrique du profil pisciforme, et il fait de très intéressants rapprochements entre le vol et la natation.

Nombreux, variés et originaux sont les aspects du travail de M. TAVERNE qui montre ainsi les liaisons étroites qui s'établissent, pour qui sait les voir, entre les sciences naturelles et mathématiques.

On ne saurait trop féliciter M. TAVERNE d'avoir osé aborder de tels problèmes, encore plus d'avoir osé exposer très loyalement ses vues et sa pensée. Sans doute quelques-unes de ses conclusions appelleront des observations et des critiques. Peut-être même certaines devenant la vérité d'aujourd'hui, devront par la suite faire place à des vues nouvelles qui seront encore mieux adaptées. En matière scientifique, comme en toute autre, c'est la loi du progrès. Nous avons la conviction que l'œuvre modeste, mais profonde, réfléchie, originale et très sincère de M. TAVERNE sera utile.

Paris, le 20 août 1930.

E. BOURDELLE,
Professeur au Muséum National
d'Histoire Naturelle.

AVIATION NATURELLE

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES MÉCANIQUES ET PHYSIOLOGIQUES

CHAPITRE PREMIER

LA LOI DU MOINDRE EFFORT

Les pales obliques rigides de nos hélices aériennes, dans leur rapide rotation, prennent appui sur l'inertie des molécules d'air pour entraîner les ailes de l'avion.

Celles-ci, se heurtant elles-mêmes obliquement à cette inertie, deviennent peu à peu sustentatrices jusqu'au décollement qui survient à la vitesse de 50 kilomètres à l'heure.

Parmi les diverses propriétés de l'air, c'est donc, en principe, à la seule inertie que notre aviation a recours.

Or, si dans les corps solides ou liquides, l'inertie est relativement manifeste, il est certain que c'est

une des propriétés les plus infimes des gaz, eu égard à leur très faible densité. En nous limitant à l'utilisation de cette inertie aérienne, nous avons conditionné nos progrès en aviation, à l'accroissement de puissance du moteur. Cependant, dit le Dr MAGNAN, pour ce qui est des oiseaux, nous observons exactement le contraire : les meilleurs volateurs ont, de beaucoup, le plus faible moteur.

Il n'est donc pas illogique de penser que nous avons adopté une mauvaise solution du plus lourd que l'air, et que, dans le même problème, c'est d'un principe différent et beaucoup plus avantageux que la Nature s'est inspirée.

C'est ce que je me propose de démontrer.

Notre principe exige impérieusement un propulseur à surface absolument rigide et résistante, pour ne rien perdre de cette inertie si minime et si rapidement éclipsée des molécules d'air. Or, quand la situation nécessite un organe rigide, la Nature ne s'y dérobe point : le sabot des ruminants, leurs cornes, les dents, les ongles, les écailles, les os sont des exemples surabondants.

Le fait qu'elle a adopté ici des propulseurs flexibles, et dont la souplesse croît de plus en plus d'avant en arrière, à mesure que se prolonge leur contact avec la molécule aérienne, prouve bien que ce n'est pas l'inertie qui est en jeu : MOUILLARD dit que plus l'oiseau a acquis de vitesse, plus les coups d'ailes deviennent rares et plus lentes leurs oscillations.

Si, la vitesse une fois acquise, l'inertie de l'air survolé devient la seule force sustentatrice, le but des oscillations n'est plus la sustentation, mais uniquement l'entretien de la propulsion chargée elle-même de rendre les surfaces sustentatrices. Comment l'obtiendrait-on de l'inertie, cette propulsion vers l'avant, quand ces molécules sont de plus en plus rapidement dépassées, si l'on apporte dans les battements un ralentissement toujours plus grand ?

Ce seul argument pourrait suffire, mais remarquons qu'à l'encontre des pales rigides de nos hélices, nous ne voyons dans la Nature, quand il s'agit de progression dans les fluides, que des propulseurs à surface flexible : oiseaux, chauve-souris, insectes, poissons, cétacés, raie, anguille, etc...

Cette universalité est un puissant argument en faveur de notre thèse : les milieux fluides de l'eau et de l'air ont beaucoup de propriétés communes, la mise en œuvre de celles-ci doit comporter des règles très voisines, sinon identiques, d'autant plus qu'au lieu de s'y déplacer en surface comme nous sur le sol ou sur l'eau, les animaux qui y évoluent, y sont entièrement plongés.

Nous pressentons là que le principe de propulsion du poisson n'est pas celui de l'hélice rigide de nos navires : la preuve en sera aisée.

Le poisson étant équilibré par sa vessie natatoire, et ayant une densité d'ensemble égale ou inférieure à celle de l'eau, n'a pas à vaincre l'obstacle de son

poids, mais celui de la résistance à l'avancement. C'est pourquoi, son propulseur, qui est sa queue, nous le savons, doit être placé tout à fait à l'arrière, tandis que celui de l'oiseau doit, contre la pesanteur, principal obstacle, *encadrer le centre de gravité.*

Mais ils ont des formes identiques, une surface bifurquée aux bords antérieurs rigides, aux bords postérieurs flexibles, finissant par deux pointes, avec une acuité et une longueur d'autant plus grandes que la vitesse est meilleure : seules, les surfaces sont plus réduites dans l'eau qui a une plus grande densité. L'aile-nageoire des pingoins, manchots, etc., dans sa forme atrophiée, ne déroge pas à cette règle.

Pourquoi ces surfaces semblablement découpées, sont-elles différemment orientées ?

Le poisson évolue le plus généralement dans un plan horizontal ; son propulseur, devant servir en même temps de gouvernail de direction horizontale, aura donc sa surface verticale.

L'effort le plus constant de l'oiseau est, au contraire, la lutte contre la pesanteur, c'est-à-dire en vue d'oscillations verticales, voilà pourquoi le plan de son propulseur est horizontal.

La preuve : que sont les cétacés ? Des animaux marins soumis à la nécessité de respirer, c'est-à-dire, à l'encontre du poisson, obligés de toujours monter et descendre : aussi leur queue propulsive, aux con-

tours identiques à celle des poissons, a-t-elle une orientation inverse de cette dernière : sa surface est en effet horizontale comme celle des ailes de l'oiseau (fig. 1).

Il est vrai que la queue du poisson est tout à fait plane, tandis que les ailes de l'oiseau, au repos, sont plutôt concaves en dessous. Nous évoquerons plus loin le principe de la résistance des matériaux,

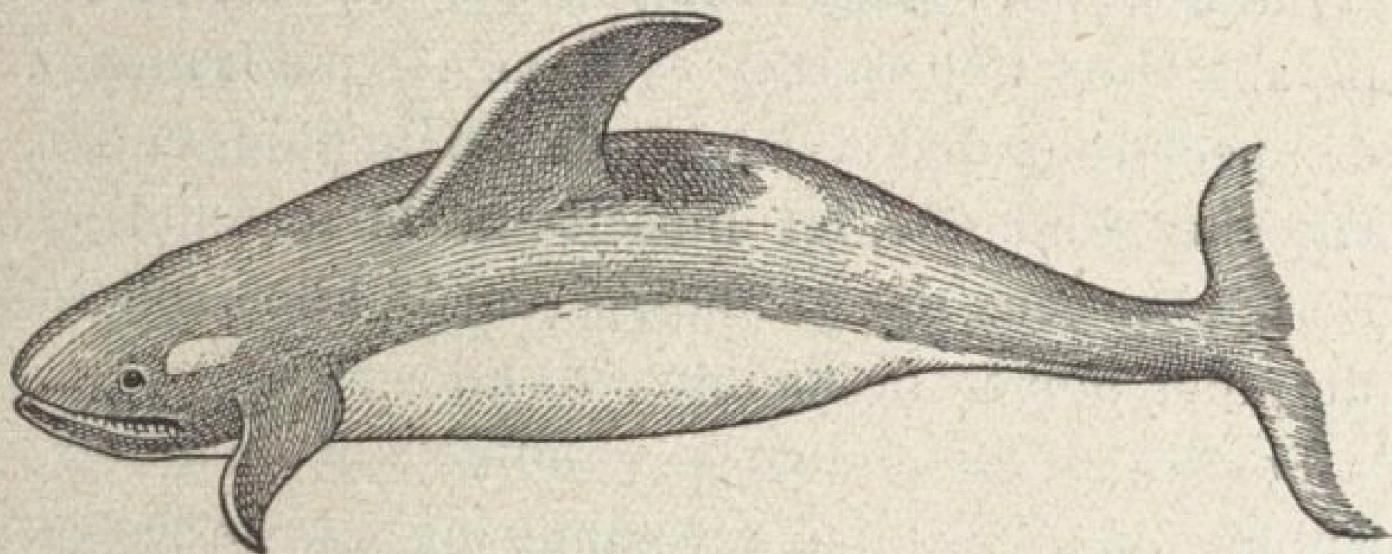


Fig. 1. — Cétacé (Épaulard). Nageoire caudale horizontale.

qui nous montrera, pour ces organes, la nécessité d'être naturellement courbés au devant de l'effort le plus prolongé.

Il est d'autres arguments qui démontrent, à l'encontre du faible rendement de notre méthode, l'excellence du principe adopté par l'oiseau.

Parmi les caractéristiques de toute machine animale, il convient de placer en tout premier lieu, la tendance à l'économie de l'effort. S'en tenir à l'effort minimum, dans tous les domaines et pour tous ses organes, est la préoccupation perpétuelle de l'ani-

mal pendant sa journée, pendant sa vie comme pendant toute l'histoire de son espèce.

Il est inutile que je cite des faits à l'appui de cette loi qu'aucun biologiste ne saurait contester.

Il est, en outre, reconnu, ainsi que l'a dit MAREY, qu'au point de vue de la force spécifique de leurs muscles, les oiseaux ne sont pas supérieurs aux mammifères, et à l'homme en particulier.

Par leur poids également, ces muscles sont comparables aux nôtres. D'après MAREY, le poids moyen des pectoraux de l'oiseau est de $\frac{1}{6}$ du poids entier. Or, chez l'homme, les muscles de la locomotion, c'est-à-dire ceux des jambes, pèsent 13 kilos, soit $\frac{1}{6}$ du poids moyen de l'adulte, 70 kilos.

Partant de ces données, et admettant qu'un être animé pesant 70 kilos développe un tiers de cheval vapeur (c'est, pour l'homme, un maximum) il pourrait suffire d'un moteur de 16 CV au lieu de celui de 350 CV prévu actuellement pour un avion de 3.500 kilos en ordre de marche.

Cette réduction à une dépense vingt fois moindre, qui ressort du principe du vol naturel, n'est pas invraisemblable. MAREY cite un pigeon qui a franchi 330 kilomètres en un jour, un faucon de Henri II, perdu dans une chasse à Fontainebleau, et retrouvé trois jours après à Malte, et nous savons que les cailles en migration traversent régulièrement la Méditerranée.

Quels que soient l'aide des vents ou l'état de

fatigue à l'arrivée, il est manifeste que l'effort moyen, dans ces randonnées, doit être très réduit.

D'autre part, à raison même de ses chevaux-vapeur et de sa vitesse, notre aéroplane exige une hélice puissamment renforcée pour éviter les effets dissociants de la force centrifuge ; nos ailes entoilées n'ont jamais trop de haubans pour conjurer le risque de bris sous la violente poussée de bas en haut qui leur est imposée, alors que les organes de l'oiseau sont constitués d'éléments qu'on a pris pour le symbole de la légèreté : le duvet, les plumes ; que les ailes des insectes, des mouches, transparentes et souples comme une mousseline, sont tendues sur des nervures constituées par des tubes gonflés d'air, et que les ailes du papillon nocturne, par exemple, ont des écailles qui ne s'échappent point au cours du vol, mais cependant si fragiles qu'elles restent adhérentes à nos doigts dès que ces ailes sont légèrement touchées.

En outre, nos appareils n'arrivent à la sustentation qu'après avoir acquis une vitesse horizontale de 50 kilomètres au minimum, alors que le moineau, l'oiseau-mouche, l'insecte, volent au point fixe, sans vitesse de translation aucune quand il leur plaît. Enfin, faut-il insister sur la nécessité pour nos appareils, d'un vaste terrain d'atterrissage : 150 mètres à plat, alors que l'oiseau ne cherche pas pour atterrir, un espace en longueur, mais une ligne transversale, un rebord de chéneau, un fil

télégraphique, à moins qu'il ne vise et n'atteigne dans les airs ou dans l'eau, une proie fugitive.

N'est-il pas évident, en présence de tels résultats, que nous aurions un intérêt pratique considérable à connaître à fond les procédés du vol animal ?

N'invoquez pas, au surplus, la sensibilité spéciale des organes animaux qui obtiendraient des miracles parce qu'ils sont vivants : la doctrine du moindre effort s'applique ici, avec encore plus de rigueur, car l'effort des sens, l'effort nerveux, fait encore plus horreur à l'animal (et à l'homme lui-même) que l'effort physique.

La grandeur du résultat cherché et obtenu, comme la fragilité des organes, exige le recours à des principes très généraux, de très grand rendement et, si je puis dire, toujours sous la main. L'oiseau ne peut être comparé à un danseur de corde toujours à l'affût d'un point d'appui et en souci de son équilibre ; ce n'est pas un numéro de cirque de dix minutes que l'oiseau pratique, et sa sécurité engagée seize heures par jour, ne saurait être à la merci de mouvements de prestidigitation.

MOUILLARD et DUBOCHET citent maints exemples du laisser-aller et même de la somnolence des oiseaux dans le vol.

Je suis donc fondé à dire que l'oiseau ne peut avoir recours qu'à des moyens accessibles également pour nous, assujetti qu'il est aux mêmes lois physiologiques, physiques et mécaniques.

J'ajouterai que la nécessité d'obtenir un puissant rendement, sans en appeler à des subtilités, limite l'oiseau, parmi ces lois, à l'usage des plus manifestes, c'est-à-dire vraisemblablement, à celles qui, malgré la modestie de nos progrès scientifiques encore à leur début, nous sont devenues familières.

En d'autres termes, les organes de la locomotion animale sont astreints avec la même rigueur que nos machines aux lois physiques et mécaniques : ce ne sera pas pécher par esprit de système, que d'admettre l'influence prépondérante de ces lois dans l'agencement desdits organes, et de chercher, au moins pour les plus générales, les modalités de leur application dans la structure et le fonctionnement de ces derniers.

Il n'est pas non plus téméraire de chercher ensuite à découvrir la technique du vol, son mécanisme interne et, cependant, jusqu'à présent, on s'est soigneusement gardé d'un tel examen ; on s'est limité à la traduction des formes extérieures, comme s'il suffisait de prendre le moulage externe d'une locomotive pour en déduire et reproduire le fonctionnement.

CHAPITRE II

LES LOIS DE LA MÉCANIQUE ANIMALE

En vertu du principe de LAMARCK, la fonction a créé l'organe et présidé à son adaptation toujours plus parfaite au cours de l'évolution.

La fonction des muscles et celle des os étant exclusivement mécanique, nous en déduisons que leurs facteurs morphogéniques prépondérants, ont été des facteurs mécaniques.

Les principales lois qui règlent les modalités d'action de ces facteurs, sont celles de la force vive et celles de la résistance des matériaux.

L'utilisation de la force vive est extrêmement avantageuse en mécanique. Considérez, outre les exemples classiques, la force musculaire de nos jambes : elle nous permet, par des mouvements alternatifs, de faire six kilomètres à l'heure, alors que, emmagasinée et transformée en un mouvement continu grâce à la bicyclette, elle obtient avec la même dépense d'énergie, un résultat quadruple du premier.

Or, l'oiseau économe n'a pas ignoré ce principe,

il ne se propulse pas par des efforts saccadés et successifs. Noyé dans le milieu où il prend appui, son aile peut trouver cet appui en tous les points de sa trajectoire, et l'examen des plumes nous démontrera que la phase de remontée de l'aile n'est pas moins active que son abaissée.

Il lui faut d'ailleurs éviter les points de rebroussement, les points morts, car si les variations brusques de vitesse, et les trajectoires anguleuses sont dommageables pour le métal, elles le sont bien plus encore pour les plumes, pour les articulations, et pour celles-ci la douleur est un avertissement infaillible d'avoir à respecter les lois de la force vive, à pratiquer l'amortissement des secousses, ou tout au moins à en rejeter l'effet sur les os insensibles.

Ce n'est pas parce que le muscle vivant est obligé de séparer par des repos réguliers ses périodes de travail, que l'aile sera astreinte au mouvement alternatif : il suffit qu'elle soit commandée par une série de muscles agissant consécutivement, suivant un cycle régulier et fermé, de la même façon, somme toute, que les pistons alternatifs d'un moteur en V, réalisent sur le vilebrequin, le mouvement rotatif.

Ce mouvement continu est d'ailleurs particulièrement nécessaire ici, car il supprime l'accélération dans la chute, condition primordiale à l'économie de l'effort.

On a répété souvent, après BABINET, qui exposa

le premier cette thèse à l'Académie des Sciences, qu'en vertu de la formule : Espace parcouru égale $1/2$ de 9,81 multiplié par le carré du temps, un homme qui tombe parcourt, dans la première seconde de chute : 4 m. 90.

Or, il lui est impossible d'élever un poids de 70 kilos, c'est-à-dire de s'élever lui-même verticalement (ou, par exemple, dans un escalier), de plus de 0 m. 40 pendant le même temps : il ne saurait donc en aucune façon, se sustenter en l'air par ses seules forces.

C'est par ce raisonnement que BABINET soutint, dit-on, la légende de la force mystérieuse des oiseaux, et qu'il attribua à l'hirondelle, une puissance de plusieurs chevaux-vapeur.

Cette démonstration part d'une double erreur.

Nous savons que l'oiseau ne se soutient pas par saccades, et de plus, qu'il n'attend pas d'être tombé pendant une seconde entière avant de réagir.

En choisissant cette unité de temps malencontreuse, on a simplement prouvé qu'il ne fallait pas rester une seconde entière sans être sustenté. L'aile du pigeon oscille dix fois pendant cette période, et trois cents fois celle de la mouche : leur vol fût-il intermittent, ce qui n'est pas, on comprend qu'ils puissent facilement racheter leurs instants de défaillance. (En partant d'une unité de temps un peu plus grande, on dissuaderait également le bicycliste de tenter jamais un démarrage à la montée ; il suffi-

rait de supposer au petit recul qui marque l'instant de son départ, une durée de plusieurs secondes sans réaction de sa part, pour qu'il ne puisse le rattraper).

Je puis modifier l'énoncé habituel de la loi d'accélération, et dire, avec autant de rigueur, que l'espace parcouru en chute libre diminue si le temps compté depuis l'origine diminue, et proportionnellement au carré de cette diminution de temps, au carré du temps, dis-je, alors que l'espace que notre force peut racheter ne diminue que proportionnellement au temps. Autrement dit, si nous partageons une seconde en cent périodes égales, successives, numérotées 1, 2, 3... etc. 100, l'espace parcouru en chute libre pendant une seule de ces périodes n'est pas toujours le même : s'il s'agit de la période 98 par exemple, il sera considérable (proportionnel au carré de 98/100), mais s'il s'agit d'une période numérotée 3, très voisine du début de chute, il sera infime au contraire (proportionnel au carré de 3/100). L'espace à rattraper deviendra aussi petit que l'on voudra, en adoptant des périodes encore plus réduites, car nous tendons en effet vers une limite, qui est le cas où l'action sustentatrice est continue, c'est-à-dire ne laisse jamais amorcer la chute.

Faisons le calcul pour la période n° 1 de la seconde de temps divisée en 100 parties égales.

$$e = \frac{1}{2} gt^2 = \frac{9,81}{2} \times \left(\frac{1}{100}\right)^2 = \frac{4 \text{ m. } 90}{10.000} \text{ soit quatre}$$

dixièmes de millimètres de chute. Or, la force musculaire de nos jambes, quand elle dispose d'un point d'appui efficace, est capable de nous remonter de 0 m. 40 par seconde, soit dans la période envisagée, de $\frac{0,40}{100} = 4$ millimètres alors que, d'après le calcul ci-dessus, quatre dixièmes de millimètres sont seuls nécessaires, pour racheter la chute due à la pesanteur.

Tout se ramène donc à trouver pour nous, dans l'air, un point d'appui efficace, c'est-à-dire de résistance comparable à celle du sol sur lequel réagissent nos organes propulseurs : il n'est pas douteux que nous le posséderons quand nous aurons réalisé le principe de l'oiseau : voici en effet la preuve que celui-ci trouve dans l'air le même appui avantageux que nous sur le sol : jetons à un moineau, même sur une aire parfaitement plane, des miettes très espacées, ce n'est pas en trottant, mais en volant qu'il se rendra de l'une à l'autre démontrant ainsi que la recherche de l'appui aérien n'exige pas plus d'effort pour lui que la marche sur le sol.

Si nous tenons compte, d'autre part, de l'excédent de poids que les rapaces, par exemple, sont capables d'enlever, et qui pourrait correspondre pour l'homme, au poids d'une aviette légère, ne semble-t-il pas que nos muscles des jambes (aussi puissants comparativement que les muscles du vol) seraient suffisants pour nous permettre de nous enlever par

nos propres moyens ? Tout au moins (car il serait naïf de ne pas utiliser les moteurs mécaniques puissants dont nous disposons) serions-nous certains qu'en cas de panne de ces moteurs, nos propres forces suffiraient à les remplacer assez longtemps pour nous permettre le choix parfait du point d'atterrissage.

CHAPITRE III

LE VOL GODILLÉ

Nous allons trouver dans l'étude de ce mode de vol, extrêmement répandu dans la nature, une preuve nouvelle de la soumission de l'animal aux règles de la force vive et de sa recherche des bénéfices inhérents à un effort de propulsion continu.

Le vol Godillé est la solution adoptée par la plupart des insectes, en particulier les diptères, dont les organes paraissent un résumé et comme une quintessence de l'appareil de vol naturel. Je dis bien quintessence, car il ne semble pas qu'un vol puisse dépasser la rapidité au départ, la souplesse en chemin et à l'arrivée, la stabilité au point fixe dont celui de la mouche nous offre l'exemple.

Un diptère aisé à observer est la tipule (fig. 2) grand moustique aux ailes longues et minces, au thorax étroit et bombé, lequel porte à la partie postérieure, au bout de deux poils bien détachés, deux boules oscillantes qu'on nomme balanciers.

Comme chez tous les diptères, les battements sont extrêmement rapides (200 environ par seconde) et,

pour les observer j'ai dû employer le procédé connu du stroboscope qui m'a permis en quelque sorte, de ralentir, au moins en apparence, la vitesse des battements à volonté.

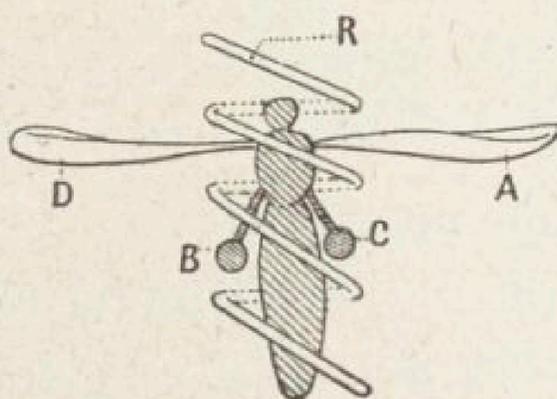
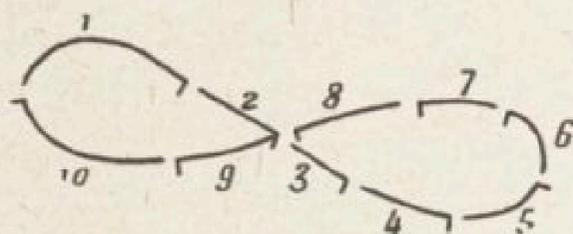
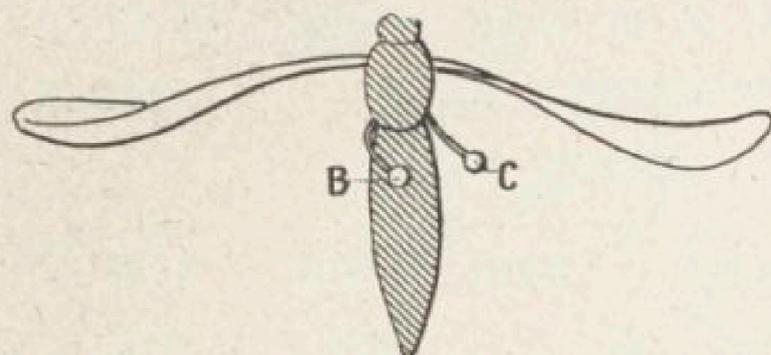


Fig. 2. — Tipule pendant le vol : les balanciers, B, C, oscillent en se portant ensemble du côté de l'aile la plus basse.

Fig. 3. — Étude stroboscopique de la trajectoire de l'aile.

Fig. 4. — R, fil de fer hélicoïdal ; B, C, balanciers.

L'appareil se composait simplement d'un écran circulaire (c'était un disque de carton obturant la roue arrière d'une bicyclette) dans lequel étaient percées des fenêtres régulièrement espacées sur le pourtour du disque. C'est à travers celles-ci que l'insecte était observé. La largeur des fenêtres était

exactement le dixième de celle des espaces opaques qui les séparaient. Nous nommerons écran, chacune de ces parties opaques, et à chaque fenêtre, nous attribuerons l'écran qui la suit immédiatement ; il est clair que lorsque le disque tournera entre l'œil et l'insecte, ce dernier sera visible seulement pendant le premier dixième du temps T que mettent chaque fenêtre et son écran, à franchir le rayon visuel.

Sott 1, 2, 3, 4,, 10 (fig. 3) la trajectoire parcourue par une aile et divisée en dix segments égaux.

S'il arrivait que le temps mis à la parcourir fût précisément égal à T , je verrais l'aile toujours dans un même segment, le segment 1 par exemple, le restant de son parcours m'étant dérobé par le passage des écrans, et l'aile me paraîtrait immobile au point n° 1 de son parcours (1).

Si, au contraire, le mouvement de l'aile est un peu plus rapide, après que je l'aurai vue en 1 à travers la première fenêtre, elle aura fait son parcours complet pendant que passe le premier écran et sera même parvenue au point 2 quand la deuxième fenêtre va se présenter, puis au point 3 avec la troisième, et ainsi de suite, jusqu'à ce que j'ai pu obser-

1. L'appareil permettait d'atteindre ce résultat et de le maintenir un certain temps : il suffisait alors de calculer combien de fenêtres franchissaient le rayon visuel en une seconde pour connaître le nombre des battements d'aile de l'insecte par seconde.

ver une trajectoire entière, formée de segments juxtaposés 1, 2, 3,, 10 empruntés à dix parcours successifs.

La rotation des fenêtres étant elle-même très rapide, la persistance de l'impression donne à ces segments un aspect de continuité, et on a l'apparence exacte de battements d'aile d'une fréquence dix fois moindre.

Le mouvement que j'observai ainsi était encore rapide, mais facile à discerner, et quand l'insecte ralentissait ses battements, dans l'intention de s'arrêter, je voyais ses ailes, un instant immobiles, reprendre progressivement leur parcours en sens inverse jusqu'à l'arrêt. C'est qu'alors mon écran tournait plus vite que l'aile, et me montrait les segments successifs de sa trajectoire dans l'ordre inverse : 10, 9, 8, 7,, 2, 1.

(Tout le monde a remarqué au cinématographe, la rotation très ralentie de l'hélice des aéroplanes en marche ; ce phénomène s'explique exactement comme ci-dessus par les éclipses régulières de l'appareil enregistreur).

L'insecte étant fixé, on n'a pas d'ailleurs, la reproduction exacte du vol naturel : le corps ne pouvant obéir à la réaction de l'air, les ailes sont poussées par celle-ci vers le haut et l'avant d'une façon exagérée.

Cette méthode exige que l'aile parcoure rigoureusement et longtemps la même trajectoire, et l'insecte

doit être solidement fixé, ce qui n'est pas pour l'encourager à voler. Il se fatigue vite et doit être souvent échangé ; comme il ne se prête pas du tout à l'expérience et a toujours six pattes, deux ailes et un abdomen très mobile à y opposer, on le blesse constamment, et c'est non seulement l'expérience, mais la chasse à travers champs et marais qu'il faut recommencer.

Mes efforts furent récompensés par le spectacle curieux, comique même, qui m'était présenté :

Une sorte de petit bossu, la tête dans les épaules et les jambes pendantes, s'excrimait à tourner dans l'air, comme deux manivelles, des bras tordus et des mains immenses, avec un courage et une rapidité dignes d'un meilleur succès.

Ce mouvement alterné des deux ailes qui me rappelait exactement celui des pédales d'une bicyclette, me surprit tout d'abord, car à l'époque de mes observations, on ignorait généralement l'existence du vol godillé. Il a été depuis, constaté dans les laboratoires, et cité dans des publications variées (fig. 2).

L'aile n'apparaît pas plane ainsi qu'au repos, mais gauchie et légèrement courbée en longueur, l'extrémité toujours en retard sur la partie proximale qui s'efforce de l'entraîner. Les balanciers s'agitent rapidement de droite à gauche en se portant ensemble du côté de l'aile la plus basse.

Etant donné que les poussées des deux ailes ne

sont plus symétriques par rapport à l'axe sagittal comme chez l'oiseau aux ailes conjuguées, on comprend que le déplacement d'un contrepoids soit nécessaire pour éviter au corps les oscillations dues à cette dissymétrie, comparable, en l'occurrence, à la réaction de rotation sur son châssis, d'une hélice impaire d'aéroplane.

Cet office d'équilibre est rempli chez quelques insectes par une deuxième paire d'ailes plus ou moins réduites, par des élytres, et, chez la tipule, par les balanciers précités.

C'est ce que j'ai vérifié par l'expérience ci-après.

J'introduis l'insecte en le vissant comme un clou à ailettes dans un ressort à boudin, de pas et de diamètre assez larges pour que le mouvement des balanciers B C ne puisse être gêné (fig. 4). L'oscillation des ailes, qui débordent largement les spires, est très libre dans le sens vertical, mais elle ne peut produire la translation de l'insecte, qui n'obtient ainsi qu'un résultat sustentateur.

Quel que soit le sens d'enroulement des spires, si les deux balanciers sont intacts, l'insecte, malgré ses battements, reste au point où il a été placé. Je coupe aux ciseaux le balancier C. L'abaissement de l'aile D et l'élévation simultanée de A provoquent une réaction qui soulève le côté gauche, mais que le balancier B, très écarté du corps, suffit à peu près à neutraliser. Mais dans la torsion inverse produite par la résistance de l'air à l'abaissement de A

et à l'élévation de D, le seul balancier B, ne dépassant pas l'axe du corps, ne parvient plus à équilibrer l'insecte qui tourne tout entier face à droite.

La répétition fréquente de ses battements additionne ces rotations dans le même sens, l'insecte se visse rapidement vers l'avant, par où il s'échappe d'un saut violent pour retomber et rester ensuite immobile sur le côté.

L'enroulement inverse des spires, ou l'ablation de B au lieu de C font progresser l'animal en sens inverse, ce qui confirme l'explication précitée du rôle des balanciers. Je rappellerai ici cette remarque du D^r AMANS, que l'aile des oiseaux est large à l'épaule et aiguë à la partie distale, alors que les insectes diptères ont, au contraire, une aile étroite aux attaches, et s'élargissant à mesure qu'elle s'éloigne du corps.

En constatant que ceux-ci pratiquent le vol godillé, je fus amené à rapprocher ce mode de vol de la forme spéciale de leurs ailes. L'aile de la chauve-souris nous rappelle ce type et l'observation de ses rondes au crépuscule permet en effet de vérifier qu'elle pratique habituellement le vol godillé.

Or, les ailes des oiseaux nocturnes, par leur contour, se rapprochent beaucoup de celles de la chauve-souris, et ces oiseaux, comme cette dernière, ont la spécialité du vol silencieux et surtout excessivement souple. Celle-ci, dit MOUILLARD, vole à toute vitesse

autour du plafond d'une chambre, en dessinant les angles sans jamais s'y heurter, et le hibou vole également vite dans la forêt, en esquivant les arbres avec la plus grande adresse.

Le vol godillé explique parfaitement ce silence et cette grande facilité de direction : c'est ici, d'autre part, l'oscillation des pattes qui est chargée d'assurer l'équilibre.

Etant donné la forme de ses ailes, et sans l'avoir vu voler, je crois pouvoir affirmer que le poisson volant ou exocet (fig. 5) pratique également ce vol.

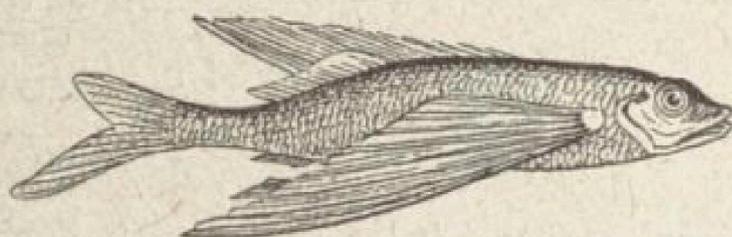


Fig. 5. — Exocet.

Les observations de M. IDRAC, à ce sujet, me semblent confirmer le fait d'une manière indirecte. Le vol godillé, avons-nous dit, nécessite un organe accessoire d'équilibre ; or, cet organe serait, chez l'exocet, le lobe inférieur de la queue, qui, au cours du vol, reste en contact avec les vagues et amortit, par la résistance éprouvée dans l'eau, les oscillations dues aux poussées divergentes des ailes. Ce sont ces oscillations amorties de la queue qui donnent à son lobe inférieur le mouvement circulaire horizontal que cet observateur a signalé.

La forme distale, élargie des ailes, n'est d'ailleurs

pas indispensable dans la pratique du vol godillé, car il est facile de l'observer concurremment avec le vol ramé (ce qui a aussi lieu d'ailleurs, chez les nocturnes et les chéiroptères), chez les oiseaux qui ont, au contraire, l'aile excessivement aiguë comme les hirondelles et les martinets. La queue, très fourchue, joue ici le rôle complémentaire, et il en est de même, probablement, chez l'oiseau-mouche qui, en plein vol, paraît entouré d'un brouillard, tant la rotation de ses ailes est accélérée. MAREY, qui ne fait jamais allusion au vol godillé et paraît l'avoir ignoré, ne donne que des fragments de photographies du vol du hibou et de la chauve-souris. Il allègue qu'il a dû faire choix des images les plus nettes : en réalité, croyant chez ces animaux à un vol ramé, il n'a recherché que les images où les deux ailes ont une position à peu près symétrique : il serait nécessaire de reprendre ses essais, car les détails de ce mode de vol seraient certainement précieux à élucider.

DEUXIÈME PARTIE

RECHERCHES ANATOMIQUES

CHAPITRE IV

LES PLUMES

Lorsqu'un voyageur isolé marche contre l'orage, il efface ses épaules et les saillies de son corps, et, dérochant les plis, les pans flottants de son habit, il s'efforce de présenter au vent une silhouette aussi réduite et aussi fuyante que possible.

L'oiseau vole tout le jour et toute sa vie à la vitesse du vent d'orage. Voulué ou inconsciente, la préoccupation constante pour lui et ses ancêtres a donc été d'acquérir en tous sens un profil avantageux : on peut dire que les plis de son habit, jusqu'à la trame même, se sont façonnés pour laisser le moins de prise possible au courant aérien.

Ceci doit s'entendre du corps. Pour l'aile, ses éléments recherchent la résistance de l'air en divers

sens, sauf une direction cependant, celle vers laquelle doit s'accomplir l'écoulement : cette dernière est évidemment celle qui ressort de l'alignement commun aux barbes de plusieurs plumes successives, et qui donne une apparence brillante à la surface exposée au courant.

Avec un peu d'attention, nous trouverons écrit, en quelque sorte, sur la face active de l'aile (et sur le corps) le chemin des molécules, tandis que la résistance utile de ces dernières sera interprétée par le dessin, nous dirons mieux, l'armature de la face opposée.

Les plumes diffèrent suivant qu'elles recouvrent la peau (plumes de couverture dont les canons, barbes et barbules sont souples et parallèles) ou qu'elles sont en contact avec l'air sur leurs deux faces, rémiges, primaires, cubitales et humérales.

Ces rémiges ont des barbes implantées obliquement de part et d'autre du canon, parallèles entre elles pour chaque côté respectivement et formant ainsi deux lames, inégales pour les primaires (main) et sensiblement égales pour les cubitales (avant-bras) et les humérales (bras).

L'ensemble des primaires forme la main, séparée par le sillon de l'autre partie de l'aile, nommée éventail (fig. 8 et 9).

De part et d'autre des barbes poussent des barbules, entrecroisées pour deux barbes consécutives, et formant, dans l'ensemble, une surface tissée,

impermeable à l'air en mouvement, et imbriquée dans un sens déterminé (fig. 6).

Dans la grande lame, les barbes ont une âme verticale en dessous, formant avec les barbules comme une poutre en T. Les barres horizontales de ce T sont imbriquées, vues de dessus, comme pour

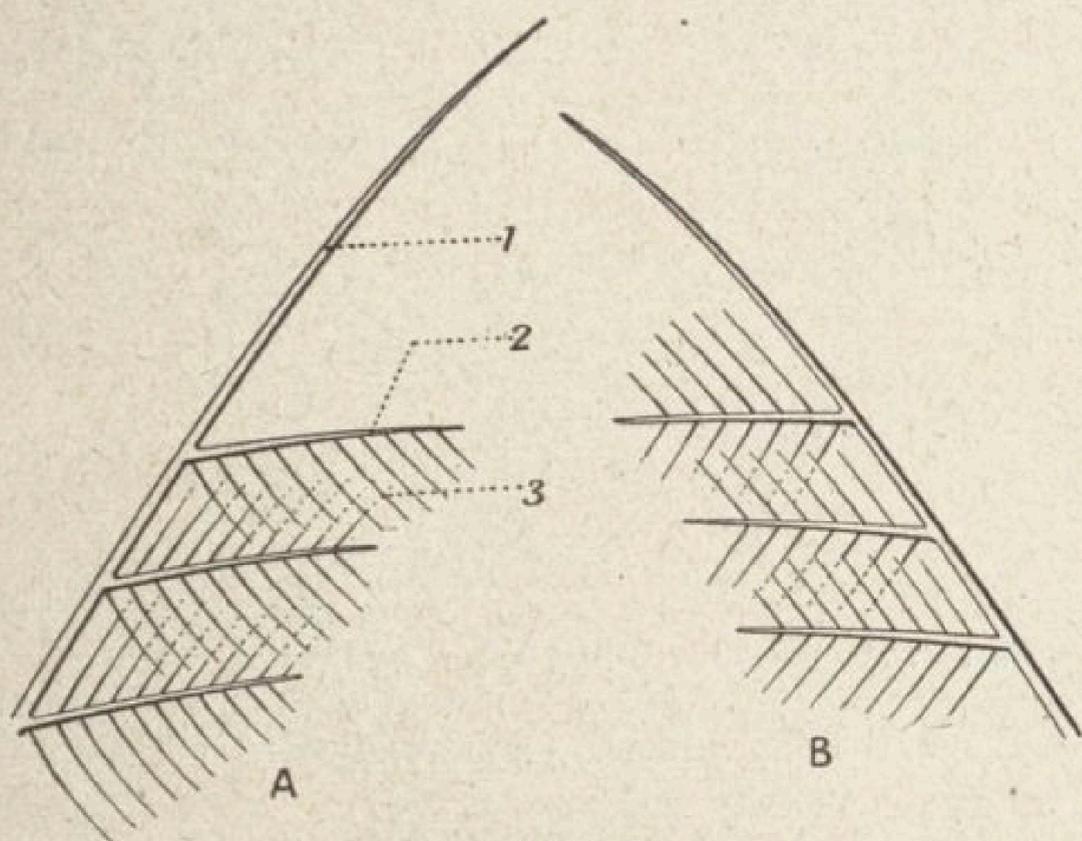


Fig. 6. — Schéma de la surface tissée d'une grande lame de remige.
A, face inférieure. B, face supérieure.
1, canon. 2, barbe. 3, barbule.

un écoulement allant sensiblement dans la direction du canon (fig. 7).

Les petites barbes de la lame étroite ont un dispositif symétrique, mais elles ont une âme dessus et dessous.

Le canon des primaires, cintré vers le bas, résiste principalement de bas en haut, normalement au plan de l'aile.

Les rémiges sont mieux que juxtaposées, elles sont imbriquées régulièrement, imbriquage dont le sens nous renseigne à la fois sur la direction de leur mutuel appui, et sur celle du courant le plus intense auquel elles sont exposées.

Par exemple, la main déployée présente en dessus un imbriquage à deux directions divergentes en *cf*d (fig. 8); elle n'éprouve donc, à l'état de déploiement, aucun frottement intense en dessus de la part des

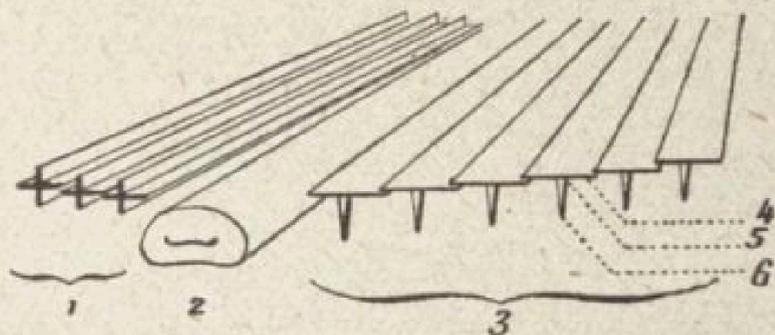


Fig. 7. — Section droite d'une rémige primaire.
1, petite lame. 2, canon côté de la pointe. 3, grande lame.
4, barbules. 5, barbe. 6, âme de la barbe.

molécules d'air. De même, dans le même cas les cubitales, à leur extrémité distale.

Au contraire, tout le dessous de l'aile étalée présente un imbriquage parfait des lames pour l'écoulement d'air de l'avant vers l'arrière, et un alignement continu des barbes d'une lame à la suivante (fig. 9). C'est l'indice d'un courant intense, dont cet alignement nous indique le sens.

La pression rend, pendant l'action, cette face convexe; sur le côté opposé, au moins vers les bords, les barbules sont souvent froissées et elles accentuent

l'aspect plus terne de ce côté, en opposition avec l'apparence brillante de la face inférieure.

Une surface brillante décèle donc la convexité usuelle coïncidant avec la résistance utile des molécules aériennes.

Les bouts des rémiges de l'éventail à la tranche postérieure de l'aile, s'échelonnent du côté interne, ceux de la main au contraire, s'alignent sur la face



Fig. 8. — Face dorsale de l'aile.

Les bouts des rémiges sont échelonnés sur la face supérieure dans les portions *a b* et *c d*, et sur l'autre face dans la portion *b c*.

Les barbes de la région *c d f* déployée sont disposées suivant des alignements divergents. *c k*, sillon.

externe, ce qui montre, par analogie avec la disposition des bouts des ressorts à lames de nos voitures, que les sens usuels d'élasticité et de plus grande activité, différent pour la main et pour l'éventail (fig. 8 et 9).

Je viens de parler de la main étalée et active à l'abaissée de l'aile, mais il existe une position de repli des deux parties de celle-ci dans laquelle la continuité des alignements de barbes et l'aspect

brillant se trouvent réalisés sur la face dorsale, en même temps que se précise l'échelonnement, sur l'autre face, des bouts de remiges, en opposition à un effort de poussée, exercé par l'air sur le dos de l'aile remontante. La disposition de l'épaulette, bouquet de plumes intercalé entre le bras et le corps, et conformé seulement pour résister à une poussée aérienne de haut en bas confirme cet effort (fig. 9).

Enfin, chez les rameurs, à la face interne de l'aile, se reconnaît, dissimulé sous un rang de couverture, un deuxième rang de plumes contre-imbriqué, c'est-à-dire dont le sens de recouvrement est opposé à celui des primaires (fig. 9).

Cette disposition s'explique et l'imbriquage en devient régulier, quand on remarque que le sillon s'ouvre à la remontée par suite d'un retard de la main sur le coude. Il se forme entre cette main et l'éventail, un dièdre, où pénètre un courant venant de la face dorsale. Le rang singulier en cause, demeurant dans le plan de la main, forme le côté antérieur de ce dièdre, et il se trouve, sur sa face profonde, normalement imbriqué pour ce courant spécial.

J'ai allégué plus haut, à propos de la force vive, que l'oiseau s'efforçait d'obtenir une action continue et efficace dans toutes les positions de l'aile : nous en avons ici la preuve.

Voici quelques autres arguments en faveur de cette activité à la remontée. Celle-ci est plus rapide

que la descente, elle est violente, au point que les deux ailes se heurtent sur le dos en claquant comme des mains qui applaudissent ; d'après les chronophotographies du goëland, elle s'accompagne de l'ouverture du bec, et des cris saccadés chez les

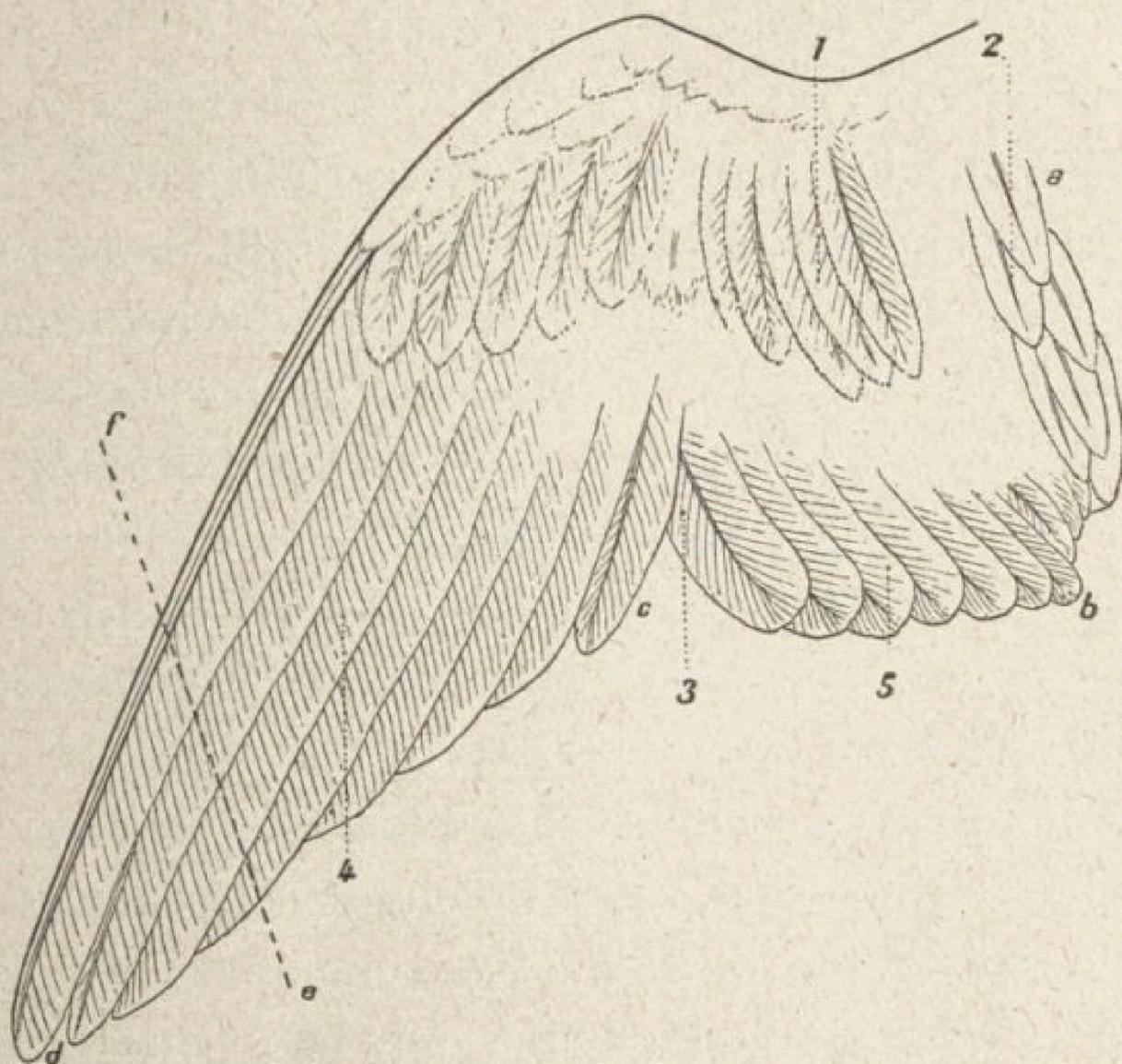


Fig. 9. — Face palmaire de l'aile du pigeon.

Les barbes des grandes lames des primaires ont toutes le même alignement *ef*. La portion de tranche *bc* a les bouts échelonnés sur la face palmaire ainsi que l'épaulette 2.

1, rang contrimbriqué. 2, épaulette. 3, sillon.
4, rémiges primaires (main ou fouet). 5, rémiges cubitales (éventail).

rameurs lourds coïncident avec elle, comme, chez le bûcheron, le boulanger, s'exhale un han vigoureux à chaque grand effort.

L'étude raisonnée des canons des remiges, d'après

les principes énoncés au chapitre suivant, confirme cette façon de voir.

Ces remarques n'épuisent pas les déductions que l'on peut tirer de la contexture des plumes, comme on s'en convaincra par les observations, d'une portée générale, résumées ci-après :

L'économie ne régit pas seulement l'effort, mais également la nutrition en un certain sens et par suite la morphogénie des organes. Si nous revenons à l'observation de la fragilité extrême de ceux-ci dans le vol naturel, nous ne pourrions douter qu'ils travaillent uniquement à la condition d'être utilisés rigoureusement dans le sens de leur plus grande résistance, et qu'ils sont dans toutes leurs dimensions, exactement proportionnés aux effets à soutenir. Sans revenir aux écailles des ailes des papillons fixées seulement par un étroit pédoncule, et qui, par conséquent, ne peuvent être normalement sollicitées que dans le sens exact de leur implantation, nous pouvons tenir pour certain, que les canons des rémiges se courbent au devant de la direction où leur élasticité est la plus mise à l'épreuve, que ces canons, ainsi que les os longs, éprouvent leur maximum de pression dans le sens exact de leur grand axe, que les barbes, en forme de règle plate, les os longs et plats, sont à l'épreuve exclusivement dans leur plan, et que les courbures ou gauchissements de ces organes opposent leur convexité dans le sens le plus favorable aux tor-

sions auxquelles ils sont normalement exposés.

Je ne dis pas que, au cours de la vie animale, les organes ne se trouvent jamais sollicités d'une autre façon que celle pour laquelle ils ont été créés : nous n'avons pas à voir ces cas exceptionnels, mais l'emploi usuel du membre considéré, la marche ou le vol, en particulier.

D'ailleurs les cas exceptionnels, quand ils surviennent, se traduisent par une fracture, une luxation, en tout cas de la douleur, et c'est encore là un argument en faveur de la précision avec laquelle doivent être observés les principes de la résistance des matériaux.

Pour appliquer ces derniers, j'ai employé surtout la méthode pratique, qui a consisté à éprouver sur l'os lui-même, comprimé entre les doigts, les effets d'écrasement ou de torsion divers. Cette méthode est très efficace pour les os des oiseaux, qui sont relativement souples, mais elle exige de la prudence, car, sous peine de bris, il ne faut pas imprimer à ces os un effort supérieur à celui que leur impose le poids de l'oiseau lui-même qui, par exemple, ne dépasse pas 200 grammes chez le pigeon.

(En contrôlant, pour les plumes comme pour les os la direction que je précise comme celle de leur plus grande résistance, on pourra trouver que la différence de rigidité en faveur du sens indiqué est souvent minime : ce grief ne saurait infirmer ma thèse, car les dits organes sont envisagés au point

de vue de leur effort usuel, lequel est intrinsèquement très faible, eu égard au poids réduit de l'animal entier.)

Voici comment la compression maxima des os est toujours dirigée suivant leur grand axe qui est

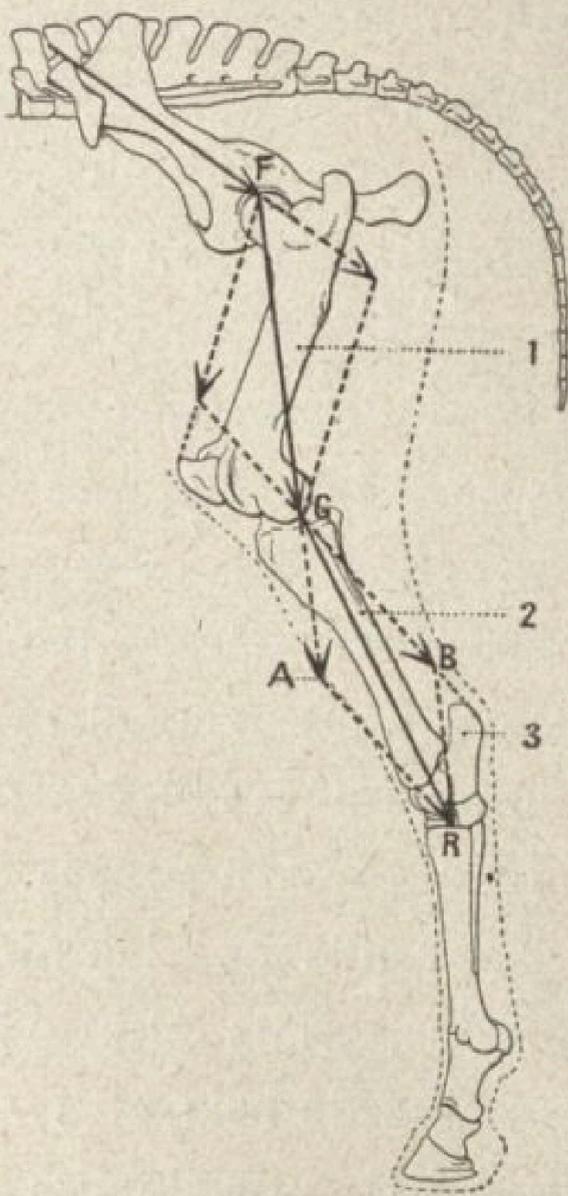


Fig. 10. — Orientation générale des os. Membre postérieur du cheval.
1, fémur. 2, tibia. 3, calcanéum.

GR, axe du tibia, orienté suivant la résultante de la poussée du fémur G A, et de la traction des extenseurs du tarse G B.

celui de meilleure résistance, même dans leurs positions plus ou moins obliques.

Par exemple, chez le cheval, au genou (fig. 10), le tibia éprouve une pression de la part du fémur,

pression que nous pouvons traduire par une force GA s'exerçant sur la tête du tibia, et dont la direction est celle des contacts du fémur : cette même tête du tibia, sur la face postérieure éprouve une traction des muscles extérieurs du tarse, le soléaire notamment, ainsi que des fléchisseurs des phalanges qui adhèrent à celle-ci et compriment la diaphyse entre cette tête et le tarse ; c'est une deuxième force composante GB : le tibia dispose son grand axe dans l'alignement de la résultante GR de ces deux composantes GA et GB ; de même les apophyses épineuses dorsales sont dirigées suivant la résultante des muscles interépineux et épineux transversaux.

Je noterai également, d'après le principe de force vive, que la variation des efforts subis par chaque os se répète suivant un cycle invariable, car dans les mouvements usuels le même ordre de contraction des muscles successifs est toujours observé.

CHAPITRE V

LOIS MORPHOGÉNIQUES

Si je n'ai jusqu'ici qu'à peine cité le principe de LAMARCK, la pensée de ce précurseur a réellement, dès le début, soutenu et facilité mes recherches.

Nous allons exposer une loi de morphogénie qui justifiera ses idées jusque dans les moindres détails et dont l'application peut résoudre, semble-t-il, la plupart des difficultés de la mécanique animale.

Les déductions ci-après s'appliquent évidemment aux cellules vivantes de toute nature, cependant, pour rester dans notre sujet, nous viserons principalement les cellules osseuses, et nous prendrons nos exemples dans le squelette des vertébrés.

Le fonctionnement perpétuel auquel les organes sont soumis ne va pas sans une grande usure (car les matériaux qui les constituent ne sauraient se dérober aux conséquences, utiles ou fâcheuses, des lois mécaniques), et, cependant, ces organes ne sont pas seulement maintenus en état par la nutrition réparatrice, mais leur restauration est telle qu'ils grandissent néanmoins, de la naissance à l'âge

adulte, et d'autant plus intensivement, nous allons le voir, qu'ils sont plus soumis à la fatigue.

C'est que la nature répare et consolide, ainsi que le ferait un bon architecte, en donnant toujours à ses étais, un excès calculé de puissance et de longueur.

M. le Professeur Richet, a d'ailleurs signalé cette tendance des organismes à l'hypertrophie de la nutrition.

Or, quand un animal, un oiseau, sent plus ou moins consciemment que son effort a un meilleur rendement dans telle direction, il agit plus spécialement, il recherche avec plus de persévérance dans cette direction, son organe s'use très exactement dans ce sens. mais, au repos, il se produit, aux mêmes points, une restauration hypertrophiée qui fait croître l'organe et le développe précisément dans la forme que l'espèce animale considérée, expérimente à chaque instant comme le plus efficace.

De plus, les points les plus fréquemment usagés sont le plus souvent renforcés avec excès, donc, croissent plus que les autres, mais suivant une direction toujours parfaitement adaptée au rôle à remplir.

Ainsi, chez tous les quadrupèdes, dont les avant-trains portent une tête particulièrement lourde, les membres antérieurs, plus stimulés, sont plus développés que les arrière-trains : tels sont le bison,

l'éléphant, la girafe, la hyène, le sanglier (dont la tête plus grosse, parce que plus fréquemment fouisseuse que celle du porc, entraîne un rehaussement des épaules plus prononcé que chez ce dernier). Citons également les pattes chez les échassiers qui, au lieu de percher, reposent sur une seule jambe, les bras du singe, plus développés que ceux de l'homme parce qu'ils sont utilisés pour la marche : rappelons, en sens opposé, le lièvre, la gerboise, le kangaroo, les oiseaux terrestres qui, dans le saut, mettent violemment en action et développent ainsi particulièrement leurs membres postérieurs.

La violence de l'effort et, plus encore, l'effet de choc, comme chez les animaux spécialement trotteurs (cervidés), est en effet, un facteur primordial de développement des os : le squelette des reptiles, des poissons, des sauriens, dont les mouvements sont, d'ordinaire, dépourvus de vivacité, ne présente que des os courts.

Chez ces derniers toutefois, les mâchoires, seul organe chargé de capturer la proie, donc d'agir avec promptitude, ont acquis un grand développement parce qu'elles sont commandées par des muscles rapides. L'animal avalant sans mâcher, ses maxillaires sont plats, alors que ceux des mammifères s'épaissent de bas en haut, croissant de champ contre l'effort de mastication. Le maxillaire supérieur des rongeurs réagit en s'allongeant contre la compression continue imposée aux incisives supérieures.

Les os de la face, prohéminents chez les herbivores, dont les lèvres ont un rôle préhensif, ou dont le museau et la mâchoire inférieure sont très mobiles, voient leur saillie diminuer chez les félins et les primates qui substituent à l'action de ces lèvres des membres préhensifs de plus en plus parfaits.

Pour les os, en effet, l'usure fonctionnelle, génératrice de croissance, est surtout due à des effets d'écrasement, de tassement. Plus rarement, des efforts de distension interviennent. La cause n'en est pas seulement la pesanteur, mais souvent les efforts des muscles fixés à l'os considéré et qui compriment contre sa facette articulaire l'os suivant qu'il s'agit de mouvoir. Cette compression se compose, comme je l'ai dit, avec la poussée due à l'os précédent, pour donner une résultante contre laquelle l'os considéré croît plus ou moins suivant que les deux composantes se présentent plus ou moins obliquement. Comme, dans les mouvements usuels, il y a un ordre régulier, toujours le même dans les différents muscles successivement contractés, la résultante a une oscillation de sens régulier. Cette résultante devant trouver toujours une génératrice osseuse qui lui soit exactement opposée, c'est ainsi que se créent les os à moelle, os longs, engendrés par une compression s'exerçant suivant leur grand axe, mais avec une légère variation circulaire génératrice de leur paroi cylindrique.

Si ces variations, accompagnant la compression, se maintiennent sensiblement dans un même plan, la section droite de ces os longs devient elliptique ou même fusiforme, comme celle des apophyses épineuses dorsales ou des transverses lombaires des ruminants.

Si un effort de torsion s'exerce sur la diaphyse, toujours dans un même sens, la spire osseuse la plus comprimée surpasse en croissance les parties voisines et donne à l'os long un gauchissement caractéristique (humérus du pigeon, génératrice externe ; os externe du métacarpe, etc.) (fig. 11).

Enfin, si au cours du cycle usuel des compressions, une torsion s'exerce alternativement en deux sens opposés, il se substitue au gauchissement une courbure simple, dont la génératrice convexe est une moyenne des spires croissantes engendrées dans le cas précédent (Cubitus, fig. 11).

La forme parfaitement rectiligne du radius 4 nous apprend au contraire que, dans toutes ses participations aux mouvements de l'aile, cet os travaille exactement dans le sens de son grand axe : poussé par le pivotement de l'humérus (actionné en 5 par le muscle grand pectoral) et glissant en longueur dans l'avant-bras, il a pour rôle d'appuyer sur la main et d'imprimer à celle-ci un mouvement de supination prononcé à l'abaissée de l'aile. L'os du métacarpe est archouté exactement en vue de cet effort. Quant à l'humérus, sollicité à pivoter à

l'épaule par le grand pectoral, péniblement obéi par le radius au coude, il se gauchit entre ces deux points pour contraindre le radius à glisser.

Le cubitus est soumis à une première torsion, à l'abaissée, par le coude qui l'entraîne, alors que la

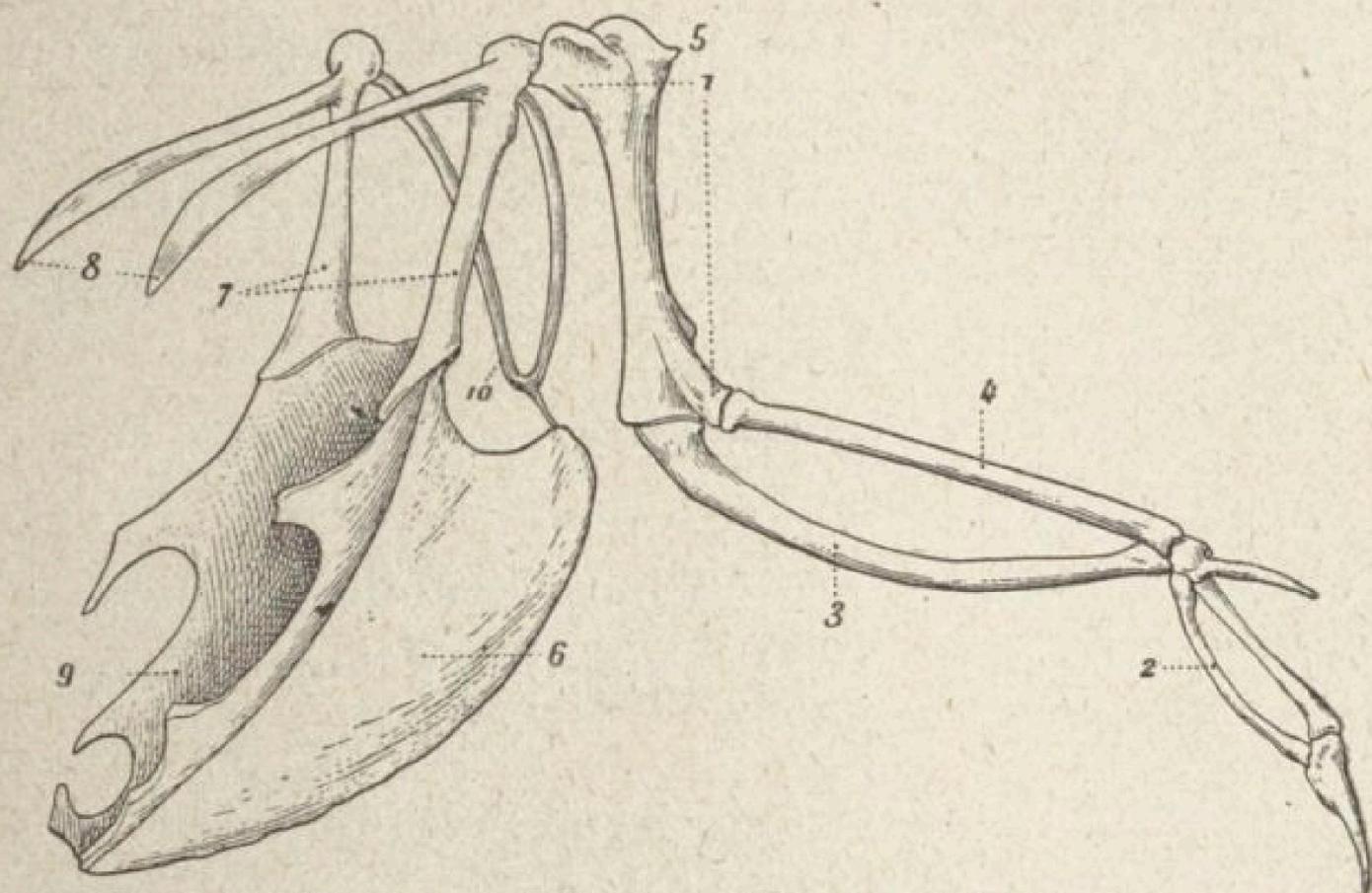


Fig. 11. — Squelette de l'appareil moteur du pigeon : aile droite.

- 1, gauchissement de la génératrice externe de l'humérus ; 2, gauchissement du métacarpe ; 3, courbure simple du cubitus ; 4, radius rectiligne ; 5, insertion du grand pectoral (sur la face interne) ; 6, bréchet (type d'os plan) ; 7, coracoïdes ; 8, omoplates] ; 9, bouclier ; 10, clavicule.

main est retardée par la résistance de l'air ; à la remontée se prononce une torsion inverse, due à la résistance éprouvée, cette fois, sur le dos de la main, alors que le coude recule plus vite que cette

dernière. La génératrice arrière du cubitus prend, en définitive, une forme convexe qui est la moyenne entre ces deux torsions.

Les côtes sont dues à une compression qui, pendant deux phases distinctes, s'exerce de l'extrémité distale vers le rachis; elle s'accompagne, dans la première phase, d'une traction vers l'avant, et dans la deuxième, d'une traction vers l'arrière (d'où résulte la section aplatie de la côte); puis, vers la fin de l'une et l'autre phase, d'un effort d'abduction contre lequel la côte réagit par une courbure générale en dedans.

Les efforts musculaires violents exigent des adhérences étendues et bien fixées, et l'extension des muscles utiles crée un os plat, comme le bréchet des oiseaux (fig. 11), la saillie tibiale du kangaroo, etc.

Ce bréchet est dû à la traction simultanée des deux pectoraux, et il s'est développé en croissant, tant vers l'arrière qu'au voisinage des deux coracoïdes contre lesquels il est comprimé par ces tractions. Plus le synchronisme des muscles insérés de part et d'autre de l'os est parfait, plus celui-ci est plan et mince, mais il se peut que le muscle ne couvre qu'une seule face, alors la surface osseuse devient convexe et tangente à l'effort; la partie du sternum nommée bouclier (fig. 11), les os du bassin des oiseaux, ceux du crâne en général, en donnent des exemples.

Nous demanderons-nous pourquoi ce bassin, ce crâne, présentent des sutures où la fusion reste longtemps incomplète ? — C'est parce que chaque pièce est modelée par l'effort des muscles adhérents dans un sens différent de sa voisine, et que la soudure ne doit être que provisoire pour s'adapter toujours aux variations de croissance des deux os juxtaposés.

Au lieu d'efforts de compression, l'os peut être soumis à des efforts de distension.

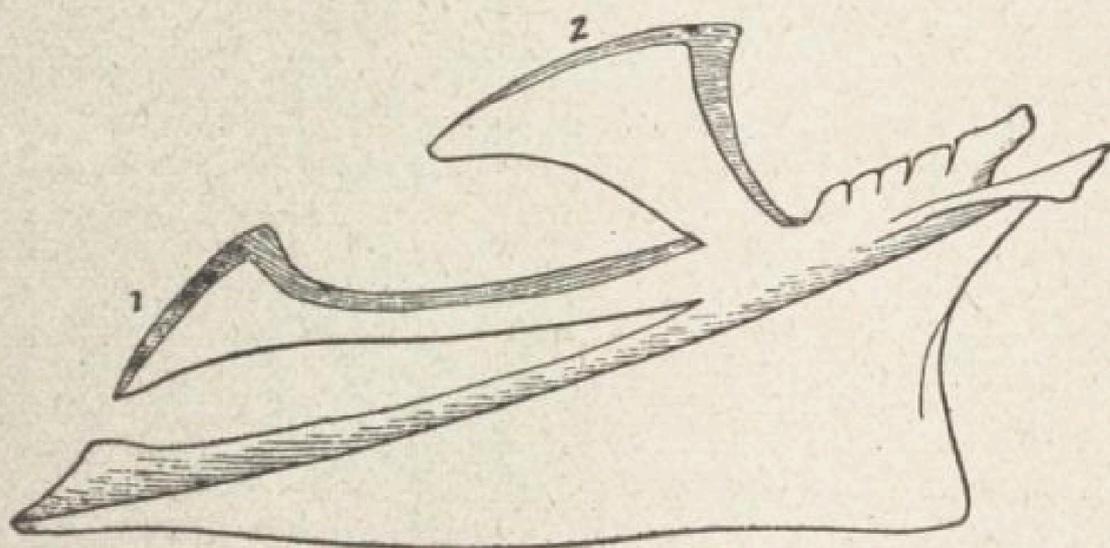


Fig. 12. — Sternum de poule.

1, 2, expansions terminales des branches du bouclier.

Chez la poule, les branches du bouclier sternal (fig. 12) sont réunies par des aponévroses sur lesquelles s'insère et tire le grand pectoral à la descente de l'aile. De son côté, la queue agit fréquemment en sens opposé, pour la sustentation ou l'équilibre, sur les muscles et aponévroses qui joignent par leur extrémité distale 1, 2, ces branches au bassin, et, pour s'assurer une meilleure adhérence,

ces muscles développent cette extrémité dans le sens transversal.

Les mêmes effets de distension interviennent dans le cas des os courts. Les ligaments qui relient deux os de cette nature exercent, pendant le fonctionnement de l'articulation, des effets d'arrachement contre lesquels l'os réagit en s'élargissant, ce qui épaisse l'os, s'il est court, et ce qui grossit les épiphyses des os longs.

Parmi les séries osseuses, le rachis est dans ce cas pour la portion entre les ceintures : les corps vertébraux sont courts et larges parce que les efforts des ligaments prédominent. C'est le contraire, en général, pour le cou et la queue.

Dans ces deux organes, l'allongement de chaque corps vertébral est dû aux efforts de compression qu'il subit alternativement sur chacune de ses génératrices par l'effet des contractions musculaires destinées à le courber en tous les sens.

Ces compressions se produisent principalement quand l'extrémité distale de la colonne étant fixée, l'alignement osseux est soumis à des ondulations et flexions intenses, flexions volontaires de la part de l'animal ; par exemple :

Quand la girafe ayant saisi entre ses dents une feuille de palmier, agite et cintre violemment le cou en tous sens pour l'arracher.

Quand l'oiseau de marais poursuit un serpent, une grenouille dans les anfractuosités de la rive

ou quand il doit amortir leurs secousses après la capture. (Les oiseaux exclusivement piscivores ont le cou moins développé).

Quand le vautour déchire une chair coriace, quand les herbivores arrachent leur nourriture par une flexion du col, quand la queue d'un félin, servant d'équilibreur, a son extrémité virtuellement fixée par l'inertie, et qu'il l'agite violemment pour sauter ou se maintenir sur sa proie.

Par contre, les cervicales des félins, qui emportent cette proie dans la gueule, sont plus élargies par les ligaments qu'allongées par les muscles. Le cou du porc, qui doit être maintenu rigide pendant le fouissement, a des vertèbres encore plus courtes et plus élargies.

En raison du mode de formation des os à moelle exposé plus haut, on comprend que les inflexions de la section droite d'un tel os sont fonction des variations de pression du cycle musculaire créateur, en sorte que, la plus grande dimension de l'os s'opposant perpétuellement à l'effort principal, on peut dire :

« Le grand axe d'un os long exprime son rôle dans l'espace, et sa section droite traduit les variations de ce rôle dans le temps. » Un exemple fera mieux saisir ce principe.

Le tibia humain a surtout crû de bas en haut, c'est-à-dire qu'il a orienté verticalement son grand axe, à l'encontre du poids du corps qui excerce sur lui

l'effort le plus intense et le plus constant. Nous pensons que si l'homme (il s'agit de l'espèce et non d'un individu) restait toute sa vie *immobilisé* debout, ce tibia, comme tout autre os, croîtrait exactement *cylindrique* ; mais la marche intervient avec une extrême fréquence et, pendant celle-ci, la pesanteur, si elle agit toujours suivant la verticale, appuie sur cet os tantôt un peu plus en dedans qu'elle ne le ferait dans la station simple, tantôt plus en avant, puis plus en dehors, enfin, à nouveau, plus en dedans et ainsi de suite, dans le même ordre, au cours des appuis successifs du membre. Le tibia, en vue d'une résistance plus efficace, adopte ainsi une coupe transversale triangulaire, sommet en avant, au lieu d'une section exactement circulaire.

C'est pourquoi nous croyons pouvoir dire que les inflexions de cette coupe transversale traduisent les phases successives du rôle de support dévolu à l'os considéré.

Les exemples ci-dessus, puisés dans l'anatomie comparée des animaux adultes, sont confirmés par les phases de l'évolution des espèces prises en particulier.

Cette évolution, nous le savons, est résumée dans le développement de l'individu.

Prenons l'homme comme exemple : il est de notoriété que la longueur de nos bras a triplé de l'enfance à l'âge adulte alors que la longueur des jambes à sextuplé.

Si le coefficient de croissance des jambes est beaucoup plus élevé que celui des bras, la cause n'en est-elle pas, en conformité avec les remarques qui précèdent, au fait que les jambes, supportant constamment le poids entier du corps, ont fourni chaque jour, et au cours de la vie de l'espèce, un travail beaucoup plus considérable que les bras ?

Par suite, à la loi précédente, qui permet de déterminer les rôles respectifs des os dans le squelette, ne pouvons-nous ajouter la suivante ?

« Si l'on compare, dans chaque espèce, les dimensions respectives des os du nouveau-né et de l'adulte, les différents coefficients de croissance de ces os sont proportionnels aux efforts usuels qui leur sont imposés ».

Enfin, pour le cas d'un os isolé, nous ajouterons avec vraisemblance :

« L'effort subi suivant une dimension donnée, par une pièce osseuse, est mesuré en direction et en intensité par ladite dimension, à compter du point d'ossification. »

Nous ouvrirons ici une parenthèse : Si LAMARCK, puis WILHELM ROUX, sous le nom d'excitation fonctionnelle, ont déjà évoqué ces idées, il y a cependant, selon nous, un progrès à retenir dans notre interprétation, du fait que nous introduisons l'idée d'usure comme condition de la croissance hypertrophiée.

Et nous distinguons deux sortes d'usure : la pre-

mière, fonctionnelle, qui affecte l'organe dans toutes ses parties internes, et notamment dans ses réseaux nerveux et nourriciers, lesquels se reconstituent et s'amplifient par les mêmes causes, et, d'autre part, l'usure externe, due uniquement au frottement de contact avec les organes voisins, usure qui subsiste seule quand nous avons affaire à un organe inutilisé, dont la fonction est caduque, usure qui, n'étant plus compensée puisque les réseaux nourriciers n'ont aucune excitation fonctionnelle, suffit à entraîner la régression, la dégénérescence dudit organe. Répétons que ces faits de croissance et de régression, qui affectent exactement et strictement les points mis en œuvre s'appliquent non pas au développement de l'individu, mais à celui de l'espèce (1).

Nous étudierons en d'autres circonstances les développements importants dont ces principes paraissent susceptibles en biologie générale (2).

Pour en revenir à la mécanique de l'oiseau, quelles déductions fructueuses ne doivent-elles pas résulter

1. Ces données établissent, semble-t-il, une concordance parfaite entre la loi d'évolution de LAMARCK et la loi de corrélation de CUVIER. la seconde se déduisant naturellement de la première.

2. Cette thèse nous donne l'explication la plus plausible, semble-t-il, de la disparition des grandes espèces terrestres antédiluviennes. Au cours du développement de celles-ci, les os ont acquis, en vertu de la loi de croissance, des dimensions absolues de plus en plus grandes ; mais leur matière constitutive est demeurée du carbonate de chaux, alors que, eu égard au module atteint, pour résister au poids croissant

des méthodes qui précèdent, appliquées d'une part aux squelettes des rameurs, des planeurs et des voiliers, et, d'autre part, à l'étude des coefficients de croissance des os de chaque type en particulier ?

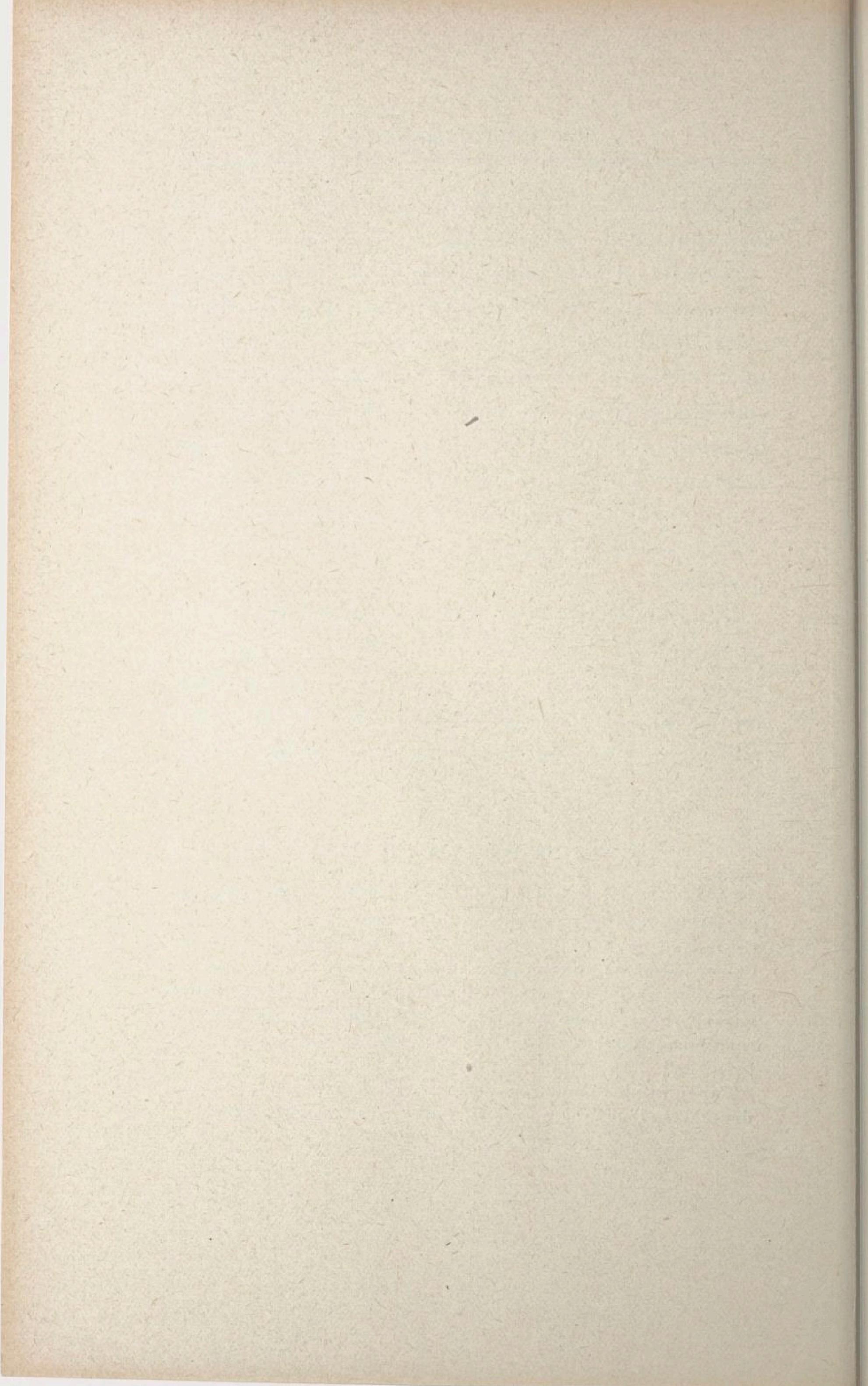
Car des différences de proportion de même genre que celles qui existent entre l'enfant et l'adulte se retrouvent entre les squelettes du pigeonneau et du pigeon, ceux de l'aiglon et de l'aigle, etc., et en relevant ces différences, je suis fondé à dire qu'elles proviennent de la recherche du perfectionnement dans le mode de vol particulier à chacune de ces espèces.

L'anatomie ainsi comprise, nous donnera à la fois la statique et la dynamique du mécanisme animal : il nous suffira de la rapprocher des images cinématographiques à notre disposition pour déduire tout à la fois le principe du vol et la réalisation de l'appareil.

à soutenir, il leur aurait fallu se constituer en ciment armé si je puis dire.

L'espèce grandissant toujours, ces cylindres de carbonate se sont trouvés trop fragiles à un moment donné et les accidents sont devenus la règle pour les membres de l'animal. Ceux-ci ne pouvant plus jouer leur rôle, précisément dans le sens vers lequel ils s'étaient développés, et tous les autres organes, exactement adaptés à eux, ne pouvant se modifier rapidement pour remédier à cette défaillance, l'espèce à disparu.

Par contre les monstres marins, moins exposés aux accidents dans leur milieu spécial, ont survécu jusqu'à nos jours.



TROISIÈME PARTIE

PROPRIÉTÉS DU MILIEU AMBIANT

CHAPITRE VI

ROLE PASSIF

Les derniers chapitres nous ont montré comment devait être abordée l'étude du propulseur animal.

Ce n'est là que la première moitié de la question : le milieu dans lequel il évolue et prend appui exige à son tour une étude approfondie, d'autant plus que ce milieu intervient non seulement à titre passif, ainsi qu'il est communément admis, mais activement, tout autant que la machine elle-même comme nous le montrerons au chapitre suivant.

Tout corps en mouvement dans un fluide subit de la part de celui-ci une résistance variable suivant la surface que ce corps présente dans le sens de l'avancement, nous dirons suivant son maître-couple, et aussi suivant l'orientation de cette

surface par rapport à la direction du mouvement.

La théorie n'est pas parvenue, jusqu'à présent, à exprimer par une formule exacte la grandeur de cette résistance, et si nous savons par l'expérience qu'un profil piriforme ou pisciforme, c'est-à-dire renflé à peu près sphériquement en avant et finissant en pointe vers l'arrière, est celui pour lequel cette résistance est minima, nous ne disposons pas non plus d'une formule certaine pour le tracé de ce profil (1).

Nous allons proposer un mode de recherche de cette dernière formule ; nous le baserons sur les deux postulats suivants :

1° Le poids d'une molécule d'air en déplacement dans le milieu aérien n'a pas d'effet sur sa trajectoire puisque, plongée dans un fluide de même densité qu'elle, elle n'a aucune pesanteur apparente, (principe d'Archimède). Seule donc son inertie est en jeu et quelle que soit, par rapport à la verticale,

1. Il est réalisé dans le corps des oiseaux et celui des poissons dans le contour des tas de sable embrassés par un courant d'eau, etc .. à ce sujet, M. Bazin, cité par Ernoult dans son ouvrage *L'Aviation de demain*, p. 15, signale l'expérience suivante :

Prenez un pain de savon parallépipédique, fixez-le au bout d'une longue ficelle, puis remorquez-le (autant que possible hors du sillage) dans l'eau derrière un bateau rapide : au bout de quelques minutes, retirez-le, il aura pris naturellement une forme de fuseau qu'il conservera tant qu'il restera du savon autour de la ficelle.

l'orientation du choc éprouvé, ladite trajectoire ne peut être qu'une ligne droite.

2° Par réciprocité avec le principe émis au chapitre suivant, l'effet de la pression atmosphérique sur cette molécule est tel que son mouvement sur ladite trajectoire, au cas d'un choc non renouvelé est un mouvement uniformément retardé d'accélération négative 981. Considérons un mobile ayant la forme optima rappelée plus haut. Soit A D E F.

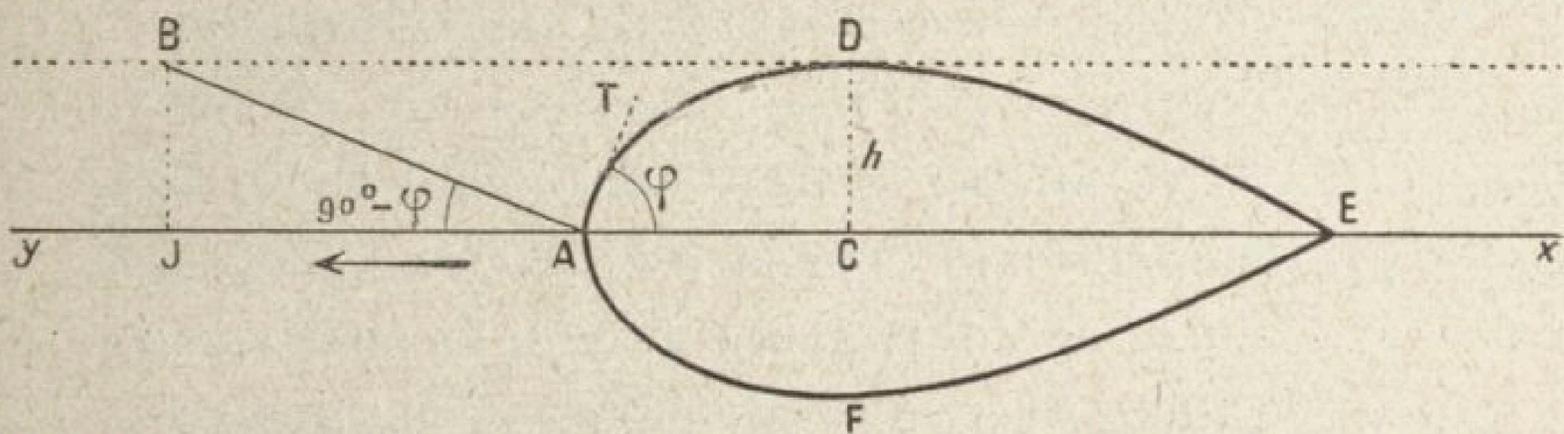


Fig. 13. — Profil bolique.

AD et DE, portions de paraboles. AT tangente en proue.

DC = h , demi-maitre couple; ABJ. trajectoire totale de la molécule.

La section plane suivant l'axe de révolution, xy ledit mobile se déplaçant à une vitesse uniforme v , sur cet axe dans le sens xy (fig. 13).

Etant donnée la symétrie du profil par rapport à xy , nous n'avons pas à discuter ce problème pour l'ensemble du contour A D E F, ni même pour la partie F A D renfermant le maitre-couple, mais seulement pour une moitié, par exemple A D E, un raisonnement identique s'appliquera à l'autre moitié A F E en adoptant une formule symétrique de la première.

Tout d'abord, nous nous bornerons à l'étude de la courbe antérieure A D délimitant le demi-maitre-couple C D = h. La partie de poupe sera ensuite examinée.

Si nous considérons une molécule d'air située sur l'axe de progression, en A, elle va être écartée de ce point et transportée en un point B à déterminer.

Le travail produit pour son déplacement sera évidemment minimum si ce dernier s'effectue par le plus court chemin, c'est-à-dire en ligne droite et si, en outre, la molécule, qui part brusquement du point A à la vitesse v , arrive en B avec une vitesse nulle, de façon à ne dépenser aucune énergie superflue. Enfin, le point B devra être lui-même situé sur une parallèle à l'axe xy menée par le point le plus haut du demi-maitre-couple, en D, de telle sorte que la molécule ne soit chassée que jusqu'au point exact où elle sera hors du sillage du mobile.

Ajoutons à ces conditions, celle qui découle du deuxième postulat précité, à savoir que de A à B la vitesse de la molécule décroîtra de v à zéro suivant une accélération négative $K = -981$.

Le problème revient alors à déterminer pour notre demi-profil, une courbe telle qu'en se déplaçant sur xy dans le sens xy à une vitesse uniforme v , elle intercepte sur une oblique A B faisant avec xy un angle $(90 - \varphi)$ des longueurs en progression géométrique décroissante de raison K . (En adoptant la notation $90 - \varphi$ nous désignons par φ l'angle de la

tangente à la courbe au point A, tangente qui doit être normale à A B pour que la propulsion initiale de la molécule s'effectue exactement dans la direction A B). Le mobile qui aura un tel profil, après avoir brusquement communiqué à la molécule une vitesse v , restera ensuite simplement en contact avec elle sans la pousser en avant ni rester en retard sur elle, jusqu'à l'instant où la vitesse de celle-ci sera nulle, et où elle se trouvera écartée de l'axe d'une quantité exactement égale au demi-maître-couple h .

La molécule n'étant pas poussée sur la trajectoire A B par une paroi normale à xy , mais bien par une action qui, au début tout au moins, est liée à la direction de la tangente à l'origine, la vitesse v , du mobile se trouve réduite, pour cette molécule, proportionnellement à l'angle de ladite tangente avec xy .

La vitesse initiale à adopter sur A B est donc, $v \sin \varphi$.

Construisons en coordonnées rectangulaires la courbe des espaces en mouvement uniformément retardé :

$$y = V \sin \varphi x - \frac{kx^2}{2}$$

Dans cette courbe les y représentent les espaces successivement parcourus et totalisés, portés sur des ordonnées dont les distances respectives sont égales à l'unité de temps.

Si (indépendamment de la dimension fixée pour

le demi-maître-couple), nous adoptons ce profil pour notre proue, ces ordonnées, qui sont censées porter la molécule d'air à leur extrémité, se succéderaient non pas à raison d'une par unité de temps, mais, suivant la vitesse du mobile, à raison de v par unité de temps, en sorte que l'ascension de notre molécule serait v fois trop rapide. Il faut donc espacer ces ordonnées en prenant pour unité de temps une longueur v fois plus petite, c'est-à-dire remplaçant x par $\frac{x}{v}$.

Nous devons enfin supposer que les ordonnées sur lesquelles la molécule se déplace sont, non pas normales à l'axe xy , mais font avec lui, côté ox un angle $90 + \varphi$, c'est-à-dire considérer notre formule comme s'appliquant à une courbe construite dans un système de coordonnées obliques d'angle $90 + \varphi$.

En outre, si, pour éviter un axe de courbe parallèle à oy , nous faisons de ox l'axe oy et de oy' l'axe ox l'équation du profil cherché sera, après réduction :

$$K y^2 - 2 v^2 \sin \varphi y - 2 v^2 x = 0.$$

C'est l'équation d'une parabole dont la tangente au point D est parallèle à xy .

Reste à calculer $\sin \varphi$.

Si nous désignons par e la longueur A B et par t le temps mis à la parcourir, nous avons entre ces diverses valeurs les 3 relations ci-après d'où nous déduirons la formule demandée :

$$e = vt - \frac{1}{2}K t^2$$

$$v = K t$$

$$h = e \cos \varphi$$

La mise en équation nous conduit à la formule :

$$\cos^3 \varphi - \cos \varphi - \frac{2kh}{V^2} = 0$$

Les racines, réelles ou imaginaires, correspondent aux trois cas :

$$h < e, h = e, h > e$$

Eu égard aux données du problème, les deux premiers cas sont seuls à envisager et la solution n'est effective que si le rapport entre la vitesse du mobile et son maître-couple reste dans les limites

définies par l'inégalité $h < \frac{v^2}{2k}$.

$$1^{\text{er}} \text{ cas : } h < \frac{v^2}{2k}, \left(e = \frac{v^2}{2k} \right)$$

La trajectoire oblique, de longueur e bien déterminée, s'intercale entre le point A et la parallèle DB et elle donne la direction prise par la molécule à l'exclusion de toute autre, étant admis que le mouvement de celle-ci est régi par notre deuxième postulat.

$$2^{\text{o}} \text{ cas : } h = \frac{v^2}{2k}$$

Alors la molécule est maintenue par la nécessité du même postulat sur une trajectoire exactement

perpendiculaire à l'axe et elle arrive à l'extrémité du demi-maitre-couple à la vitesse zéro.

Dans le cas où h est inférieur à $\frac{v^2}{2k}$, il n'est pas possible de satisfaire au deuxième postulat dans un espace égal à h , en partant d'une vitesse de valeur v ; le problème doit être abordé avec d'autres données.

Eu résumé, le groupe de molécules situé sur la voie du mobile subit un entraînement vers l'avant d'autant plus prononcé que la vitesse est plus grande, ou, pour une même vitesse, que le maitre-couple est plus petit.

La courbe ainsi obtenue constitue seulement la proue jusqu'au point le plus haut en D : celle de la poupe D F semble devoir être établie en partant du diagramme donné par l'appareil du Général Morin, soit l'arc de parabole décrit par la succession des molécules quittant, à la vitesse zéro, la parallèle à xy menée par le point le plus haut D pour se rendre, par une chute normale à la trajectoire, jusqu'à celle-ci, d'un mouvement uniformément accéléré, d'accélération $k = 981$, elle est donc de la forme $2y^2 - kvx = 0$.

Dans ce qui suivra, nous nommerons, pour simplifier, *profil bolique* le profil ainsi réalisé. Au total la trajectoire de chaque molécule, du début à la fin du passage du mobile, se composerait d'une oblique ascensionnelle AB suivie d'une verticale redescendante jusqu'à l'axe xy , B J.

Pour répondre à diverses objections que pourrait soulever cette étude, nous remarquerons que, hormis le point A, il n'y a pas lieu, dans les diverses positions de la molécule sur sa trajectoire, de relever que celle-ci n'est plus normale au profil, ni de décomposer la force d'inertie en deux résultantes, l'une normale, l'autre tangente au profil, car, par hypothèse, le mobile n'a plus d'inertie à vaincre au-delà du point A ; il se borne à rester au contact de la molécule qui fuit sous la seule impulsion initiale, sans la pousser ni rester en deçà d'elle.

Le mobile, au cours de son mouvement, doit également déplacer les molécules non situées sur l'axe et comprises entre celui-ci et sa parallèle menée par D : en particulier, toutes celles qui s'alignent en avant de A sur la trajectoire AB.

Pour celles-ci, eu égard à notre deuxième postulat, il semble que nous puissions admettre qu'elles fuient dans la direction AB d'un mouvement uniformément retardé en partant de vitesses initiales réduites proportionnellement à leur distance du point A du profil : et ceci s'applique à tout l'espace balayé par le $1/2$ maître-couple puisque cet espace est également balayé par la trajectoire AB, fictivement liée au mobile dans son mouvement.

Cette supposition revient à imaginer que le groupe entier des molécules compris entre les parallèles DB et xy est manœuvré avec un minimum de déplacement de façon à ce que sa base xy glisse

régulièrement sur la proue du mobile pour venir se placer dans une position parallèle à la première et à une distance de celle-ci qui se projette sur la normale à xy suivant une longueur égale au demi-maître-couple.

Il est d'ailleurs certain que ces considérations perdent de leur précision si, au lieu d'une section plane, on envisage un solide de révolution, mais avons-nous reconnu une plus grande certitude dans nos vérifications de la fameuse formule :

$$R = K S v^2 \sin \alpha ?$$

Les nôtres paraissent s'appliquer aussi bien aux gaz qu'aux liquides, toutefois, en ce qui concerne ces derniers, c'est la pression hydrostatique qui est en jeu et comme son intensité est variable avec la profondeur, nous serions fondés, dans ce cas particulier, à limiter nos conclusions aux sections planes horizontales du corps en mouvement.

Enfin, il n'apparaît pas, *à priori*, que le raisonnement qui nous a conduit aux formules ci-dessus soit applicable au cas inverse où il s'agit d'un corps immobile dans un fluide en mouvement. Toutefois, le résultat expérimental semble être le même et nous observons que dans le dessin des mouvements du liquide reproduit par MAREY pour ce dernier cas (*Le mouvement*, fig. 70, p. 97) l'obliquité de l'une des 2 trajectoires rectilignes divergeant du sommet avant dans notre profil complet, est nettement indiquée.

Probablement faut-il admettre ici que ces deux obliques ne sont plus des trajectoires réelles de molécules, mais seulement des limites marquant les points où commence une réduction progressive de la vitesse de celles-ci. Elles viendraient à la rencontre de l'objet suivant une direction qui resterait parallèle à xy jusqu'à son croisement avec l'oblique $A B$, et qui, à partir de là, contournerait le profil.

Si, dans les exemples que nous connaissons, l'extrême proue est émoussée alors qu'elle devrait présenter sur l'axe l'angle saillant résultant de la juxtaposition des deux demi-profilés symétriques, il est naturel d'attribuer ce fait à l'action des irrégularités de progression et des changements de direction, soit du corps, soit du fluide, suivant le cas envisagé.

CHAPITRE VII

ROLE ACTIF

Nous allons étudier maintenant l'activité propre du milieu fluide dans la progression animale, et plus particulièrement, celle de l'air dans les différents genres de vol.

Nous remarquerons tout d'abord que, lorsqu'on fait brusquement le vide en un lieu donné, l'air de l'atmosphère s'y précipite en obéissant aux lois de la pesanteur, c'est-à-dire d'un mouvement uniformément accéléré dont l'accélération K est égale à 981 : ce fait se traduit par exemple quand on soulève vivement le piston d'une pompe, par l'ascension de l'eau qui suit le piston sous la poussée de l'air extérieur ; un tel mouvement rend tangible la chute de cet air dans la direction du vide créé.

Si le retrait du piston est très rapide, il est certain que l'eau ne parvient pas à rester au début au contact de celui-ci et qu'elle ne l'atteint que par une ascension de mouvement uniformément accéléré selon la loi très générale précitée. Nous ajoutons que cette précipitation accélérée de la masse d'air

dans un vide antérieur, a lieu suivant la même loi, *quelle que soit la direction du tube et du piston, vertical ou oblique, de bas en haut ou autrement.*

Pour recourir à un autre exemple, nous dirons que si l'on fait abstraction de tous frottements dans les tubes qui servent au transport des correspondances pneumatiques, et en admettant que le mode de propulsion utilisé pour les boîtes soit une production de vide en avant de celles-ci, lesdites boîtes dont le déplacement traduit la chute atmosphérique propulsive, se meuvent d'un mouvement uniformément accéléré dont l'accélération est $K = 981$ quelle que soit l'orientation du tube par rapport aux trois dimensions de l'espace et à la verticale du lieu.

Nous résumerons cette idée sous forme du principe suivant :

« Etant donné un groupe de molécules d'air en communication avec l'air libre, ce groupe placé subitement en présence d'un vide, est rigoureusement assujetti aux lois de la chute des corps, avec cette particularité que (par suite de la fluidité du milieu qui permet à la pression atmosphérique de s'exercer dans tous les sens) la direction de chute, déterminée par la situation du vide par rapport au groupe, peut être absolument quelconque eu égard aux trois dimensions de l'espace, en particulier elle peut être ascensionnelle obliquement ou parallèlement à la verticale du lieu (1).

1. Ce principe rappelle la loi de chute d'un caillou aban-

Imaginez maintenant que l'oiseau, par divers artifices que décèle son anatomie, obtienne un certain vide, par exemple sur le dessus de l'aile descendante et tout le long d'une bande étroite voisine de sa tranche postérieure, c'est-à-dire dans la partie où la souplesse des rémiges dessine, en phase active, une concavité vers le haut.

Eu égard au profil bolique de son corps et de la tranche antérieure de son aile, il ne rencontre dans le sens de la progression que la résistance due à l'inertie de l'air.

Or, pour un vent de 30 mètres à la seconde cet

donné à lui-même et tombant naturellement : partant de là, nous avons envisagé le cas d'un caillou que nous lançons de bas en haut et qui quitte notre main avec une vitesse v . Il monte d'un mouvement uniformément retardé d'accélération K ; jusqu'à la vitesse zéro. Eh bien, de même que notre dernier principe généralise à toutes les directions, quand il s'agit de la pression atmosphérique, la loi de chute d'un corps dans le sens vertical, on pourrait supposer que les molécules atmosphériques lancées sous l'effet d'un choc dans une direction arbitraire se conforment dans cette direction à la loi d'ascension verticale du caillou, ce qui justifierait notre 2^e postulat du chapitre précédent. L'exactitude des raisonnements des chapitres VII et VIII ne dépend nullement d'ailleurs de celle de ce 2^e postulat.

Reprenant cette idée du caillou lancé de bas en haut nous pouvons supposer que la main, sitôt après lui avoir communiqué la vitesse v , l'accompagne en le touchant simplement en dessous sans accomplir désormais aucun effort sur lui jusqu'à ce que sa vitesse soit devenue nulle : c'est exactement ce rôle de la main que nous avons voulu réaliser dans la recherche du profil de proue exposé plus haut.

effet est évalué à 10 grammes par centimètre carré de surface normale au vent, il est donc fort réduit dans le cas d'un maître-couple aussi profilé que celui de l'oiseau. Par contre, l'aile postérieure éprouve de la part de la pression atmosphérique s'exerçant en dessous et non équilibrée en dessus une poussée de 1 kgr. 033 par centimètre carré. La différence est de 1.023 grammes en faveur de cette dernière et le principe que nous venons d'énoncer entrant en jeu, l'aile se trouve propulsée par cette pression qui agit dans la direction du vide entraînant les extrémités recourbées des rémiges placées en écran entre l'air inférieur et la dépression du dessus.

Nous voyons bien que le vide absolu n'est pas réalisable dans les conditions envisagées et M. TATIN a souligné que nous sommes loin de la vitesse de 416 mètres par seconde qui serait nécessaire pour obtenir ce vide, mais il est d'autres moyens qu'une grande vitesse pour y parvenir et d'ailleurs, au point de vue pratique, si nous considérons un pigeon du poids de 200 grammes il n'a nul besoin de produire un vide apte à procurer une sustentation de 1 kgr. 03 par centimètre carré de son aile, il lui suffit d'une réaction cinq fois moindre, 200 grammes, et elle n'a pas à être condensée sur 1 centimètre, mais répartie au contraire sur une longueur de 40 centimètres et plus, représentant le développement de la tranche postérieure de ses ailes.

Il lui suffit donc de réaliser un vide 200 fois moins poussé que le vide absolu, pour qu'il se trouve automatiquement propulsé par une pression atmosphérique agissant activement sur les rémiges, comme elle le fait sur un volume d'eau interposé entre elle et l'intérieur du corps de pompe où un vide est créé.

Dans la circonstance, l'aile n'effectue pas une détente élévatoire et propulsive, mais seulement des mouvements de mise en œuvre de la pression atmosphérique qui réalise elle-même une propulsion

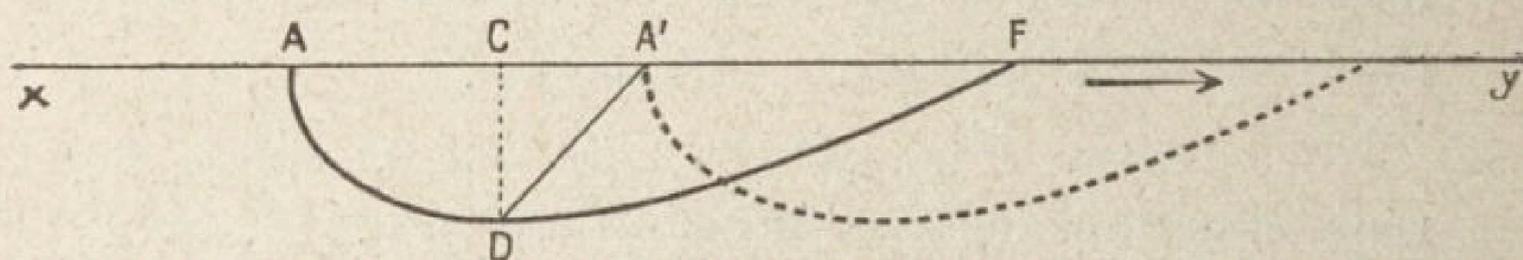


Fig. 14. — Demi-profil bolique creux.

CDA' , trajectoire totale de la molécule; DA , phase propulsive.

continue, au fur et à mesure que ces mouvements l'obligent à se manifester.

Pour bien saisir comment se produit cette poussée automatique, nous reviendrons à notre figure du demi-profil bolique, mais nous l'envisagerons cette fois dans son plan vertical, tracé en dessous de l'axe de propulsion xy et se déplaçant en sens inverse du précédent c'est-à-dire présentant à l'avant la partie de poupe (fig. 14). Si la réciproque de nos premières conclusions est vraie, ces molécules abordées par la pointe du nouveau profil sont écartées

par lui jusqu'au sommet D suivant une normale à xy et d'un mouvement uniformément retardé. Parvenues en ce point et la pression atmosphérique agissant sur elles alors que cette pression n'est pas équilibrée par une pression égale du côté concave du profil, ces molécules incurvant de force les rémiges choient dans la direction de l'oblique D A' en glissant le long de la paroi D A qui est repoussée dans cette même direction. Cette répulsion se transmet de l'extrémité cintrée des rémiges à leurs canons, à l'épaule et enfin au centre de gravité de l'oiseau.

Notez bien que, pour l'oiseau rameur tout au moins, il n'y a pas ici comme une espèce de déflagration extérieure progressive qui lui épargnerait toute dépense d'énergie : il a un effort très réel de nage, de pagayage, proportionné au résultat attendu et qu'il réduit d'ailleurs au strict nécessaire en vertu du principe du moindre effort.

Cette théorie a été entrevue par d'anciens observateurs comme BORELLI et FABRICE d'AQUAPENDENTE ; pour nous, elle était depuis longtemps acquise lorsque M. CEMICHEN a proposé l'idée d'ondes réagissant après chaque battement d'ailes et qu'il a nommées ondes de suite.

A notre point de vue, il n'y a pas une série d'ondes discontinues, mais bien une réaction immédiate et continue, qui se fait sentir pendant le cycle entier de l'aile, à la remontée par conséquent et même

aux points extrêmes de la trajectoire allongée et recoupée qu'elle parcourt.

Si, dans ces diverses phases, les rémiges peuvent être recourbées en sens inverse ou espacées l'une de l'autre (comme aussi dans le vol à voile) l'action aérienne ne s'exerce pas moins sur chacune d'elles, isolément cette fois, suivant les mêmes principes, étant donné que leur contour au voisinage de l'extrémité n'est qu'une réduction de celui de l'aile entière.

L'étude du vol à voile ne peut que confirmer cette théorie, qui est seule à même d'expliquer ce vol d'une façon satisfaisante.

Chez les voiliers, en effet, les ailes réalisent des contours et un profil tels que non seulement elles détournent le vent debout dans le sens le plus favorable, mais qu'elles font de ce vent absolu comme un servo-moteur qui crée de lui-même le vide utile au-dessus de la tranche postérieure de l'aile.

En tant qu'économie d'efforts, cette réalisation comporte tous les degrés et le profil utile se simplifie d'autant plus que la vitesse du vent, relatif ou absolu, est plus élevée. La solution se ramène, en effet, à un développement de plus en plus grand de la tranche postérieure de l'aile : parmi les rameurs qui, une fois lancés, tirent de leur mieux parti du vent relatif, l'hirondelle épargne toute complication de mouvement en allongeant le plus possible une main très étroite et une queue fourchue, de même

les oiseaux familiers des vents marins sont d'autant meilleurs voiliers que leurs ailes sont plus étendues.

Chez les voiliers, il y a réellement récupération d'une énergie extérieure sans dépense de force de la part de l'oiseau ; ce fait signalé avec tant d'insistance et de précision par MOUILLARD dans ses deux ouvrages *L'Empire de l'air* et *Le Vol sans battement*, n'est plus contesté depuis que de multiples observations, dont les plus récentes sont dues à M. IDRAC, l'ont définitivement établi.

Ici encore, s'agissant d'oiseaux d'un poids de 8 à 10 kilos, nous soulignerons l'insuffisance absolue de la seule poussée du vent pour assurer la sustentation et, par conséquent, l'intervention irréfutable d'une force plus puissante ; celle-ci ne peut être que la pression atmosphérique habilement démasquée et asservie par l'animal au moyen du vent lui-même comme servo-moteur.

On a tenté récemment d'attribuer cette force aux pulsations irrégulières ou à des vibrations du vent dont l'oiseau additionnerait les effets ; M. IDRAC, ainsi que MM. MAGNAN, PLANIOL et HUGUENARD ont réalisé pour ces recherches des appareils d'une sensibilité et d'une précision remarquables. Il n'est pas douteux que l'usage de ceux-ci fera grandement progresser nos connaissances sur les courants aériens.

Cette hypothèse, toutefois, ne nous paraît pas satisfaisante au même titre que la nôtre. Ces pul-

sations, du même ordre de grandeur que la poussée directe du vent, seraient, comme celle-ci, insuffisantes à assurer la progression d'oiseaux aussi lourds que le vautour ou l'albatros. Leur mode d'action reste d'ailleurs inexpliqué et M. IDRAC a d'autre part reconnu : « qu'aucune liaison n'a pu être établie entre les irrégularités du vent et le vol à voile qui se produit souvent par vent faible et régulier » (1).

Il est à propos de citer divers passages de MOULLARD qui, semble-t-il, ne laissent pas le choix entre l'hypothèse d'une action des pulsations de l'air et celle de la poussée active et continue de la pression atmosphérique (2).

« Il reste l'impression d'une énorme masse, nullement sensible au coup de vent, tournant lentement, accomplissant avec lenteur son évolution, revenant contre le vent, et là, ayant un temps d'exhaussement qui, vu d'en bas, produit l'effet d'un arrêt, lent mais complet, dans la marche, dont la durée est quelquefois d'une demi-minute (p. 132).

« La vue de l'oiseau se mouvant sans effort dans le fluide aérien a fait naître l'idée d'aspiration (p. 208).

« NADAR, de LA LANDELLE, PONTON d'AMÉCOURT, les ancêtres en un mot, voyant l'oiseau de mer pénétrer le courant aérien sans être mû par aucun propul-

1. Communication à l'Académie des Sciences du 2 février 1920.

2. *Le vol sans battement, passim.*

seur, ne trouvèrent rien de mieux que de dire qu'il est attiré, qu'il y a aspiration (p. 234).

« Quand il monte (le vautour) c'est avec une netteté de soldat à l'exercice, l'évolution est simple... on pourrait dire : une avancée lente contre le courant à laquelle succède une élévation, elle aussi contre le courant, aucun orbe, aucun recul, c'est le vol mécanique. Que peut-on désirer de mieux comme aspiration ? (p. 240).

« C'est donc cette fois non seulement l'aspiration, mais l'aspiration aggravée d'une ascension (p. 258). »

MOUILLARD raconte autre part son dépit, un jour où, obligé de se rendre sur l'autre bord d'un canal, il lui fallait longer celui-ci dans les deux sens pendant plus de deux heures sous un soleil éclatant à raison de l'éloignement de l'écluse qui permettait le passage.

« Je fis lever un grand faucon qui était posé sur la berge que je suivais. Il partit presque de mes pieds, ouvrit simplement un peu les ailes au vent qui venait de l'autre bord, avança contre ce courant avec une lenteur de moins d'un mètre à la seconde et aborda paisiblement sur l'autre côté du canal sans avoir produit l'ombre d'un battement.

« La manœuvre était splendide de simplicité. Dans cette traversée le faucon faisait l'acte impossible, l'avancement, contre le vent, sans élan et sans effort. C'était un remarquable exemple de ce qu'on nomme l'aspiration. Mais ce qui me rendit

furieux, c'était de comparer ma course pénible et sans fin, à cette traversée d'un bord à l'autre faite avec si peu d'effort (p. 338) ».

L'explication que nous avons donnée n'est-elle pas adéquate à cette apparence d'aspiration que présente le phénomène et au caractère de continuité et de stabilité dans la progression que MOUILLARD attribue à ce genre de vol ? Elle serait certainement confirmée par l'application d'appareils enregistreurs appropriés aux planeurs avec lesquels on réalise depuis peu de remarquables performances en vol à voile.

La théorie de l'avion actuel ne méconnaît pas qu'une certaine dépression se produit au-dessus et vers l'arrière des ailes, mais elle ne table, en fait, que sur l'inertie de l'air pour l'appui nécessaire aux pales d'hélice et aux plans sustentateurs, prenant ainsi le contrepied de la méthode naturelle pour laquelle la dépression est toute la ressource et l'inertie presque uniquement un obstacle à tourner.

La pression atmosphérique à laquelle, nous l'avons vu, on peut recourir sur place et dans toutes les directions de l'espace, procure évidemment à l'oiseau une sécurité bien plus grande que l'inertie inconsistante et même subitement défailante quand l'appareil volant doit inopinément ralentir sa course rectiligne.

Eu égard à cette nécessité de la vitesse pour nos avions actuels, on pourrait comparer l'aviateur à un

cycliste roulant sur un pont étroit et sans garde-fou, et que toute perte de vitesse expose à osciller vers le vide, alors que l'oiseau aurait adopté pour le même trajet un siège suspendu sous le pont à une poulie roulante dont la chape embrasserait le plancher.

Le public, le grand public qu'appelle en vain le tourisme aérien, ne se laissera gagner que lorsque les méthodes de l'oiseau étant mises en pratique, une même impression de sécurité lui sera acquise, quitte à sacrifier une grande partie de la vitesse, d'autant plus que ces deux idées tourisme et rapidité ne sauraient se concilier.

Après exécution de diverses expériences en vue, nous aurons l'occasion de préciser les principaux moyens, les artifices auxquels l'oiseau a recours pour obtenir ce déséquilibre continu entre les pressions régnant de part et d'autre de la tranche postérieure de son aile et grâce auxquels la sustentation et la progression sont réalisées (1).

1. La propulsion des navires à voile, de même que le phénomène de Magnus qui, récemment a fixé l'attention du monde savant, relèvent, selon nous, de la même théorie dont s'inspire le vol naturel et le vol à voile en particulier.

CHAPITRE VIII

HYDRODYNAMIQUE

Poursuivant le parallélisme entre les phénomènes aériens et les phénomènes hydrostatiques, nous allons tenter d'établir une théorie des vagues basée sur l'exposé précédent (1).

Imaginons qu'une agitation quelconque ait provoqué à la surface de la mer une houle dont la figure 15 représente l'une des ondes.

Si un vent prononcé souffle dans la direction A R en frôlant le sommet liquide M, il fait appel d'air au delà de l'écran M P constitué par l'onde, une dépression aérienne se manifeste sur la face M R, et d'autant plus accentuée que l'on s'éloigne plus du point M. Toutes les molécules d'eau limitant cette face M R sont donc sollicitées, du côté interne P de l'onde, par la pression atmosphérique qui s'exerce sur l'ensemble de la surface de la mer et qui leur est transmise par les molécules liquides à leur contact (prin-

1. Envisageant spécialement la vague, cette hypothèse n'exclut pas la rotation des molécules actuellement enseignée pour le cas de la houle simple.

cipe de Pascal) alors que, dans le sillon aérien situé à l'avant, elles ne supportent qu'une pression aérienne très affaiblie, d'où déséquilibre.

Considérons l'une des molécules proches du fond

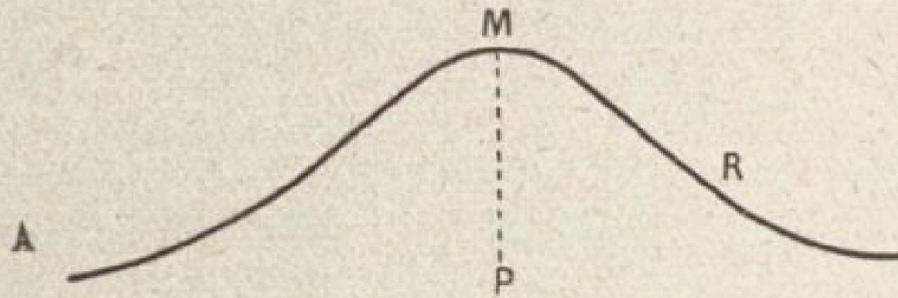


Fig. 15. — Onde de houle.

du sillon. Sous l'effet de ce déséquilibre, elle se trouve lancée vers l'avant et le haut, avec une intensité géométriquement décroissante jusqu'au moment où, sa force s'annulant en même temps que la dépression, elle atteint le point qui marque le

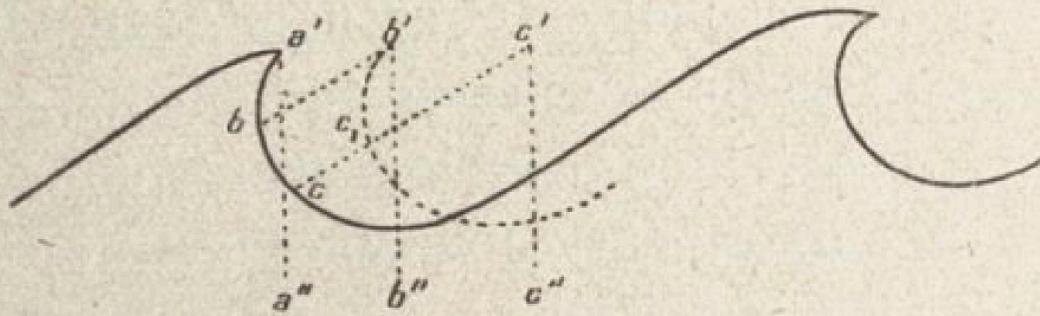


Fig. 16. — Théorie de la vague.

Quand b est en b' , c est en c_1 dessinant plus en avant la courbe de la vague.

sommet de la vague (fig. 16). Elle retombe alors verticalement sous l'effet de la pesanteur pendant que d'autres qui la précédaient dans la direction du vent, voient s'approcher le point de dépression maxima et sont à leur tour lancées successivement

dans la même direction oblique ascensionnelle.

L'ensemble des molécules en mouvement constitue la face creuse M Q R de la vague, les molécules les plus hautes sont, à chaque instant, celles qui achèvent leur premier parcours et constituent désormais le dos de l'onde, celles de la même face creuse qui s'échelonnent au-dessous sont d'autant plus loin de leur fin d'ascension qu'elles sont plus rapprochées du fond du sillon.

On reconnaît ici l'analogie avec l'ascension rectiligne oblique, suivie d'une chute verticale, que nous avons supposée pour les molécules fluides heurtées par un profil bolique se déplaçant à une vitesse constante.

Ainsi court la vague, à tout instant reconstituée par l'élévation successive des molécules, sous le vent, sans que ces molécules participent au trajet de celui-ci, sauf à subir au passage de chaque vague, un déplacement d'une demi-longueur d'onde dans cette même direction. Ce déplacement est bien prouvé par le lent transport des objets flottants parallèlement à la brise.

A notre avis, c'est ce phénomène de dépression dans le sillon qui jouerait le rôle principal dans le modelé des vagues, la poussée du vent se manifestant surtout sur la cime de l'onde pour l'incurver vers l'avant (1).

1. Cette théorie, mieux que la seule poussée du vent,

Reportons-nous maintenant à la figure 14 du chapitre précédent qui reproduisait, renversé, notre profil bolique et expliquait comment l'aile enregistre la poussée atmosphérique ; ne voit-on pas l'analogie complète entre l'invisible phénomène aérien et le phénomène de la vague qui le matérialise à nos regards ?

Et à son tour l'aile postérieure ne peut-elle être considérée comme une matérialisation de la surface creuse d'un sillon de dépression, fuyant sous la poussée atmosphérique déclanchée par le vent absolu ou par la manœuvre de l'oiseau rameur ?

En concrétisant le phénomène du vol, l'exemple de la vague nous rend également manifeste le grand rendement du principe utilisé, puisqu'il est capable de retourner et déplacer ces lourds prismes liquides qui constituent les vagues.

Maintenant, soit A B C fig. 17, la silhouette d'un poisson dont la queue, ou nageoire caudale B C

explique le mouvement ascensionnel régulier des molécules à l'intérieur de la vague.

C'est ce mode d'obtention du vide que devait viser M. TATIN dont nous avons cité plus haut l'opinion ; il n'exige pas, pour produire un vide seulement partiel, une très grande vitesse. D'ailleurs eu égard aux conditions du vol naturel, il ne semble guère utilisable pour l'oiseau, et nous ne l'exposons que pour rendre plus clair le phénomène qui se produit sur la face où règne un excès de pression.

C'est sur ce même principe d'une dépression provoquée par un courant fluide rapide qu'a été réalisé l'injecteur Giffard.

est supposée dans un plan perpendiculaire à celui de la figure.

On a coutume de croire que l'animal se propulse par une détente musculaire dont l'action est dirigée d'avant vers l'arrière, détente dans laquelle, par exemple, la face droite C de la nageoire prend un

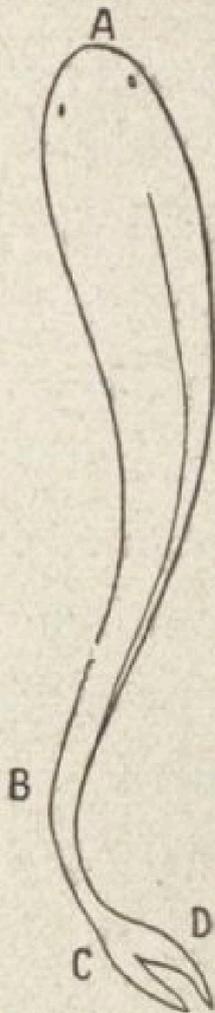


Fig. 17. — Natation du poisson.

point fixe sur l'inertie de l'eau pendant que se redresse la colonne vertébrale. On prête ainsi à cet organe un effort analogue à celui de la jambe du bipède qui, ayant fixé son pied, se déploie ensuite pour propulser le centre de gravité.

Cependant, s'il en était ainsi, et l'animal ne disposant pas de deux propulseurs qui se relaient

comme chez le bipède, il semble que son avancement ne pourrait avoir lieu que par saccades, celles-ci étant séparées par les périodes où la queue revient à la position fléchie en vue d'une détente nouvelle ; or, ce n'est pas ce que montre l'observation.

D'autre part, il n'y a pas, chez les poissons, de muscles qui se prolongent entre les nervures de la nageoire caudale pour rigidifier celle-ci à volonté, ni d'articulation anguleuse à l'arrière du corps, comme dans notre pied et notre genou, pour permettre un déploiement efficace à partir d'un point d'appui immobile. C'est cependant cette forme aiguë d'articulation qui apparaît la plus propice à une détente avantageuse, et les attitudes arrondies en un cintre de rayon étendu dont sont seules capables les articulations du rachis des poissons vont tout à fait à l'encontre d'un résultat pareil.

Au surplus, lorsqu'on observe le poisson, il semble bien que la propulsion est déjà obtenue et qu'elle s'éteint quand la nageoire caudale revient dans l'axe du corps, c'est-à-dire quand sa distance au centre de gravité augmente, seul cas où elle pourrait réellement propulser si elle prenait l'inertie des molécules d'eau pour appui.

Il ne semble donc pas possible d'assimiler le mode de propulsion du poisson au déploiement du membre du bipède. On ne peut non plus le comparer au principe de l'hélice marine pour les mêmes raisons que nous avons exposées au début à propos de l'hé-

lice aérienne : la nageoire est souple, l'hélice rigide ; celle-ci est rapide, la première est lente, et toutes choses égales d'ailleurs, la force dont dispose le poisson est tout à fait infime au regard de celle que nous devons appliquer à notre engin propulsif.

Là encore, par conséquent, nous sommes fondés à dire que, pour avancer, le poisson met simplement en œuvre, par une flexion de son arrière-train, la pression hydrostatique, laquelle agissant activement sur sa nageoire caudale, lui transmet automatiquement une impulsion vers l'avant.

Pour cela, il effectue une vive flexion de la partie postérieure du corps (où se trouvent les muscles propulseurs) vers la gauche B, par exemple. Sa nageoire caudale reste en retard par inertie et elle isole sur sa face droite une région D où se manifeste une dépression instantanée qui n'équilibre plus la poussée hydrostatique subie par la face C.

C'est cet excédent de pression sur C qui se traduit aussitôt par l'avancement de l'eau entraînant avec elle la queue et la colonne vertébrale.

Une flexion symétrique se produit ensuite vers la droite, donnant une résultante semblable vers l'avant (1).

Nous retrouvons donc ici, avec la similitude de forme des propulseurs chez l'oiseau et le poisson,

1. En ce qui concerne l'emplacement et l'usage des nageoires pectorales et ventrales, voir les curieux travaux du professeur HOUSSAY sur la *Morphologie des poissons*.

un mode pareil de propulsion. Nous pouvons compléter la ressemblance, en rapprochant la forme en lame de faux des ailes d'oiseaux vivant dans les grands courants d'air de la même forme que reproduisent les nageoires des poissons doués d'une grande vitesse. Ici également l'efficacité d'un effort rapide est fonction du développement de la tranche postérieure du propulseur.

C'est ainsi que nous expliquerons la dissymétrie

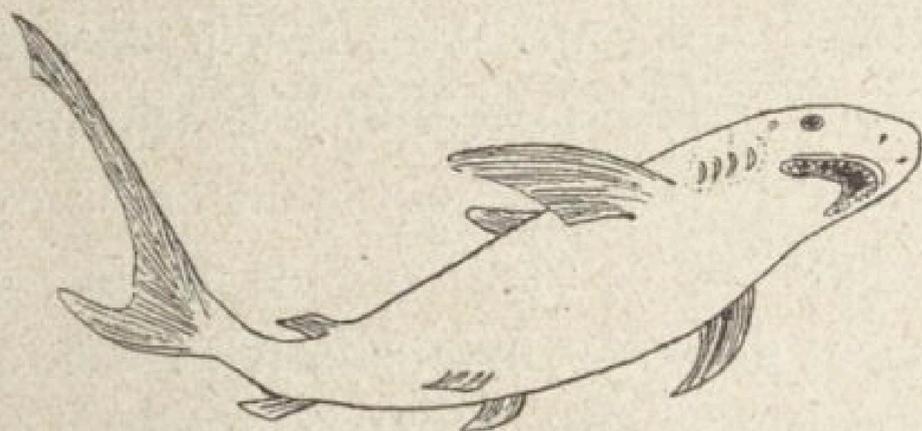


Fig. 18. — Nageoire hétérocerque du requin.

remarquable des nageoires caudales dites hétérocerques comme celle du requin (fig. 18) dont le lobe supérieur est beaucoup plus développé que le lobe inférieur. On sait que l'animal ayant la bouche tout à fait en retrait au-dessous du museau, est obligé de se renverser en partie quand il veut s'emparer d'une proie. Ce mouvement, bien entendu, doit être rapide, il implique donc un effort violent, effort, en outre dissymétrique, puisqu'il doit aboutir au pivotement autour de l'axe du corps ; un seul lobe de la nageoire caudale doit pour cela être mis en

œuvre ; c'est donc à raison de cet effort répété que l'évolution de l'espèce a développé principalement le lobe supérieur.

Au point où nous en sommes, nous pouvons retenir comme une preuve que la propulsion dans les fluides est active si l'on sait la manifester par un pagayage approprié, c'est que les êtres primitifs, poissons et sauriens, n'ont eu besoin que d'une colonne vertébrale à articulations sans ampleur mais très serrées et aptes à ce pagayage, alors qu'ils ont dû développer des membres à articulations étendues, à mesure qu'ils ont voulu prendre appui sur le sol ferme. La progression sur ce dernier exige des membres extensibles : si, dans les fluides, on peut se dispenser de cette extensibilité, c'est que ces fluides sont eux-mêmes propulsifs dans les conditions voulues.

Certains poissons n'ont pas la queue bifurquée, mais arrondie, les tranches amincies étant alors externes, et c'est cette disposition poussée à l'extrême que nous trouvons dans la queue du crocodile, aplatie verticalement et dont les oscillations horizontales propulsent l'animal.

QUATRIÈME PARTIE

CHAPITRE IX

APERÇUS GÉNÉRAUX ET CONCLUSIONS

Jusqu'ici nous avons surtout visé la propulsion de l'oiseau dans le milieu air, mais nos principes sont susceptibles de nous éclairer également sur les mécanismes, aussi variés qu'ils soient, utilisés par la nature dans ou sur l'eau et sur le sol.

Dans cet ordre d'idées, nous pourrions montrer que, chez l'oiseau, le châssis moteur, constitué par le sternum et les ailes, est lié à la carrosserie (les reins et le bassin) par un système de suspension à triple sens d'oscillations (articulations sterno-costales, intercostales et vertébro-costales) avec interposition de chambres pneumatiques (sacs aériens) et que, pour l'immense majorité des oiseaux, qui font bien plus longtemps usage de leurs ailes que

de leurs pattes, la réalisation d'un train d'atterrissage et de démarrage puissant, manœuvré par une queue appropriée, a été une nécessité. Et j'y insiste, ce bassin, pattes comprises, n'est réellement créé qu'en vue du démarrage et de l'atterrissage, puisque le bassin de l'autruche, du casoar, du manchot, qui

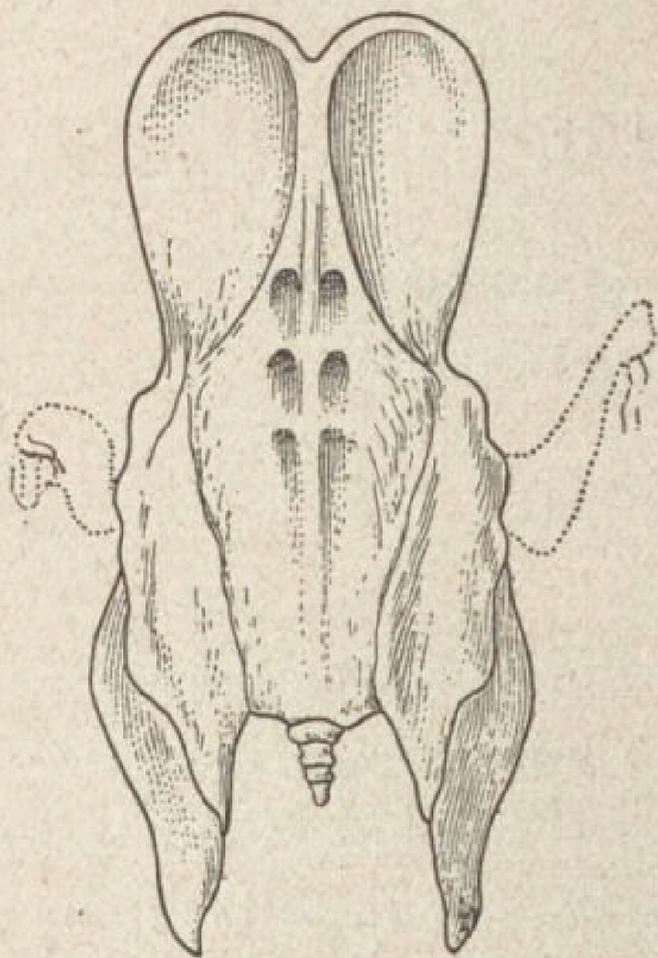


Fig. 19. — Face supérieure du bassin d'un oiseau pratiquant le vol et développé par les efforts de démarrage et d'atterrissage.

Poule.

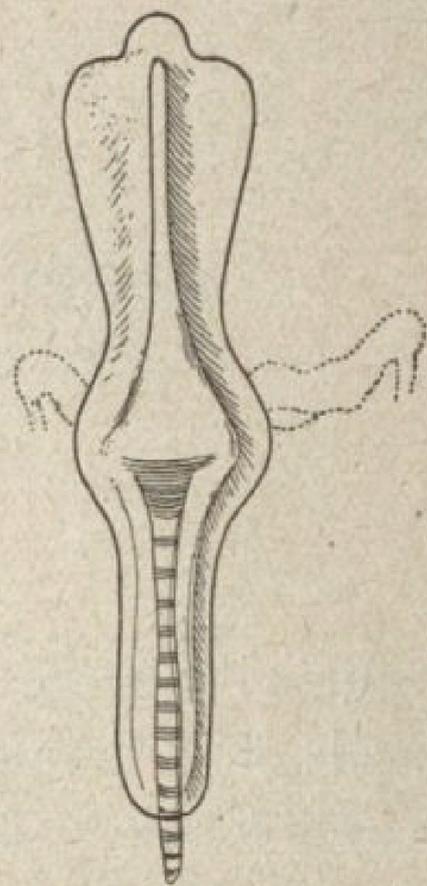


Fig. 20. — Bassin du casoar. Face supérieure. (Oiseau exclusivement coureur.)

ne volent pas, est d'une conformation entièrement différente de celui des premiers (fig. 19 et 20).

Il faudra bien nous en inspirer pour nos aéroplanes. A cet égard, les très petits oiseaux qui ne marchent jamais, mais ne progressent qu'en sautilant, nous seront de parfaits modèles.

Et nous n'avons pas dit un mot de la queue dont l'importance est grande, dont les rectrices sont si expressives par leur texture et leur agencement, et qui, n'ayant que des mouvements de va-et-vient, devrait être étudiée la première, pour nous préparer à l'examen plus délicat de la semi-rotation de l'aile !

Nous n'aborderons pas ici l'étude des muscles, nous réservant de parler autre part de leur morphogénie, mais la morphogénie des os, et des plumes entre lesquels ils sont intermédiaires, traduit exactement leur action.

D'ailleurs, avec ce que nous connaissons du sens où sont sollicités les os et les plumes, il est aisé de considérer les deux points d'attache de chaque muscle, et, comme point d'appui, l'articulation qu'il embrasse, et d'appliquer à cet ensemble les lois des trois genres de levier, en recourant pour le surplus, à la thèse d'ALIX, extrêmement complète, sur l'anatomie des oiseaux, ainsi qu'aux études de M. ANTHONY, sur la morphogénie musculaire (1).

Encore, n'avons-nous appliqué ici, à l'étude des plumes, que le principe de la résistance des maté-

1. Voir R. Anthony : *Le Déterminisme et l'Adaptation Morphologique en Biologie animale* (Doin et Cie, éditeurs).

Nous devons à M. le Professeur Anthony, qui a mis à notre disposition les ressources de son Laboratoire d'Anatomie comparée, tous les matériaux utilisés pour ces études. Nous lui en exprimons ici notre profonde reconnaissance.

riaux, alors que les lois de la morphogénie sont également applicables, par exemple, à l'interprétation des variations du contour des ailes des types différents, aux réactions réciproques des plumes et à l'étude détaillée des barbes et des barbules.

Et nous n'avons guère parlé que des oiseaux, nous n'avons qu'à peine entr'ouvert l'immense laboratoire que constitue le monde des insectes à deux ailes (mouches), à quatre ailes égales (libellules) ou inégales (bourdon), à élytres (coléoptères), à surfaces planes et écailleuses (papillons diurnes) ou plissées (nocturnes), tous mécanismes auxquels les méthodes de recherche précitées peuvent certainement s'appliquer.

En outre, ne sommes-nous pas en droit de dire qu'une fois mises au point les études qui précèdent, nous serions à même de perfectionner non-seulement le propulseur aérien, mais l'hélice marine et les divers appareils, moulins, parachutes, turbines, qui mettent en œuvre les propriétés des fluides ?

Et, aussi paradoxal que cela puisse paraître, pense-t-on qu'il ne naîtrait rien de ces études, appliquées au squelette des quadrupèdes, pour notre locomotion terrestre ?

Quand il a fallu abandonner la route, ce fil à la patte de l'automobile et couper à travers les champs, on a dû renoncer à la roue, et recourir à la chenille : mais qu'est-ce que la chenille ? — C'est à peu près le reptile, l'être le plus primitif, une

colonne vertébrale avec un nombre considérable de pièces, de frottements articulaires, d'efforts divergents. Au fait, si chaque chaîne d'un tank a vingt-cinq chaînons, portant chacun deux articulations, soit, pour les deux chaînes, cent articulations, c'est en effet, beaucoup de frottements, d'usure, c'est réellement le serpent antédiluvien.

Le lévrier, l'antilope de notre ère, ont trois articulations environ par membre, soit douze en tout, et non une centaine comme nos caterpillars, ne sont-ils pas, avec une économie de force et d'entretien considérables, des modèles d'une rapidité incomparablement supérieure ?

Comme nous l'avons exposé plus haut, la propulsion dans les fluides nécessite un organe souple et oscillant, c'est pourquoi la colonne vertébrale, queue comprise, a une importance primordiale, à l'encontre des membres, chez les premiers animaux parus : poissons, sauriens, qui étaient des êtres aquatiques.

Quand ces êtres ont tenté de progresser sur le sol, les membres se sont montrés, d'abord gauchement tournés les coudes en dehors, comme chez le crocodile, enfin orientant définitivement leurs angles dans le plan de propulsion, pour un rendement de plus en plus parfait.

Cet exemple montre combien heureusement la Nature a tendance à la simplification mécanique, et il nous confirme que, non-seulement sont très sim-

ples les principes utilisés dans le vol, la natation, la marche, mais également la mécanique même qui les applique, et ce, contrairement à l'opinion accréditée.

La simplicité des mécanismes est, au surplus, une nécessité de la loi du moindre effort.

Par exemple, il est aisé de voir que l'économie des efforts nerveux a fait appliquer dans les organes de relation une judicieuse division de travail. Aux muscles, dont la dilatation et la compression périodiques doivent être commandées par une ramification nerveuse, complexe, se sont substitués, pour les tâches qui nécessitent seulement de la souplesse, des tendons, ligaments, aponévroses et plumes beaucoup moins sensibles ; puis, pour les rôles uniquement passifs, des os réellement inertes, qui épargnent à l'animal tout contrôle de nerfs sensitifs.

Les os eux-mêmes, des reptiles aux mammifères, ont vu l'une de leurs dimensions primer sur les autres, à mesure que l'action musculaire créatrice s'est disciplinée et, c'est encore une économie, visant la nutrition, qui a présidé à cette croissance, rigoureusement assujettie aux lois de la résistance des matériaux.

Les muscles ont appris à reporter sur les os les phases violentes et les chocs inhérents aux efforts de translation : leur propre action a pu acquérir ainsi une régularité de plus en plus grande, et d'autant mieux bénéficier des avantages de la force vive.

N'y a-t-il pas, sur les voies que nous venons d'indiquer, beaucoup de chantiers à ouvrir, et mieux que des économies de chevaux vapeur, de précieux avantages de sécurité à espérer ?

Eu égard à la date extrêmement récente où nos premiers avions ont pris leur vol, il faut bien considérer ceux d'aujourd'hui comme des instruments de l'âge de la pierre, par rapport à ce que les prochains siècles pourront réaliser.

Le champ, devant nous, est immense ; or, il est un désir qui, par-dessus tout, nous tient à cœur, c'est celui de voir les pionniers de la Patrie française maintenir leur place hors de pair parmi ceux qui sont appelés à le faire fructifier.

Si l'œuvre présente peut y contribuer, notre vœu le plus cher sera réalisé.

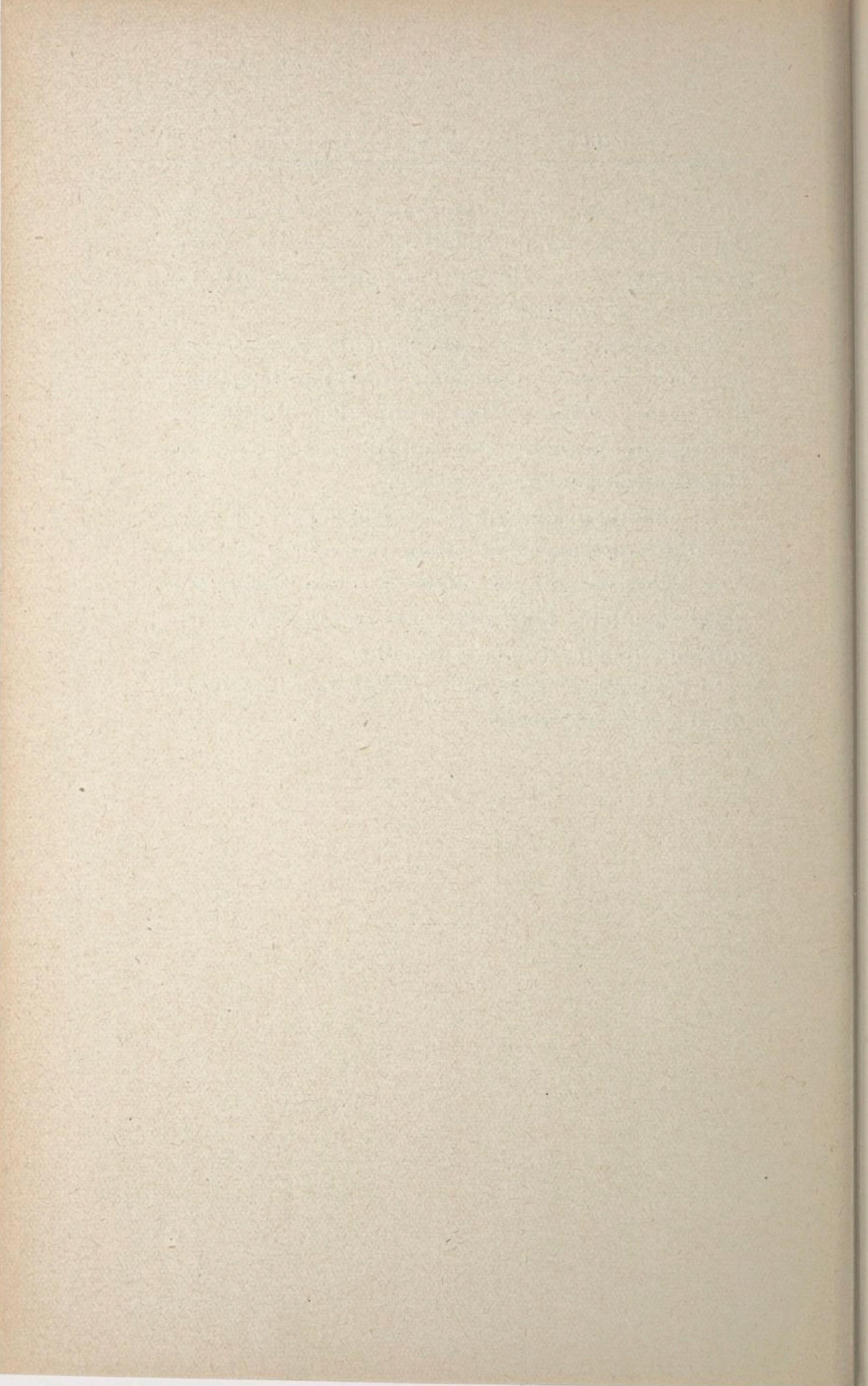


TABLE DES FIGURES

| | Pages |
|---|-------|
| 1. Cétacé (Epaulard). Nageoire caudale horizontale... | 5 |
| 2. Tipule en vol..... | 17 |
| 3. Trajectoire de l'aile de la Tipule..... | 17 |
| 4. Etude du rôle des balanciers..... | 17 |
| 5. Exocet | 28 |
| 6. Schéma de la constitution d'une rémige..... | 27 |
| 7. Section transversale d'une rémige primaire..... | 28 |
| 8. Face dorsale de l'aile..... | 29 |
| 9. Face palmaire de l'aile du pigeon..... | 31 |
| 10. Orientation générale des os..... | 34 |
| 11. Squelette de l'appareil moteur du pigeon..... | 41 |
| 12. Sternum de poule..... | 43 |
| 13. Profil bolique | 53 |
| 14. Demi-profil bolique creux..... | 66 |
| 15. Onde de houle | 75 |
| 16. Théorie de la vague..... | 75 |
| 17. Natation du poisson..... | 78 |
| 18. Nageoire hétérocerque du requin..... | 81 |
| 19. Bassin de la poule face supérieure..... | 84 |
| 20. Bassin du Casoar..... | 84 |

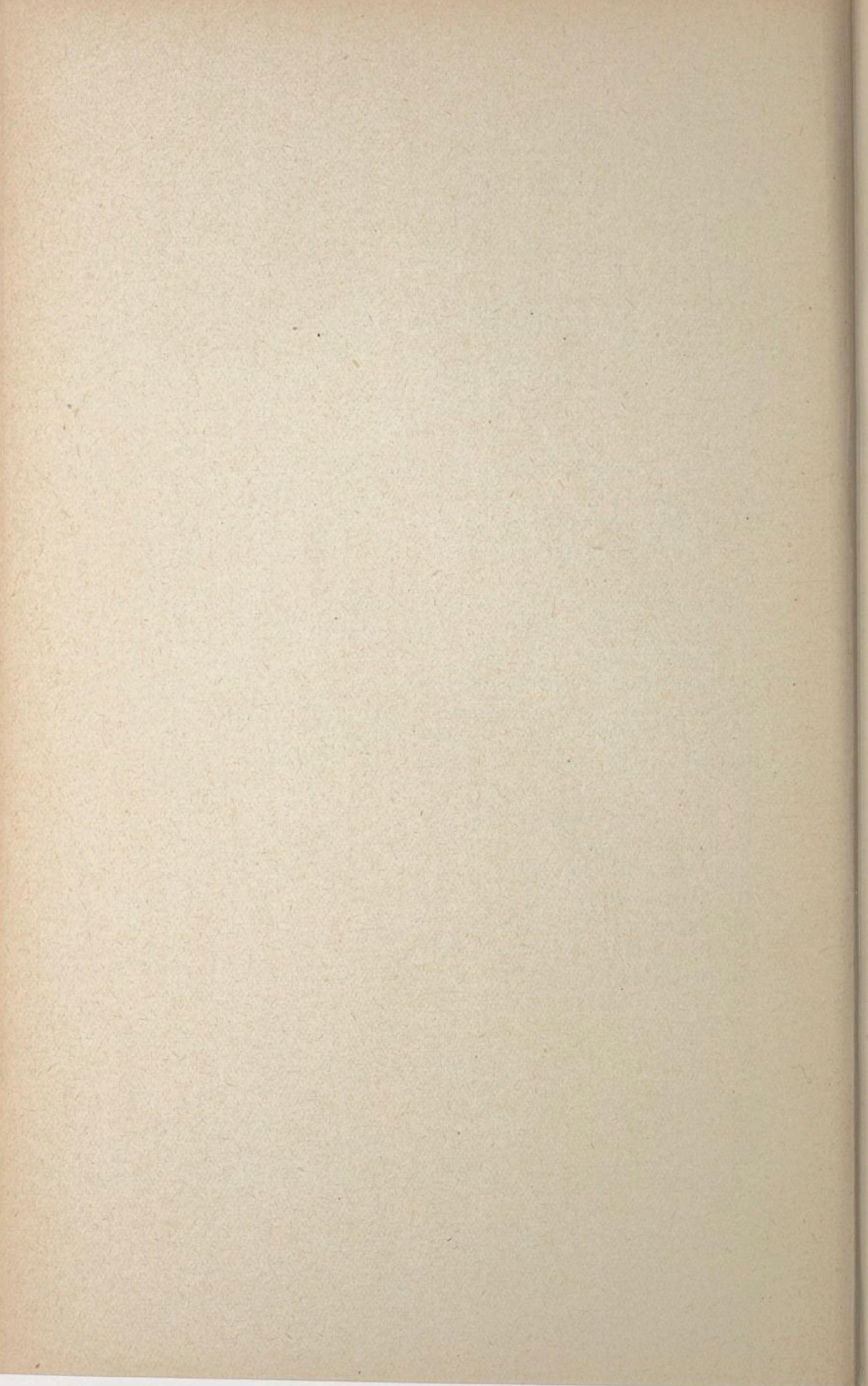


TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---------------|--------------|
| PRÉFACE | Pages VII |
|---------------|--------------|

PREMIÈRE PARTIE

PRINCIPES MÉCANIQUES ET PHYSIOLOGIQUES.

| | |
|--|----|
| CHAPITRE PREMIER. — La loi du moindre effort..... | 1 |
| CHAPITRE II. — Les lois de la mécanique animale..... | 10 |
| CHAPITRE III. — Le vol godillé..... | 16 |

DEUXIÈME PARTIE

RECHERCHES ANATOMIQUES.

| | |
|--|----|
| CHAPITRE IV. — Les plumes..... | 25 |
| CHAPITRE V. — Lois morphogéniques..... | 36 |

TROISIÈME PARTIE

PROPRIÉTÉS DU MILIEU AMBIANT.

| | |
|--------------------------------------|----|
| CHAPITRE VI. — Rôle passif..... | 51 |
| CHAPITRE VII. — Rôle actif..... | 62 |
| CHAPITRE VIII. — Hydrodynamique..... | 74 |

QUATRIÈME PARTIE

| | |
|---|----|
| CHAPITRE IX. — Aperçus généraux et conclusions..... | 83 |
|---|----|

