

Auteur ou collectivité : Marey, Étienne-Jules

Auteur : Marey, Étienne-Jules (1830-1904)

Titre : Le mouvement

Adresse : Paris : G. Masson, 1894

Collation : 1 vol. (VI-335 p.-III f. de pl.) : ill. ; 21 cm

Cote : CNAM-BIB 8 Ke 614

Sujet(s) : Photographie d'action et de mouvement ; Photographie scientifique ; Perception visuelle du mouvement ; Chronophotographie ; Mouvement

Langue : Français

Date de mise en ligne : 03/10/2014

Date de génération du PDF : 26/9/2017

Permalink : <http://cnum.cnam.fr/redir?8KE614>

"M. le Colonel Guimard
cordial hommage
J. May"

LE
MOUVEMENT

OUVRAGES DU MÊME AUTEUR

- Du mouvement dans les fonctions de la vie.** Leçons faites au Collège de France, in-8,
480 pages, 144 figures. Paris, 1868. G. Baillièvre.
- Physiologie médicale de la circulation du sang,** avec applications aux maladies de
l'appareil circulatoire. 1 vol. in-8, 668 pages, 235 figures. Paris, 1863, Adrien
Delahaye (épuisé).
- La machine animale.** Locomotion terrestre et aérienne, 1873. G. Baillièvre.
- Physiologie expérimentale.** École pratique des hautes études. Travaux du laboratoire
du professeur MAREY. Paris, 1876 à 1880. 4 volumes grand in-8° renfermant environ
700 figures..... 60 fr.
- La méthode graphique dans les sciences expérimentales et particulièrement en
physiologie et en médecine.** 2^e tirage augmenté d'un supplément sur *le développement
de la méthode graphique par l'emploi de la photographie*. Paris, 1884. 1 vol. in-8°
avec 383 figures dans le texte..... 18 fr. "..... 2 fr. 50
- Le supplément séparément..... 2 fr. 50
- La circulation du sang** à l'état physiologique et dans les maladies. 2^e édition. Paris,
1881. 1 vol. gr. in-8° de 745 pages, avec 358 figures dans le texte..... 18 fr.
- Les eaux contaminées et le choléra.** Mémoire présenté à l'Académie de médecine, par
le Dr MAREY, membre de l'Institut. Paris, 1884. Broch. in-8..... 1 fr. 25
- Résultats de l'enquête sur l'épidémie de choléra en France en 1884.** *Rapport pré-
senté à l'Académie de médecine, au nom d'une Commission*, par M. MAREY. Paris,
1886. Broch. in-8°..... 3 fr.
- Physiologie du mouvement. Le vol des oiseaux.** 1 vol. gr. in-8° avec 1 planche et
164 figures dans le texte..... 10 fr.

LE
M O U V E M E N T

P A R

E.-J. MAREY

Membre de l'Institut et de l'Académie de Médecine
Professeur au Collège de France
Directeur de la Station physiologique.

—
A V E C 214 FIGURES DANS LE TEXTE
et trois planches.
—



PARIS

G. MASSON, ÉDITEUR
LIBRAIRE DE L'ACADEMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

—
1894

Droits de traduction et de reproduction réservés.

AVANT-PROPOS

La Méthode graphique, en raison des progrès qu'elle a fait faire à presque toutes les branches de la Science, a pris dans ces derniers temps un développement considérable. Les statistiques ardues ont fait place à des tableaux où les inflexions d'une courbe expriment d'une manière lumineuse toutes les phases d'un phénomène patiemment observé. D'autre part, des appareils inscripteurs tracent automatiquement la courbe des phénomènes physiques ou physiologiques que leur lenteur, leur faiblesse ou leur rapidité rendraient inaccessibles à l'observation.

Parfois cependant l'inscription des phénomènes sous forme de courbes se trouvait en défaut; une autre méthode plus puissante s'est créée, la Chronophotographie. Ces nouvelles méthodes d'analyse du mouvement n'eussent pu se développer dans l'étroite enceinte d'un laboratoire de Physiologie. Ainsi, la locomotion comparée des diverses espèces animales exige que chacune d'elles soit étudiée dans le milieu qui lui convient: les poissons, dans les stations fluviales ou maritimes, les insectes, en pleine campagne, l'homme.

les quadrupèdes et les oiseaux, en de vastes espaces où ils puissent se mouvoir librement.

La Station physiologique fondée par le concours de l'État et de la Ville de Paris présente à cet égard des ressources qui n'existent nulle part ailleurs. C'est là qu'ont été exécutées avec des appareils nouveaux une grande partie des recherches que nous allons exposer. On verra, par des exemples variés, jusqu'où les anciennes méthodes permettaient de pousser l'analyse de certains phénomènes, et quels progrès ont été réalisés par la Chronophotographie.

Chacun des chapitres de cet ouvrage n'est qu'une sorte de programme ; pour le remplir il faudra qu'un savant y puisse consacrer son temps, ses aptitudes et ses connaissances spéciales.

Ce fait s'est déjà produit plusieurs fois : des géomètres, des hydrauliciens, des marins, des militaires, des artistes ont recouru à notre méthode ; les naturalistes enfin paraissent s'y intéresser. C'est à eux surtout que ce livre s'adresse, car il répond à leur préoccupation dominante, au désir de connaître, dans les phénomènes de la vie, ce qui échappe à l'observation même la plus attentive.

LE MOUVEMENT



CHAPITRE PREMIER DU TEMPS

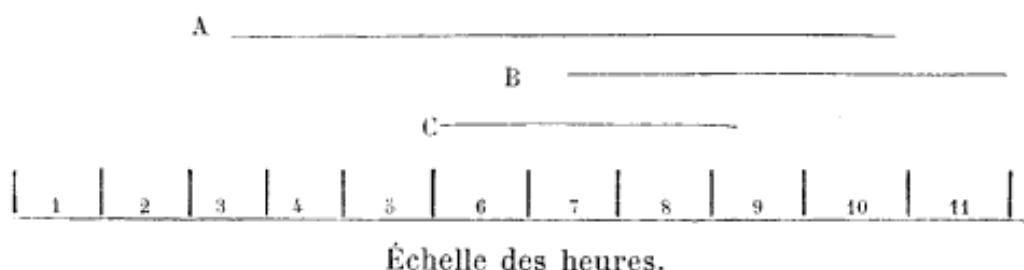
Sa représentation graphique; mesure du temps par la photographie.

SOMMAIRE. — Représentation graphique du temps. — De la Chronographie; principes de la méthode; transmission du mouvement au style qui en inscrit la durée. — Notation chronographique des appuis et levés des pieds dans la marche de l'Homme. — Notation des appuis et levés des quatre pieds du Cheval à différentes allures. — Notation du doigté d'un pianiste. — Applications de la Photographie à l'inscription du temps. — Mesure de la durée de l'éclairement produit par un obturateur photographique. — Mesure des intervalles de temps qui séparent des éclairements successifs.

Représentation graphique du temps. — Le temps, comme les autres grandeurs, peut s'exprimer graphiquement par des lignes droites plus ou moins longues. De cette façon la comparaison des durées de plusieurs phénomènes est ramenée à celle des longueurs de plusieurs droites parallèles juxtaposées.

Les rapports de succession de ces phénomènes s'expriment par les positions relatives des origines de ces droites.

Quant à la valeur absolue des durées et des successions, elles se mesurent au moyen d'une échelle dont les divisions représenteront, suivant le cas, des années, des jours, des fractions de seconde. Un exemple va rendre très clair ce genre de représentation du temps.



Supposons qu'il faille exprimer les durées et les rapports de succession de trois phénomènes A, B, C, qui se sont produits dans un espace de 11 heures. Ces relations de temps s'expriment de la manière la plus claire au moyen des trois lignes A, B, C et de l'échelle des heures qui les accompagne.

On voit sur ce tableau que le phénomène A commence à 2 heures et finit à 10 (soit 8 heures pour sa durée totale); que B, de 6 heures à 11 a duré 5 heures; que C de 3 heures à 8 heures $\frac{1}{4}$ n'a duré que 3 heures $\frac{1}{4}$. Quant à la succession de ces phénomènes, elle est également exprimée par les divisions de l'échelle auxquelles correspondent les origines des différentes lignes.

Autant le langage est lent et obscur quand il s'agit d'exprimer des rapports de durée et de succession, autant la représentation graphique est claire et facile; c'est vraiment l'expression naturelle de ces rapports. En outre, les notions que nous donne ce genre de représentation s'adressent à la mémoire des yeux qui est ordinairement la plus fidèle.

Un célèbre économiste anglais, W. Playfair, a dressé des tableaux chronologiques où la succession des différents souverains qui ont régné sur l'Angleterre est ainsi représentée. On y voit au premier coup d'œil l'âge auquel chacun d'eux est monté sur le trône et la durée de son règne; à côté de

cette notation chronologique, une autre série de lignes montre la succession des différents ministres ; une troisième notation montre les périodes de paix et de guerre qui ont eu lieu dans cette suite de temps. Ce tableau exprime d'une façon lumineuse la succession des événements. On ne saurait trop regretter que ce mode de représentation chronologique soit si peu usité dans notre pays.

Un genre de représentation semblable a été employé déjà en France, au siècle dernier, pour exprimer la succession et les durées de certains actes : Vincent et Goiffon (1) ont représenté par une notation chronologique la durée et la succession des appuis et levés des pieds du cheval aux diverses allures; cette expression est à coup sûr préférable au langage pour faire saisir ces rythmes compliqués.

De la Chronographie. — Les tableaux dont on vient de parler ne sont encore qu'un mode de représentation, plus clair il est vrai que les autres, mais dont la fidélité est subordonnée à l'exactitude des documents sur lesquels on opère. Dans les expériences, par exemple, où il faut apprécier des rapports de temps, il était d'une grande importance d'inscrire automatiquement cette expression graphique, c'est-à-dire de forcer le phénomène lui-même à tracer sur le papier sa durée et l'instant où il se produit. Cette méthode, partout où elle est applicable, est d'une perfection que rien n'égale; dans les autres cas, c'est la photographie qui intervient et donne encore des mesures précises de rapports de temps qui échappent à l'observation.

L'ensemble des procédés qui servent à représenter ainsi la durée et la succession des phénomènes constitue une méthode qu'on nomme *Chronographie*. Nous allons l'exposer en passant des cas les plus simples aux plus compliqués, montrant d'abord comment on fait inscrire la succession des appuis et levés des pieds d'un homme qui marche,

(1) *Mémoire artificielle des principes relatifs à la fidèle représentation des animaux tant en peinture qu'en sculpture*, par feu Goiffon et M. Vincent. In-fol. 1779.

puis ceux des quatre membres d'un cheval aux diverses allures, enfin comment s'inscrit automatiquement tout le doigté d'un pianiste sur le clavier de son instrument. Ce dernier problème peut être considéré comme un des plus difficiles à résoudre.

Principes de la Chronographie. — Supposons qu'une horloge conduise, d'un mouvement uniforme, une bande de papier; une plume fixée au-dessus de cette bande s'abaisse et se relève tour à tour à des intervalles et pendant des durées variables; les contacts de cette plume avec le papier qui marche laisseront leur trace sous forme de traits, plus ou moins espacés et plus ou moins longs, qui en exprimeront la succession et la durée. Si ces traits sont équidistants, ils montreront que les contacts se sont produits à des intervalles de temps égaux. Enfin, si l'on veut mesurer la durée absolue des contacts et celle des intervalles qui les séparent, il faut connaître exactement la vitesse de la bande sur laquelle on inscrit; on en contrôle la marche en y impriment les coups d'un balancier qui bat les secondes, ou bien, si le mouvement est très rapide, en traçant sur le papier les vibrations d'un diapason dont la période soit connue (1).

Transmission du mouvement au style qui en inscrit la durée. — Il n'arrive presque jamais que les phénomènes dont on veut inscrire la succession et la durée soient capables d'agir directement sur les styles inscripteurs. Le plus souvent il faut aller recueillir à une distance variable chacun de ces mouvements, et le conduire au style inscripteur qui lui correspond. On emploie à cet effet la transmission par l'air, bien supérieure dans ces cas à la transmission électrique. Voici la disposition qui sert à cet usage :

Deux appareils semblables entre eux sont réunis par un tube rempli d'air (fig. 4). Ces appareils, qu'on nomme tambours à levier, consistent chacun en une capsule de métal dont une des parois est une membrane de caoutchouc

(1) Voir, pour les principes généraux de la Chronographie, sa technique et ses applications, *La Méthode graphique*, p. 133, 142, 456.

tendue ; un levier est relié à cette membrane au moyen d'une bielle articulée. Si, en tirant sur un fil, on produit avec la main l'abaissement du premier levier, l'air comprimé dans le premier tambour passe dans le second dont le levier s'élève et reproduit, dans toutes ses phases, la traction exercée sur le fil. Quand la main se relève, un ressort antagoniste ramène le premier levier à sa position initiale, l'air repasse du

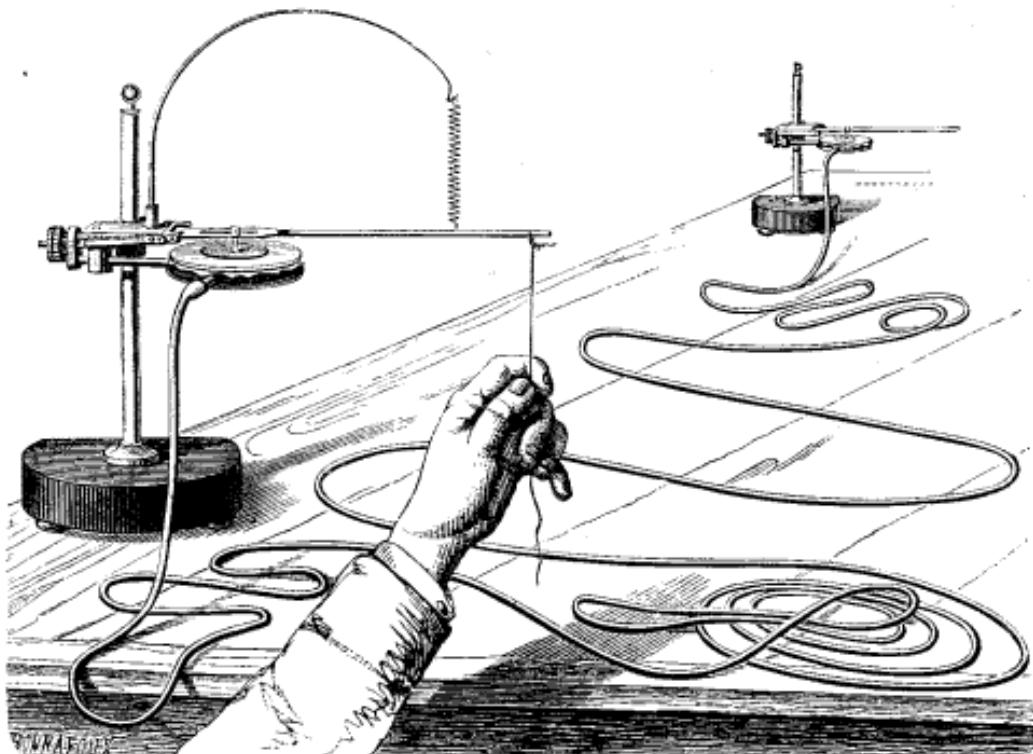


Fig. 1. — Disposition employée pour transmettre un mouvement au style qui en inscrit la durée et les phases.

second tambour dans le premier et le second levier s'abaisse.

Ainsi, les mouvements d'élévation et d'abaissement de la main seront transmis, avec un retard inappréhensible (celui du son), à un levier qui les inscrira sur un cylindre tournant recouvert de papier.

Or cette inscription peut se faire de deux manières : soit à la façon des signaux Morse, par contact ou non-contact de l'extrémité du style inscripteur sur la surface du cylindre, soit sous forme d'une courbe continue traduisant par ses élé-

vations et ses abaissements les différentes phases du mouvement (1).

Notation chronographique des appuis et levés des pieds dans la marche. — Un cylindre qui tourne d'un mouvement uniforme est couvert d'une feuille de papier ; deux styles traceurs juxtaposés toucheront par leurs pointes la surface du cylindre, l'un au moment des appuis du pied droit, l'autre au moment des appuis du pied gauche. Il s'agit de créer une disposition par laquelle l'appui de chacun des pieds sur le sol pro-

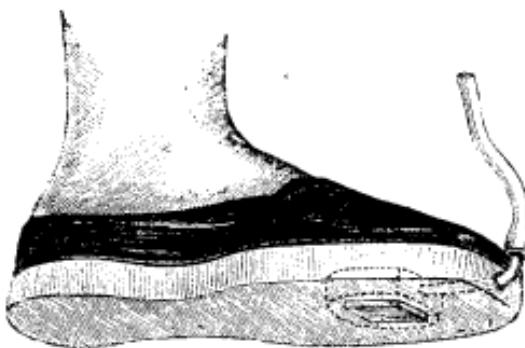


Fig. 2. — Chaussure exploratrice des appuis des pieds de l'Homme sur le sol; un tube de transmission fait communiquer la chambre à air avec le tambour du chronographe.

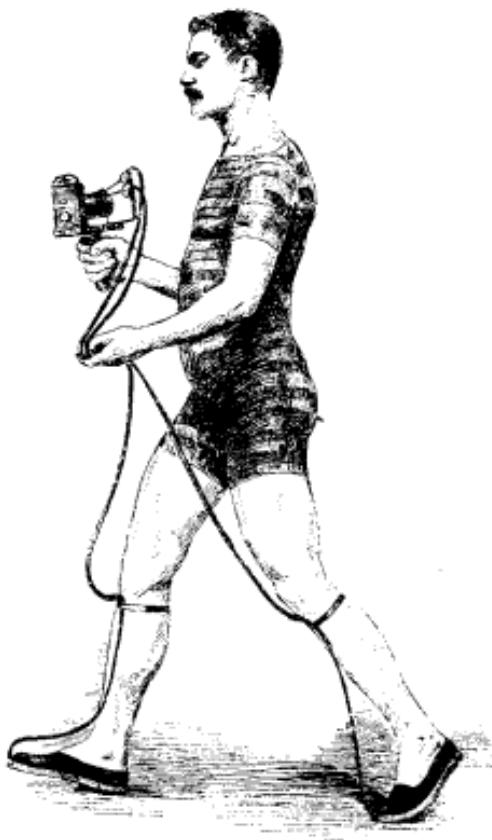


Fig. 3. — Marcheur muni des chaussures exploratrices et portant le chronographe.

duise le contact du style correspondant avec la surface du papier. C'est au moyen de tubes à air que se fait cette transmission.

On adapte à chacun des pieds du marcheur une chaussure spéciale (fig. 2) dont la semelle est formée d'une feuille épaisse de caoutchouc, évidée à son intérieur. La cavité

(1) Voir pour les différentes applications de ce genre d'inscription, *La Méthode graphique*, p. 426.

ainsi ménagée communique par un long tube flexible avec le tambour à levier inscripteur. A chaque appui d'un pied sur le sol, l'air contenu dans la cavité de la semelle comprimée s'échappe et va, par le tube de transmission, soulever le style inscripteur correspondant.

Le marcheur, muni de deux de ces chaussures *exploratrices* (fig. 3), porte de la main droite l'appareil inscripteur à deux styles. Quand il veut que le trait commence à se produire, il serre une boule de caoutchouc qu'il tient de la main

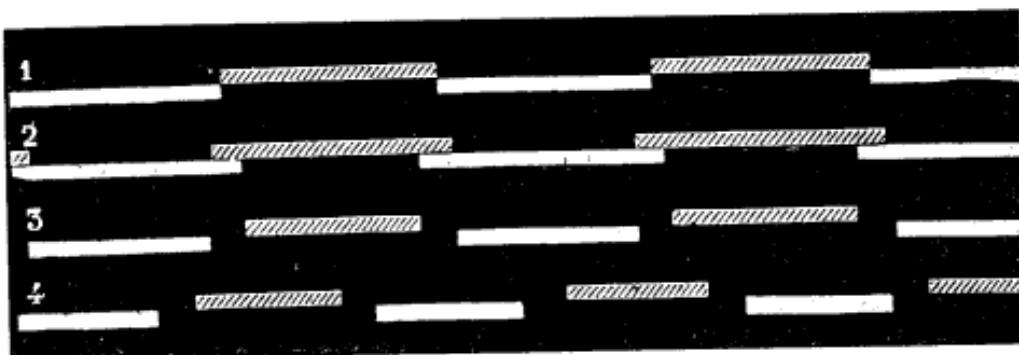


Fig. 4. — Notation chronographique des appuis des pieds de l'Homme à différentes allures.

gauche; un instant après, s'il relâche cette boule, les styles cessent de tracer.

On obtient ainsi des notations qui varient suivant l'allure de l'homme, la charge qu'il porte et la pente du terrain. La succession et la durée des appuis changent alors comme le montrent les quatre notations (fig. 4), où l'appui du pied droit est représenté par une ligne blanche, celui du gauche par une ligne teintée de hachures.

La *première* notation correspond à l'allure du pas en terrain plat; les appuis des deux pieds alternent d'une manière régulière.

La *seconde* est obtenue dans la montée d'un escalier; ici chaque pied ne quitte le sol que lorsque l'autre est déjà posé depuis un certain temps; il existe donc dans cette marche une phase de *double appui*.

La *troisième* est celle de la course; les appuis des pieds

sont brefs et séparés entre eux par une période dans laquelle aucun des pieds ne touche le sol : *période de suspension*.

La *quatrième* exprime une course plus rapide que la précédente ; les appuis des pieds sont plus courts, et les suspensions plus longues.

Notation des appuis et levés des quatre pieds du cheval à différentes allures. — Depuis longtemps des hommes spéciaux, doués d'une grande habileté d'observation, se sont attachés à déterminer le caractère propre de chacune des allures du Cheval d'après la succession des *battues* des pieds. Ce mot de battue indique qu'on ne cherchait à con-

naître que la succession des bruits que font les pieds d'un Cheval en frappant le sol, abstraction faite de la durée de ces appuis. L'oreille est, en effet, plus que tout autre sens, capable de saisir les intervalles de temps. On a même imaginé, pour cette raison, de munir les membres du Cheval de grelots qui rendaient des sons différents quand chacun des membres frappait le sol. Ces expériences laissaient toute fois, sur le rythme propre à chaque allure, des doutes qui n'ont été dissipés que par l'application de la chronographie. Voici la disposition qui a servi

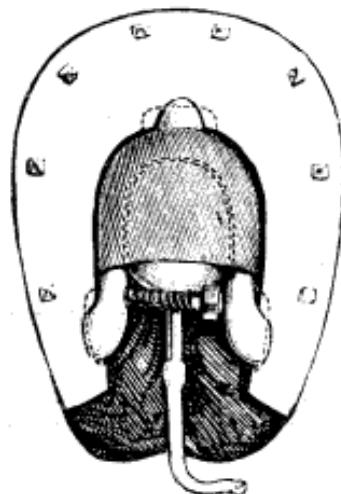


Fig. 5. — Explorateur des appuis des pieds du Cheval sur le sol ; un tube de transmission fait communiquer la chambre à air avec le tambour du chronographe.

pour ces études. Sous les sabots du Cheval, des boules de caoutchouc bourrées de crin sont maintenues par des crampons vissés dans l'ajusture des fers (fig. 5). Chacune de ces boules communique avec un long tube de caoutchouc relié par des bandes de flanelle aux membres du Cheval ; ces tubes se rendent à l'appareil inscripteur qui porte quatre styles traceurs et que le cavalier tient en main (fig. 6).

La pression des pieds sur le sol comprime les boules dont ils sont munis, et chasse dans les tambours inscrip-

teurs l'air que ces boules contiennent. Tout se passe donc comme dans les expériences faites sur l'homme. Toutefois, en raison du plus grand nombre des styles qui tracent la succession des appuis, on a groupé ces quatre styles en deux séries : l'une qui trace les appuis des pieds droit et gauche

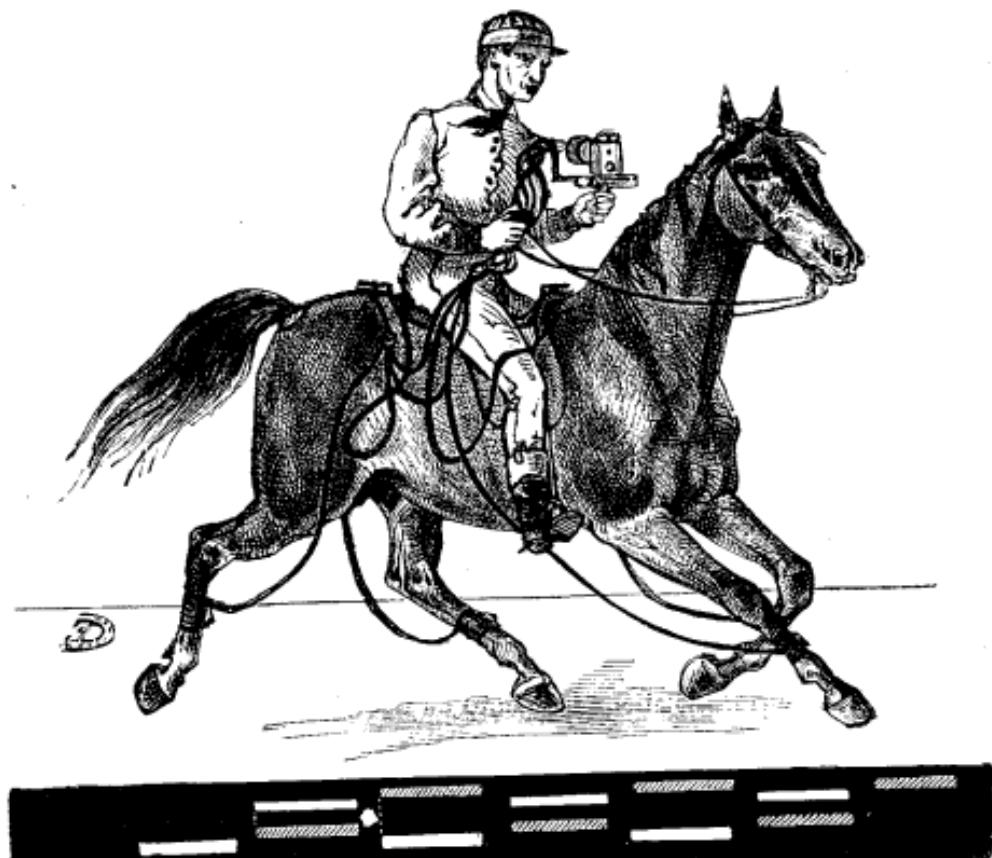


Fig. 6. — Cheval au grand trot. — Le point placé sur la notation correspond à l'attitude représentée.

d'avant, l'autre qui trace, au-dessous de la première, les appuis des pieds d'arrière. Dans ces deux séries, les pieds droits ont leur notation sous forme de lignes blanches, les gauches ont des notations teintées de hachures.

La figure 7 montre les notations ainsi obtenues dans trois des allures normales, l'amble, le pas et le trot (1). On voit que

(1) Il y a plus de vingt ans que ces expériences ont été faites ; nous nous souvenons avec reconnaissance de la complaisance inépuisable avec laquelle MM. Pellier et Gabriel Paillard nous ont aidé à les réaliser.

chaque notation est formée de quatre séries de traits, ressemblant à ce qu'on aurait en disposant parallèlement deux séries de notations obtenues sur l'Homme. C'est qu'en effet, on peut assimiler un quadrupède à deux animaux bipèdes, à deux Hommes par exemple, marchant l'un derrière l'autre ; l'un d'eux représenterait les membres antérieurs, l'autre les membres postérieurs. Ces deux Hommes font, dans le même temps, le même nombre de pas, mais les phases des

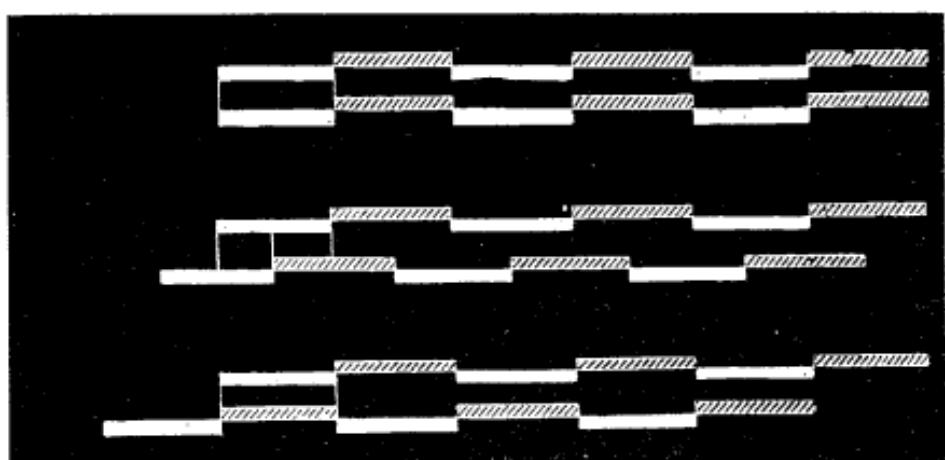


Fig. 7. — Trois notations des allures du Cheval : amble, pas et trot.

appuis et levés de leurs pieds peuvent affecter entre elles des rapports différents : c'est ce qui fait la différence des allures.

Ainsi, quand les pieds similaires d'avant et d'arrière se meuvent simultanément, le Cheval marche l'*amble* (1^{re} notation).

Si le pied antérieur droit est à la moitié de son appui quand le postérieur gauche frappe le sol, c'est l'allure du *pas* (2^e notation). Enfin, si les bipèdes, antérieur et postérieur, se meuvent en diagonale, c'est-à-dire si l'antérieur droit frappe le sol en même temps que le postérieur gauche, le cheval est au *trot* (3^e notation).

On voit avec quelle simplicité les expériences chronographiques retracent la succession et la durée des appuis dans

les allures marchées du Cheval (1); les allures sautées, c'est-à-dire les différentes formes du galop, s'analysent avec la même facilité, bien qu'elles soient beaucoup plus compliquées.

La figure 8 est la notation du galop à trois temps, c'est-à-dire dans lequel l'oreille entend trois bruits à chaque pas; elle permet de voir comment ces trois bruits sont produits. En lisant cette notation dans le sens ordinaire de l'écriture on voit, en A, que le premier bruit est formé par le pied postérieur gauche; le second par le choc simultané des



Fig. 8. — Galop à trois temps. A, indication des trois battues; B, indication du nombre des pieds qui forment l'appui du corps à chaque instant du galop à trois temps.

deux pieds du bipède diagonal gauche; enfin le troisième bruit est la battue du pied antérieur droit. On dit alors que le Cheval galope à droite.

La notation montre encore autre chose : elle fait connaître, en B, quels sont, à chaque instant, les pieds qui supportent la masse du corps. On voit ainsi que le corps repose d'abord sur un seul pied, puis sur trois, et ensuite successivement sur deux pieds, sur trois, sur un; enfin il est suspendu en l'air, jusqu'à ce qu'il retombe de nouveau sur le pied postérieur gauche.

Notation du doigté d'un pianiste. — La facilité avec laquelle la Chronographie analyse les actes les plus complexes et les plus variés dans leur succession et dans leur durée, nous

(1) Nous avons représenté dans cette notation le trot comme une allure marchée; ce cas est exceptionnel; le trot ordinaire est sauté et sa notation présente des temps de suspension comme celle de la course de l'Homme.

a encouragé à tenter l'inscription de mouvements dont la complexité défierait à coup sûr l'observateur le plus exercé : nous voulons parler des mouvements des doigts d'un pianiste sur le clavier de son instrument.

Au-dessous de chaque touche du clavier d'un harmonium on avait disposé de petits soufflets à air, dont chacun, relié par un tube spécial avec un petit soufflet semblable, commandait un style inscripteur. La série des styles était disposée suivant une ligne et ils étaient échelonnés dans l'ordre où se succèdent les différentes notes de la musique, c'est-à-dire en série ascendante suivant l'élévation du son. Tous ces styles traçaient sur une bande de papier enfumé conduite par un mouvement d'horlogerie ; enfin un peigne à cinq dents traçait une portée sur laquelle la position de chaque trait indiquait la tonalité du son inscrit, tandis que la durée du son était exprimée par la longueur du trait. Les demi-tons se distinguaient par deux traits minces parallèles au lieu d'un trait plein (1).

Dans une des soirées scientifiques de la Sorbonne, au cours d'une conférence sur les moteurs animés (2), un de nos amis, célèbre organiste, voulut bien exécuter quelques morceaux qui s'inscrivirent sous les yeux du public et dont nous donnons ici deux fragments (fig. 9, A et B).

Tous ceux qui sont familiers avec la lecture de la musique ordinaire déchiffreront aisément ces fragments. Ils ne diffèrent de la notation usitée que par la manière dont la durée des sons est représentée. Au lieu des signes conventionnels qui distinguent en blanches, noires et croches la durée des différents sons, en pauses et soupirs la durée des silences, la notation graphique exprime le temps par une longueur, c'est-à-dire par son expression graphique naturelle (3).

(1) Cette construction a été fort habilement réalisée par M. V. Tatin.

(2) Voir le journal *La Nature*, 5 oct. 1878.

(3) Dans ces dernières années plusieurs inventeurs ont construit des instruments analogues et nous croyons même n'avoir pas été le premier à réaliser l'inscription automatique d'un air exécuté sur un cla-

Applications de la Photographie à l'inscription du temps. — Si le phénomène dont on étudie les phases successives ne se prête pas à faire agir un style inscripteur, on peut recourir à l'emploi de la photographie. C'est ainsi

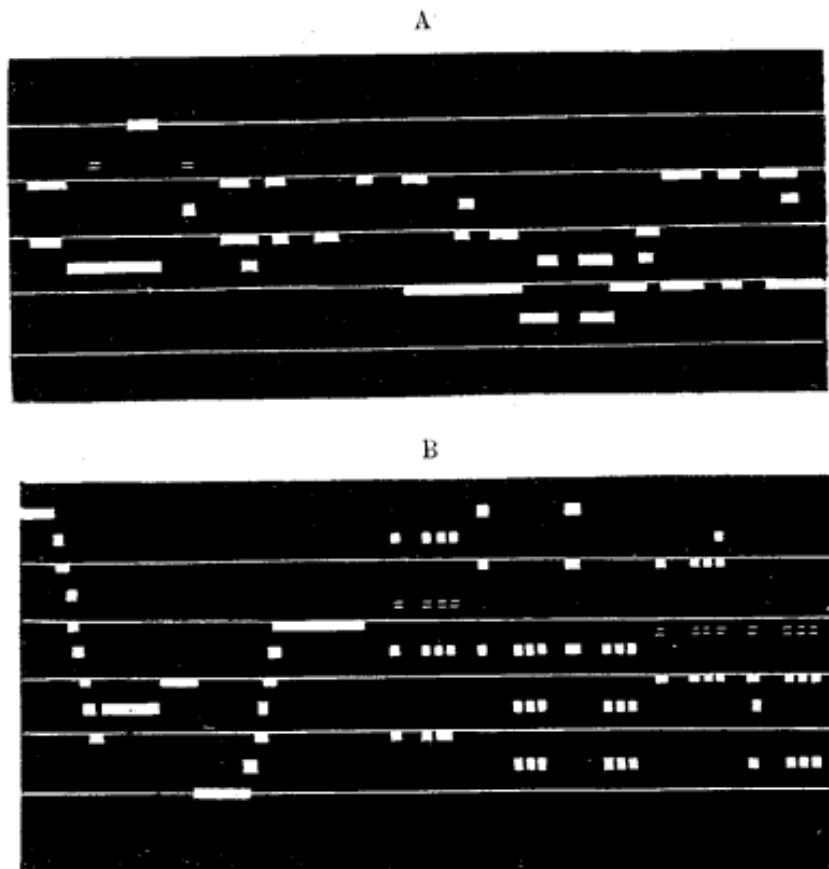


Fig. 9. — Notations de deux airs, A et B, exécutés sur le clavier d'un harmonium.

qu'on a réalisé un système de télégraphie optique où les apparitions intermittentes d'une lumière au poste expéditeur se traduisent, au poste récepteur, par la série de points et de traits qui forment les caractères de l'alphabet Morse.

La source lumineuse du poste expéditeur est alternative-

vier. Parmi les instruments récemment imaginés, il en est un, fort remarquable, dû à MM. Cros et Carpentier, et que l'on désigne sous le nom de *Mélographe*. Cet instrument ne se borne pas à enregistrer l'air qu'un artiste exécute, mais perfore une bande de papier qui, si on la fait repasser dans la machine, fait reproduire par l'instrument, avec une fidélité parfaite, le morceau que l'artiste avait exécuté.

ment découverte et masquée, pendant des temps variables, par les mouvements d'un écran : c'est l'appareil manipulateur. Les rayons émanés de cette source sont rendus parallèles, au moyen d'une lentille, et traversent l'espace pour venir tomber sur une lentille semblable du poste récepteur. Au foyer de cette seconde lentille, la source lumineuse donne son image sous forme d'un point brillant. Si la surface sensible où se forme cette image se déplace d'un mouvement uniforme, de courts éclats de la source lumineuse produisent des points ; des éclats plus prolongés donneront des traits. Une disposition de ce genre serait susceptible de nombreuses applications scientifiques.

Cependant ce n'est pas sous cette forme que la Photographie a été le plus utilement appliquée aux mesures de temps. Elle a servi surtout à deux choses : d'une part à mesurer la durée des éclaircements produits par les obturateurs photographiques ; d'autre part à déterminer les intervalles de temps qui séparent des éclaircements consécutifs. Nous décrirons successivement ces deux procédés, dont la connaissance est indispensable pour l'analyse photographique du mouvement.

Mesure de la durée de l'éclaircement produit par un obturateur photographique. — On appelle généralement *instantané* tout obturateur qui donne un temps de pose assez bref pour que les objets en mouvement soient représentés dans l'épreuve avec des contours aussi nets que s'ils eussent été immobiles. Mais cette désignation n'a rien de rigoureux. En effet, tel obturateur avec lequel les passants de la rue seront photographiés nettement, dans les différentes attitudes de la marche, sera incapable de donner une image nette du pied d'un Cheval au trot. Il faudra un temps de pose bien plus bref pour saisir les positions des ailes d'un Oiseau qui vole, et cette brièveté, à son tour, ne sera pas suffisante pour fixer les attitudes de l'aile d'un Insecte.

On doit donc définir le temps de pose donné par un obturateur et le mesurer en fractions de seconde. Voici

comment la Photographie permet d'obtenir cette mesure.

Soit (fig. 10) une aiguille brillante qui tourne au-devant d'un cadran couvert de velours noir et portant des divisions blanches. Le mouvement de cette aiguille devra être parfaitement uniforme ; nous nous servons à cet effet d'un rouage d'horlogerie muni d'un régulateur de Foucault. Ce rouage, caché derrière le cadran, fait faire à l'aiguille un tour en 1 seconde et demie, soit $90''$. La circonference du cadran porte 48 divisions qui, par conséquent, comprennent entre elles un espace angulaire correspondant à $5''$.

Braquons sur ce cadran, dont l'aiguille tourne sans cesse, un appareil photographique muni de l'obturateur pour lequel nous voulons connaître le temps de pose. On provoque l'ouverture de cet obturateur en pressant une poire en caoutchouc. Si la durée de pose n'est pas très courte, l'image de l'aiguille ne sera pas nette, mais couvrira un secteur d'un certain nombre de degrés. Il serait toutefois impossible de déterminer d'une façon absolue le nombre de degrés occupés, dans ce cas, par l'image de l'aiguille. Cela tient à la construction même des obturateurs, qui tous, à des degrés divers, produisent une admission partielle de la lumière au commencement et à la fin de leur ouverture (1).

Ce n'est donc qu'en tenant compte approximativement de l'espèce de pénombre qui voile les contours de l'aiguille qu'on peut assigner à l'espace qu'elle a parcouru pendant la pose une étendue de 3 ou 4 degrés, ce qui correspondrait à $1/25$ de seconde environ.

(1) Pour juger de la forme réelle de l'aiguille, il faut comparer cette image à celle de la fig. 11 où l'éclairement était assez bref pour ne pas altérer visiblement la forme de cette aiguille en mouvement.



Fig. 10. — Aiguille parcourant le cadran chronométrique et mesurant la durée de l'éclairement.

Il est très difficile qu'un obturateur qui donne un éclairage unique produise un temps de pose très court; il faut pour cela que le ressort qui l'actionne soit extrêmement puissant et les masses à mouvoir extrêmement légères; il est toutefois quelques-uns de ces obturateurs qui donnent des durées de poses réduites à $1/200$ de seconde.

Les obturateurs dont il sera question dans ces études sont tout à fait spéciaux: ils sont formés de disques fenêtrés qui peuvent acquérir, par leur mouvement de rotation continu, une très grande vitesse. Les fenêtres dont ils sont percés, passant dans l'intérieur de l'objectif avec une extrême rapidité, produisent des admissions de lumière extrêmement courtes. C'est ce qui donne aux images des contours très nets, ainsi qu'on le voit figure 11. En outre, ces images se suivent à des intervalles très réguliers, car le mouvement de l'aiguille sur le cadran et celui des disques obturateurs sont tous deux uniformes.

Mesure des intervalles de temps qui séparent les éclairages successifs. — La netteté des images permet de mesurer avec précision, non pas le temps de pose, qui est trop court pour être appréciable, mais l'intervalle de temps qui sépare deux poses successives. Or, c'est le point essentiel dans les mesures que nous aurons à faire de la durée de certains phénomènes.

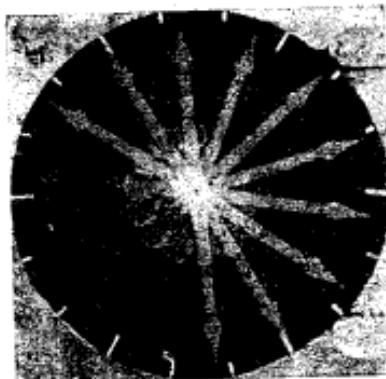


Fig. 11. — Positions successives de l'aiguille sur le cadran chronométrique, mesurant les intervalles de temps qui séparent les éclairages successifs.

En effet, pourvu qu'on dispose d'un rouage bien réglé pour mouvoir l'aiguille sur le cadran chronométrique avec une vitesse connue, on peut imprimer au disque obturateur un mouvement quelconque; l'intervalle entre deux éclairages sera toujours mesuré par l'espace angulaire qui sépare, sur le cadran, deux images consécutives de l'aiguille.

Or si, pendant ce temps, un objet visible dans le champ de l'objectif vient à se déplacer, on aura sur la plaque sensible plusieurs images de cet objet, occupant des positions plus ou moins éloignées les unes des autres. Dans la mesure du temps écoulé entre chacun des déplacements de l'objet, les changements de position de l'aiguille sur le cadran chronographique serviront en quelque sorte d'*échelle du temps*.

On verra toutes les ressources que donne cette mesure du temps quand nous traiterons de la Chronophotographie.

CHAPITRE II

DE L'ESPACE

Sa mesure et sa représentation par la Photographie

SOMMAIRE. — La Photographie tend à remplacer les dessins, les plans et les figures en relief. — Elle retrace les lieux de l'espace qu'un mobile a parcourus. — Trajectoire photographique des mouvements d'un point dans l'espace ; sa trajectoire stéréoscopique. — Déplacements d'une droite dans l'espace ; formes solides qu'elle engendre : cylindre, hyperboleïde, cône, etc. — Déplacements d'une courbe dans l'espace ; photographie des formes qu'elle engendre : sphère, ellipsoïde, etc. — Images stéréoscopiques des figures à trois dimensions. — Formes engendrées par le déplacement de corps solides ; effets de la lumière et des ombres.

La Photographie tend à remplacer les dessins, les plans, les figures en relief. — La position des corps dans l'espace, leurs formes et leurs dimensions ont leur expression naturelle dans les plans géométriques. Ces plans, dessinés à une échelle connue, renferment tous les renseignements désirables. Toutefois, depuis quelques années, la Photographie tend à se substituer au dessin et le remplacera certainement dans la majorité des cas. Elle donne, en effet, avec une facilité singulière, des images d'une fidélité absolue ; elle en réduit ou en agrandit les dimensions aux proportions que l'on désire ; enfin elle permet d'introduire dans ces images elles-mêmes l'échelle métrique avec laquelle on mesurera les dimensions réelles des objets représentés. Pour avoir une échelle métrique sur l'image, il suffit de placer, à côté de l'objet qu'on photographie, une règle à divisions bien apparentes.

Pour les corps à trois dimensions, quand le dessinateur en

veut exprimer le relief, il doit s'astreindre aux règles de la perspective et tenir compte de la manière dont ces corps sont éclairés à l'instant où il les représente; mais les jeux de la lumière qui changent à toutes les heures du jour lui créent des difficultés sans nombre.

La Photographie donne instantanément l'image des objets les plus multiples, avec leur perspective correcte, et dans les conditions d'éclairage où ils se trouvaient tous à un même instant. Elle traduit ainsi l'aspect des corps de la nature, tels que nous les voyons en les regardant d'un seul œil.

Si l'on veut obtenir la sensation du relief que les corps présentent quand nous les regardons avec les deux yeux, il faut recourir aux images stéréoscopiques.

La Photographie représente les lieux de l'espace qu'un mobile a parcourus. — Quand un objet se déplace, il est souvent nécessaire d'exprimer ses changements de position, c'est-à-dire les lieux de l'espace qu'il a successivement occupés. Il faut admettre tout d'abord que notre œil a pu suivre et que notre mémoire ait fidèlement gardé toutes les phases du parcours de cet objet, ce qui est bien rarement possible; le dessin peut alors intervenir et retracer sur le papier la projection de la trajectoire parcourue. La figure qu'il faudra tracer sera plus ou moins compliquée, suivant qu'on n'exprimera que le mouvement d'un point, ou qu'on représentera celui d'une ligne, d'une surface ou d'un solide, enfin, suivant que le mouvement se sera produit dans une ou plusieurs dimensions de l'espace.

Quand il ne s'agit que du mouvement d'un point, on peut, dans certains cas, tourner la difficulté en forçant ce point qui se déplace à tracer lui-même son parcours (1). Toutefois il faut que ce point puisse être relié, directement ou indirectement, au style qui en inscrit la trajectoire, et que la force qui le déplace soit assez grande pour entraîner, sans

(1) Les différents procédés pour l'inscription mécanique des déplacements d'un point suivant une ou plusieurs dimensions de l'espace ont été exposés dans *La Méthode graphique*.

en être modifiée, les organes qui doivent inscrire le mouvement avec toutes ses phases.

Mais si le point est inaccessible, si la force qui le déplace est très faible, ou enfin si la trajectoire qu'il suit est très compliquée, il faudra, pour obtenir la représentation du mouvement de ce point, se placer dans des conditions nouvelles et employer la Photographie d'une manière spéciale que nous allons décrire.

Principes de la Photographie sur champ obscur. — Lorsqu'un appareil Photographique est braqué devant un champ obscur, la plaque sensible n'est pas impressionnée, puisqu'elle ne reçoit pas de lumière. Mais si, devant ce champ, on place un objet blanc, bien éclairé, celui-ci réfléchira la lumière, et son image se peindra sur la plaque. Enfin, pendant que l'objectif est ouvert, si l'objet blanc se déplace, il se produira sur la plaque sensible une trainée qui suivra exactement tous ces déplacements : ce sera la trajectoire de cet objet, ou plus exactement la projection de cette trajectoire sur le plan de la plaque sensible. L'image sera plus ou moins réduite, suivant la distance à laquelle se trouvait l'objet et suivant la longueur focale de l'objectif employé.

Trajectoire photographique des mouvements d'un point dans l'espace. — Afin de faire saisir les avantages que présente la Photographie pour l'inscription d'une trajectoire, nous choisirons comme exemple un cas où l'observation directe soit incapable de nous renseigner et où, d'autre part, l'inscription mécanique ne soit pas applicable. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de déterminer les lieux de l'espace par lesquels passe la pointe de l'aile d'un Oiseau qui vole. Le point dont nous voulons connaître les positions successives sera l'extrémité d'une des grandes plumes nommées rémiges, incapables, en raison de leur flexibilité, de donner la force motrice nécessaire à l'inscription mécanique de leur trajectoire ; de plus, ce point est inaccessible, puisque l'Oiseau vole librement à une certaine distance de l'observateur.

L'expérience se fait sur une corneille noire dont l'une

des plus longues rémiges est munie, à son extrémité, d'un petit morceau de papier blanc. On fait voler cet Oiseau devant un fond obscur sur lequel est braqué l'appareil photographique. Comme tout est noir au-devant de l'objectif, l'Oiseau aussi bien que le champ sur lequel il se projette, la plaque sensible ne reçoit d'autre lumière que celle que réfléchit le petit morceau de papier blanc vivement éclairé par le soleil. L'image de ce point blanc doit

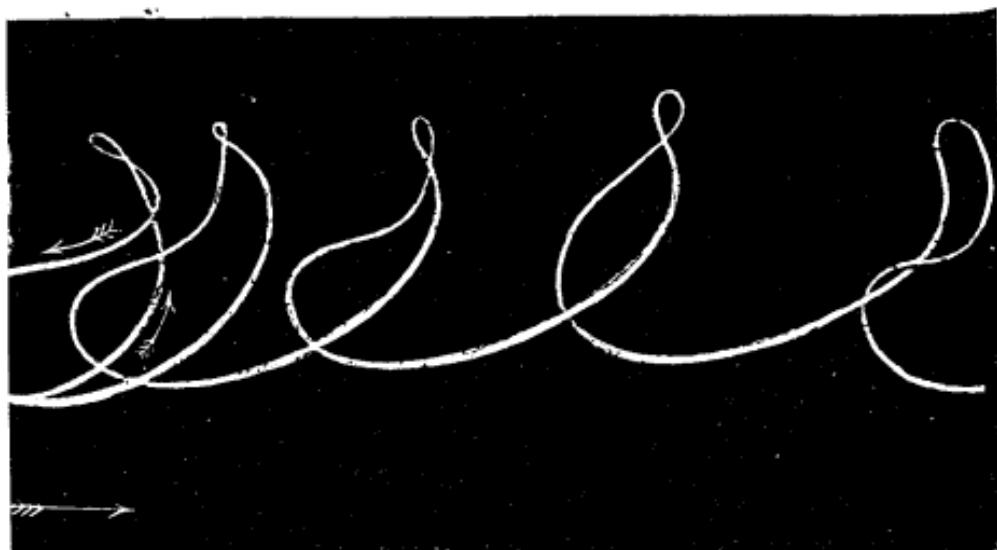


Fig. 12. — Trajectoire de l'extrémité de l'aile d'une Corneille. Une paillette brillante attachée à la 2^e rémige suivait le parcours indiqué par de petites flèches. En bas de la figure une flèche droite et horizontale exprime la direction du vol.

laisser sa trace sur tout le parcours qu'elle a suivi sur la plaque sensible. On a obtenu de cette façon la figure 12 sur laquelle des flèches indiquent le sens dans lequel s'est fait le déplacement.

Trajectoires stéréoscopiques. — La trajectoire de la pointe de l'aile ne peut pas être contenue dans un plan, car le mouvement de l'aile autour de l'articulation de l'épaule se fait suivant les trois dimensions. Aussi, notre figure photographique ne donne-t-elle qu'une projection de cette trajectoire ; elle est donc insuffisante pour exprimer le trajet réellement effectué. Toutes les fois qu'un mouvement se fait suivant les trois dimensions, il faut recourir à une dispo-

sition un peu plus compliquée, et en recueillir la trajectoire stéréoscopique.

Trajectoires stéréoscopiques. — Prenons le cas d'un Homme qui marche en s'éloignant de l'observateur et considérons en particulier un point du tronc de cet Homme : ce point s'élève et s'abaisse tour à tour suivant que les pieds sont à l'appui ou au levé ; il est en outre soumis à des balancements latéraux ; enfin il se déplace dans le sens de la marche.

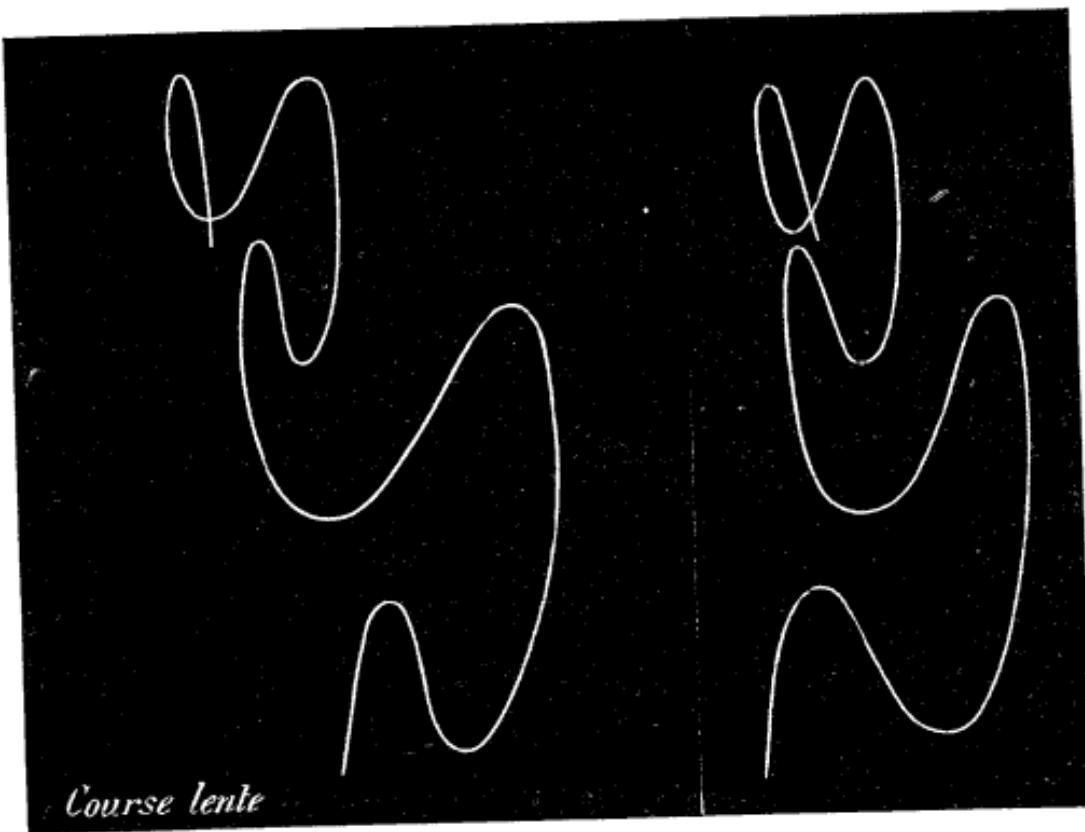


Fig. 13. — Trajectoire stéréoscopique d'un point brillant placé au niveau des vertèbres lombaires d'un Homme qui marche en s'éloignant de l'appareil photographique.

C'est donc par rapport aux trois dimensions de l'espace que devront être représentés les déplacements du point considéré.

Le marcheur étant complètement vêtu de noir, on applique un bouton de métal brillant sur le point du trone dont on veut connaître la trajectoire et l'on fait marcher cet Homme au-devant d'un champ obscur sur lequel sera braqué un

appareil stéréoscopique à deux objectifs. Chacun de ces objectifs fonctionnant comme l'objectif unique dans l'expérience précédente, on a deux images du point brillant. C'est ainsi que fut obtenue la figure 13 qui montre deux images de la même trajectoire prises de deux points de vue différents. Lorsqu'on examine ces images avec le Stéréoscope, elles présentent un relief très prononcé (1).

Déplacements d'une droite dans l'espace; Photographie des formes solides qu'elle engendre : cylindre, hyperboloidé, cône, etc. — Une droite qui se déplace de différentes manières dans un plan, couvre des surfaces de formes variées, ou bien, si l'on ne considère que les positions qu'elle a occupées à divers instants de son parcours, ces positions se traduisent par différentes figures géométriques que l'on peut tracer sur le papier.

Mais si la droite se meut suivant les trois dimensions de l'espace, elle parcourt des surfaces dont on ne pourrait représenter par le dessin que les projections. Dans ce cas, on a recours à des figures en relief, qui ont l'avantage de donner aux débutants une idée claire de ces formes solides. Au moyen de fils tendus entre deux armatures de métal, on peut montrer comment les positions successives d'une droite produisent : le cylindre, le cône, les conoïdes et les hyperboloides de révolution. Il existe, au Conservatoire des Arts et Métiers notamment, une riche collection de ce genre

(1) Comme beaucoup de personnes savent, sans le secours du Stéréoscope, voir le relief de ces sortes d'images, nous avons publié cette figure et certaines autres qu'on trouvera plus loin. Pour obtenir l'effet de relief sans Stéréoscope, il faut diriger son regard sur un point éloigné, puis interposer l'image entre l'œil et ce point. On voit double la page du livre et l'on a par conséquent la sensation de quatre images de la trajectoire. Au moyen de légers mouvements imprimés au livre, et par de légers changements de la direction des deux yeux, on amène les deux images les plus internes à se superposer exactement. Dès lors, l'œil s'accorde de lui-même à la vision nette de cette image centrale, qui apparaît en relief, entre deux autres images qui, elles, restent dépourvues de relief.

Avec un peu d'exercice on arrive ainsi très vite à se passer du Stéréoscope pour l'examen de ces sortes de figures.

de figures, fort utiles pour vulgariser les notions de la Géométrie dans l'espace.

Or, si la Géométrie est devenue aujourd'hui une science purement spéculative, il ne semble pas douteux qu'elle ait eu, comme toutes les autres sciences, une origine expérimentale. Il est naturel d'admettre que l'idée de la ligne droite n'est pas sortie du cerveau de l'homme à titre d'abstraction pure, mais plutôt qu'elle y est entrée à la vue d'un fil tendu, par exemple, ou de tout autre objet rectiligne. De même la conception du plan ou du cercle a dû naître à la vue de surfaces planes ou d'objets de forme circulaire.

Il y a pour ainsi dire une trace de ces origines concrètes des conceptions des géomètres dans la définition qu'ils donnent des figures solides ou à trois dimensions : ces figures, disent-ils, sont *engendrées* par des lignes droites ou courbes qui se déplacent de différentes manières. Ainsi, une surface cylindrique de révolution est engendrée par une droite qui se meut parallèlement à une autre droite immobile, en restant à une distance constante de celle-ci. La droite qui se déplace est la *génératrice* du cylindre, celle qui reste fixe en est l'axe.

On suppose, dans cette définition, que la ligne en mouvement laisse la trace de son passage dans tous les points de l'espace qu'elle a successivement parcourus. Or cette supposition, purement fictive, peut devenir une réalité grâce à l'emploi de la Photographie. En effet, en prenant successivement une série d'images instantanées d'un fil éclairé qui se déplace devant un champ obscur, on a des figures qui rappellent de tous points les formes stéréoscopiques obtenues avec une série de fils tendus entre des armatures métalliques. Voici comment on opère.

Devant un champ obscur on fait tourner une tige de métal verticale munie de deux bras transversaux exactement superposés. Cette charpente métallique doit être noircie à la fumée d'une bougie pour être le moins visible qu'il se pourra. Entre les extrémités libres des deux traverses, qui sont d'ailleurs d'égale longueur, est tendu un fil blanc ver-

tical qui, dans le mouvement de rotation imprimé aux traverses, se déplacera circulairement autour de l'axe et engendrera dans l'espace une surface cylindrique.

Un appareil photographique dirigé sur ce fil, et ouvert en permanence, recevrait une image qui serait la projection d'un cylindre sur un plan. Mais cette trajectoire continue ne ferait

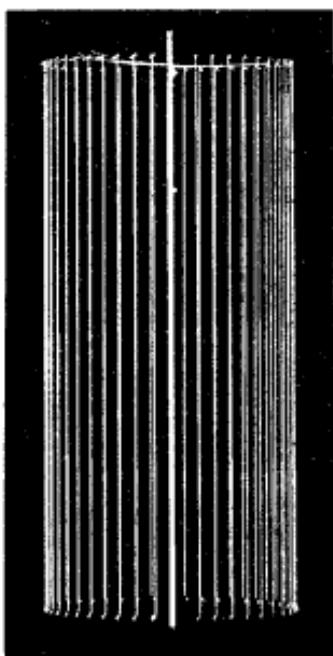


Fig. 14. — Cylindre engendré par le déplacement d'un fil blanc tournant autour d'un axe central.

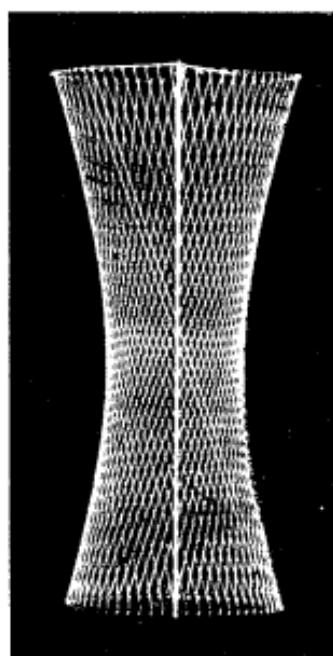


Fig. 15. — Hyperboloïde de révolution une seule nappe engendré par la rotation d'un fil oblique à l'axe.

pas facilement comprendre la manière dont elle est engendrée. Si l'on veut montrer qu'elle résulte bien des déplacements du fil qui viennent, à chaque instant, ajouter un nouvel élément à la surface du cylindre, il convient de recueillir les images de ce fil à des intervalles de temps successifs, c'est-à-dire en admettant la lumière d'une manière intermittente. On obtient ainsi la figure 14 (1).

(1) Dans cette figure, l'axe central paraît blanc, parce que, si faible que soit la quantité de lumière réfléchie par sa surface noircie, cette lumière est renvoyée sur la plaque à chaque ouverture de l'objectif. Or, comme l'axe demeure en place, ces impressions, dont chacune est très faible, s'ajoutent sur le même endroit de la plaque sensible et finissent par s'y marquer fortement.

Si le fil, au lieu d'être parallèle à l'axe autour duquel il tourne, était oblique à cet axe, la figure engendrée serait un hyperboloïde de révolution (fig. 45). Enfin si, de plus en

plus oblique, le fil était rapproché de l'axe jusqu'à le toucher, la figure décrite serait un cône.

La Photographie sur champ obscur se prête très bien à faire saisir la génération du cône et de l'hyperboloïde ; elle fait même ressortir clairement les relations que ces deux figures présentent entre elles.

On sait que, devant un champ parfaitement obscur, on peut prendre un nombre indéfini d'images. Lors donc qu'une figure aura été formée sur la plaque sensible, on en pourra former une autre dans le même lieu ; cette dernière s'imprimera également sur la plaque. C'est ce qui a été fait pour la figure 46. Après avoir pris l'image d'un hyperboloïde de révolution, on a fermé le châssis et disposé le fil de manière à former un cône. En rouvrant le châssis on a pris l'image de ce cône. Les deux figures, ainsi réunies, montrent extérieurement l'hyperboloïde, et à l'intérieur son cône asymptote.

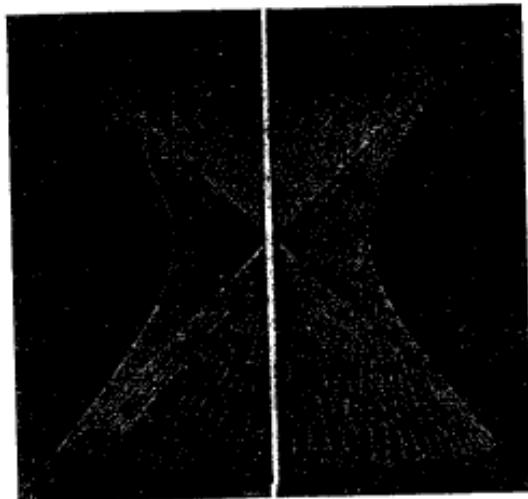


Fig. 46. — Hyperboloïde de révolution avec son cône asymptote.

indéfini d'images. Lors donc qu'une figure aura été formée sur la plaque sensible, on en pourra former une autre dans le même lieu ; cette dernière s'imprimera également sur la plaque. C'est ce qui a été fait pour la figure 46. Après avoir pris l'image d'un hyperboloïde de révolution, on a fermé le châssis et disposé le fil de manière à former un cône. En rouvrant le châssis on a pris l'image de ce cône. Les deux figures, ainsi réunies, montrent extérieurement l'hyperboloïde, et à l'intérieur son cône asymptote.

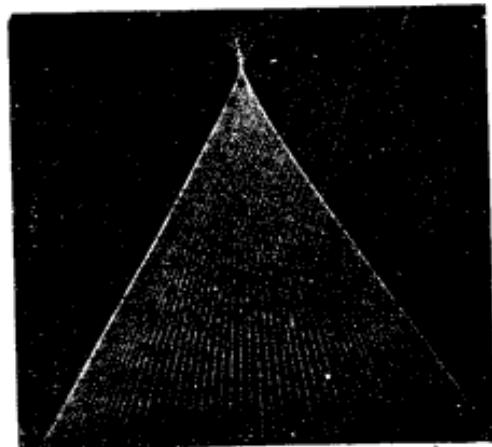


Fig. 47. — Conoïde engendré par le mouvement d'un fil blanc.

Conoïdes. — Si le fil blanc, au lieu de tourner autour d'un axe comme dans les expériences qu'on vient de lire, est animé à l'une de ses extrémités d'un mouvement circulaire,

tandis que l'autre se meut suivant une droite, on obtient, suivant le rapport de ces deux mouvements, différentes formes de conoïdes dont la figure 17 est un exemple.

Déplacements d'une courbe dans l'espace. Photographie des formes qu'elle engendre : sphère, ellipsoïde, etc. — Parmi les formes engendrées par les déplacements d'une courbe, la plus facile à produire est la sphère. On l'obtient avec un demi-anneau de fil métallique blanchi tournant autour d'un axe vertical comme diamètre. La figure 18 est la projection de la sphère sur un plan (les imperfections qu'elle présente tiennent à ce qu'on n'a pas pu donner une courbure parfaitement régulière au fil qui formait le demi-anneau).

Il est inutile de multiplier davantage les exemples des formes engendrées par le déplacement des courbes, telles que les ellipsoïdes, les paraboloïdes de révolution, etc.

Afin de rendre plus saisissantes ces figures à trois dimensions, nous les avons recueillies sous forme d'images stéréoscopiques, en procédant de la manière suivante.

Images stéréoscopiques des figures à trois dimensions. — Prenons une chambre stéréoscopique à deux objectifs bien égaux de longueur focale. Les montures de ces objectifs sont coupées, perpendiculairement à leur axe, par une fente profonde dans laquelle tourne un disque percé de deux fenêtres diamétriquement opposées. Ce disque tourne d'un mouvement uniforme, démasque simultanément l'ouverture des deux objectifs, et l'admission de lumière se produit deux fois à chaque tour du disque.

Un rouage moteur fait tourner le disque obturateur; au moyen d'une poulie et d'un câble sans fin, le même rouage sert à donner le mouvement à l'axe et aux fils blanchis qui

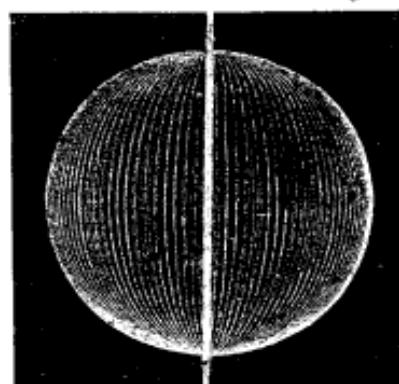


Fig. 18. — Sphère engendrée par la rotation d'un demi-anneau de fil blanc.

engendrent par leurs déplacements les différentes figures que l'on veut produire.

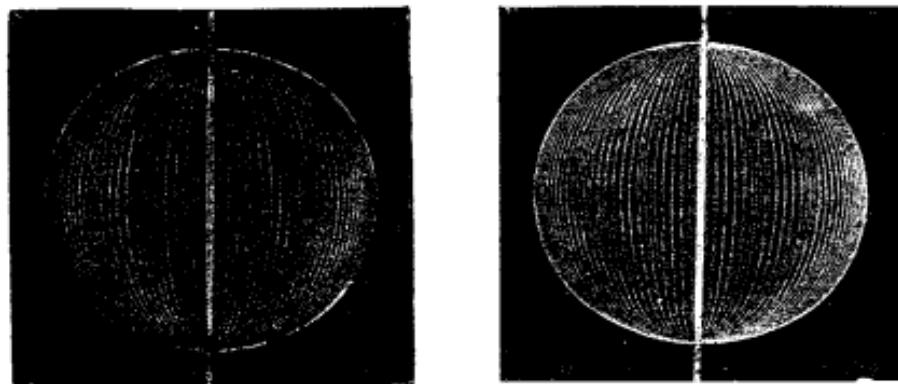


Fig. 19. — Sphère engendrée par la rotation d'un demi-anneau de fil (images stéréoscopiques).

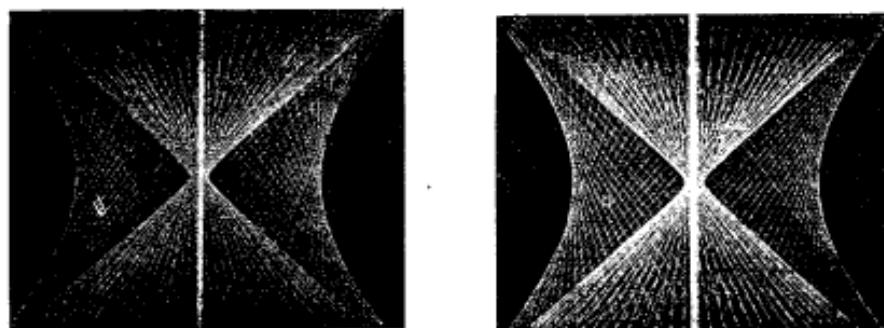


Fig. 20. — Hyperboloïde et son cône asymptote (images stéréoscopiques).

C'est avec cette disposition qu'ont été obtenues les figures 19 et 20.

Formes engendrées par le déplacement de corps solides ; effets de la lumière et des ombres. — Au lieu du fil fin qui nous a servi tout à l'heure pour former dans l'espace la surface d'une sphère, prenons un corps solide ; l'aspect de la figure obtenue sera tout différent.

Une bande de papier bristol courbée en arc suivant sa longueur, blanche sur sa convexité et noire sur sa face concave, donnera en tournant la figure 21. Sauf quelques discontinuités dues à l'intermittence de l'éclairage, la surface engendrée ressemble à celle d'une sphère solide recevant la

lumière de gauche et d'en haut, tandis que sa face opposée est à peine éclairée de quelques reflets.

Cette apparence est facile à expliquer : en effet, la bande de

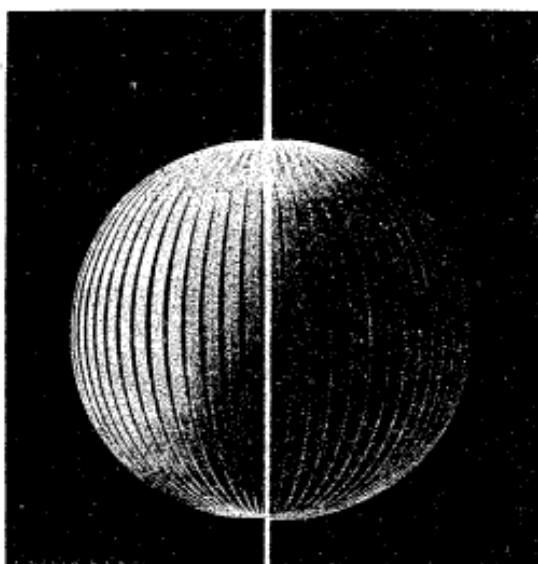


Fig. 21. — Sphère engendrée par la rotation d'un demi-anneau plat, blanchi extérieurement et noir à l'intérieur.

papier qui parcourt successivement tous les méridiens de la sphère fictive se trouve, à chaque instant, dans les mêmes conditions d'éclairage qu'un méridien qui aurait la même position sur une sphère véritable.

Aspect paradoxal produit par certaines conditions d'éclairage. — Au lieu de la bande plate dont la convexité seule réfléchissait la lumière dans l'expérience précédente, prenons une bande de même papier, mais blanche sur ses deux faces. Nous obtiendrons (fig. 22) une apparence singulière que le relief stéréoscopique va nous aider à comprendre.

Sur cette sphère on voit, en même temps, la surface extérieure et la surface intérieure. Cela tient à ce que l'arc de papier bristol, étant blanc en dedans et en dehors, réfléchissait la lumière, tantôt par une de ses faces et tantôt par l'autre, suivant les phases de son parcours. Lorsque cet arc présentait sa convexité à la lumière, c'est-à-dire à gauche et en

haut, la partie correspondante de la sphère engendrée était bien visible; dans la partie diamétralement opposée de son parcours, l'arc recevant la lumière sur sa face concave,

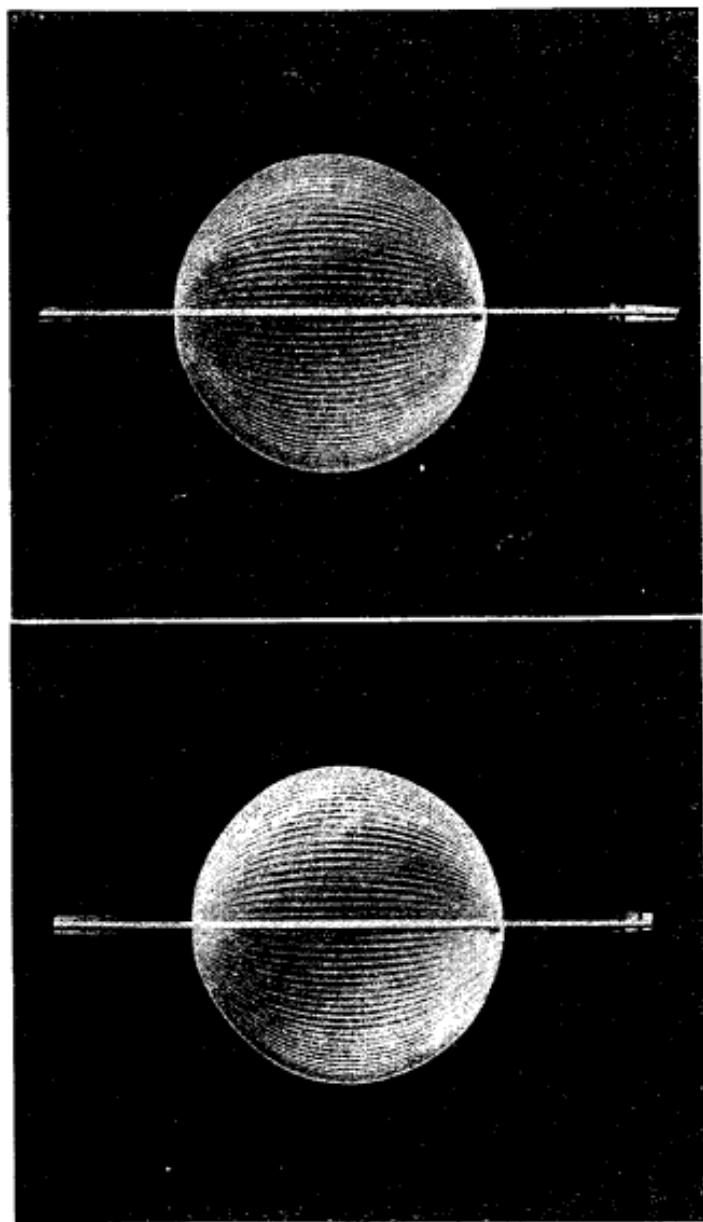


Fig. 22. — Sphère engendrée par un demi-anneau plat blanchi sur ses deux faces (images stéréoscopiques).

c'est l'intérieur de la sphère, en bas et à gauche, qui se trouvait éclairé.

Au premier abord, cette figure semble être transparente; mais, d'une part, nous savons qu'elle a été formée par une matière opaque, et d'autre part, toutes les substances

transparentes connues réfléchiraient autrement la lumière.

En réalité, il s'agit ici d'une forme *imaginaire* dont on ne saurait trouver la réalisation dans la Nature. Ces formes imaginaires sont encore plus étranges quand, au lieu d'une substance mate, on se sert, pour les former, d'une matière polie réfléchissant par certains points de sa surface les rayons du soleil.

La figure 23 a été obtenue par la rotation d'un demi-anneau de gros fil de laiton poli tournant autour d'un axe vertical. A chacune des positions du demi-anneau, la surface polie du métal présente en un point particulier une inclinaison favorable à la réflexion du soleil dans la chambre photographique. Or, comme ce point brillant se déplace, il se trouve tantôt sur la convexité, tantôt sur la concavité du fil métallique. C'est le déplacement de ce point lumineux qui trace sur deux parties diamétralalement opposées de la sphère des courbes fermées.

Afin de mieux faire comprendre la production de cette apparence singulière, recourrons aux figures stéréoscopiques avec discontinuité dans la formation des images.

La figure 24 montre que, pour chaque position, certains points de la surface du demi-anneau sont obscurs, c'est-à-dire qu'ils n'envoient pas de lumière dans la direction de l'appareil photographique; d'autres points, au contraire, sont très brillants parce que, dans cette même position, une partie de leur surface est orientée de manière à refléter l'image du soleil. Ces curieuses apparences ne peuvent pas être fournies par un corps réel.

On fait varier à volonté la forme et la position des taches

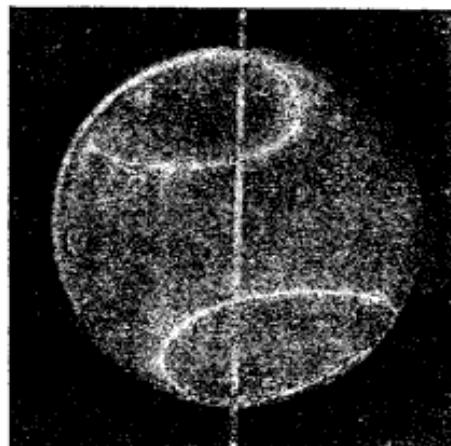


Fig. 23. — Aspect paradoxal d'une sphère engendrée par la rotation d'un fil de métal brillant.

brillantes sur la sphère en changeant l'incidence des rayons lumineux. L'étude mathématique de ces diverses apparences serait peut-être assez compliquée; elle ne présenterait, en

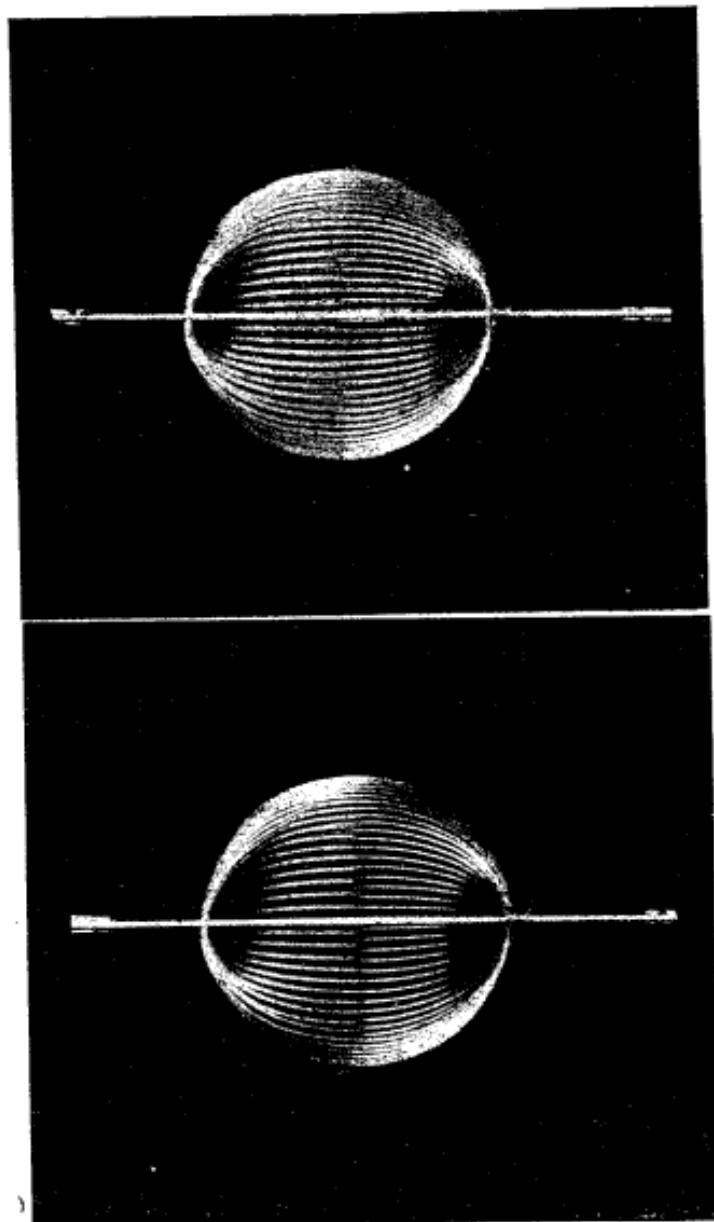


Fig. 21. — Sphère engendrée par la rotation d'un fil de métal brillant (images stéréoscopiques).

tout cas, qu'un intérêt de curiosité fort restreint. Il était cependant utile de les signaler, parce que, dans la suite de ces études, nous rencontrerons des formes analogues engendrées par le mouvement de certains corps.

CHAPITRE III

LE MOUVEMENT

Sa mesure, sa représentation graphique, et son analyse par la Chronophotographie.

SOMMAIRE. — La connaissance d'un mouvement implique la double notion de l'espace et du temps. — Représentation graphique d'un mouvement : graphique de la marche des trains sur les voies ferrées. — La courbe d'un mouvement prolongé doit être tracée par fragments successifs. — Inscription du mouvement par le mobile lui-même. — Amplification et réduction proportionnelles du mouvement qu'on veut inscrire. — De l'Odographe. — Inscription photographique des mouvements : Photographie des mouvements de l'Électromètre de Lippmann. — Détermination par la Chronophotographie du mouvement de la chute des corps. — Construction des courbes du mouvement d'après les images chronophotographiques : Courbe des espaces parcourus en fonction du temps ; courbe des vitesses ; courbe des accélérations.

La connaissance d'un mouvement implique la double notion de l'espace et du temps. — On a vu dans le chapitre II que la Photographie peut retracer la trajectoire d'un corps qui se meut dans l'espace ; mais cette notion de changements de lieu successifs ne suffit pas pour définir le mouvement. Celui-ci, en effet, suppose connu, à chaque instant, le rapport de l'espace parcouru au temps employé à le parcourir.

Or l'objet du chapitre I a été de montrer que la Photographie permet de mesurer avec précision des intervalles de temps. Il s'ensuit que si l'on combine dans les images photographiques les deux notions de temps et d'espace, on arrive à constituer une méthode, la *Chronophotographie*, qui tra-

duit toutes les phases du mouvement qu'on veut étudier et donne, à certains problèmes fort compliqués de la Mécanique, une solution expérimentale très simple.

Toute la Mécanique est basée sur la connaissance du mouvement dont une masse est animée, car d'après ce mouvement on peut mesurer la force qui l'a produit.

Pour déterminer avec exactitude les caractères d'un mouvement, uniforme ou varié, pour en mesurer la vitesse et l'accélération, il faut d'ordinaire des expériences extrêmement délicates.

Une fois le mouvement connu, il s'agit d'en exprimer la nature d'une façon précise. Depuis Descartes, les géomètres savent représenter par des courbes aux inflexions variées les caractères des mouvements. Mais ces courbes, en tant qu'expression d'un phénomène, exigent, comme toutes les figures géométriques, une construction plus ou moins laborieuse.

Ce fut un grand progrès lorsque Poncelet et Morin montrèrent qu'on peut contraindre les mobiles eux-mêmes à tracer la courbe de leurs mouvements. Cette première application de la Méthode graphique au mouvement de la chute des corps, fut bientôt étendue à des sujets divers ; la Météorologie, la Physique, la Physiologie, en tirèrent grand profit. Malgré l'énorme extension que cette méthode a prise, elle a cependant des limites que l'emploi de la Chronophotographie permettra de reculer.

Ainsi, quand le point qui se déplace nous est inaccessible, ou quand on ne peut le relier mécaniquement à des appareils inscripteurs, on arrive encore à en déterminer le mouvement par cette nouvelle méthode, qui n'exige aucun lien matériel entre ce point visible et la plaque sensible sur laquelle s'inscriront ses positions à chaque instant.

Pour bien faire comprendre les avantages de la Chronophotographie, le meilleur moyen sera sans doute de la comparer, dans la solution d'un même problème, aux autres méthodes déjà usitées. Prenons le cas le plus simple, l'inscrip-

tion du mouvement d'un mobile qui se déplace suivant une ligne et traitons ce problème par les deux méthodes.

Représentation graphique d'un mouvement. — Quand un point se meut sur une ligne, on en rapporte les positions successives à deux droites perpendiculaires entre elles : ces deux droites, l'une horizontale, l'autre verticale, servent, la première à compter les temps, la seconde à mesurer les chemins.

Si le mobile est animé d'un mouvement uniforme de 1 hectomètre à la minute, on exprimera ce mouvement (fig. 25) par la ligne oblique qui joint les intersections des divisions du temps avec celles de l'espace : c'est la *courbe du mouvement*. Dans le cas du mouvement uniforme, cette ligne est toujours une droite ; seulement, cette droite, sera plus ou moins inclinée suivant la vitesse du mobile. Ainsi, pour une vitesse double, soit 2 hectomètres à la minute, la ligne passerait par l'intersection de la deuxième division du chemin avec la première division du temps. Elle formerait ainsi la diagonale d'une série de rectangles dont les côtés auraient, dans le sens du chemin, deux divisions de longueur et une seule division dans le sens du temps.

Ce système de représentation exprime tous les degrés de vitesse et tous les genres de mouvement. Une ligne horizontale indique un arrêt, et la longueur de cette ligne, autrement dit le nombre de divisions qu'elle occupe, mesure la durée de cet arrêt. Le mouvement varié se traduit par une courbe dont l'inclinaison, c'est-à-dire la *tangente*, exprime à tout instant la *vitesse*. Enfin, chaque point de la courbe indique, d'après les divisions horizontale et verticale sur lesquelles il est placé, le chemin parcouru et le temps écoulé depuis l'origine du mouvement.

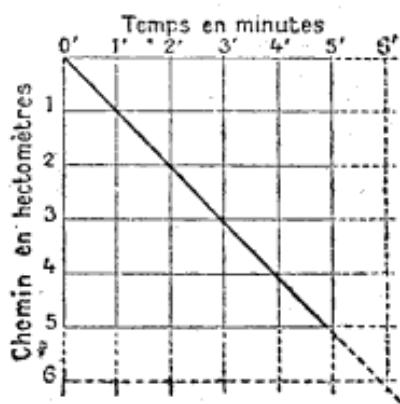


Fig. 25. — Représentation graphique d'un mouvement uniforme.

Graphique de la marche des trains sur les voies ferrées. — L'expression géométrique du mouvement est devenue usuelle depuis que l'ingénieur Ibry l'a appliquée à représenter la marche des trains sur les voies ferrées. Tout le monde connaît aujourd'hui ces graphiques où l'on voit des lignes différemment inclinées s'entre-croiser en sens divers.

Les changements d'inclinaison et de direction des courbes expriment les vitesses et les directions de tous les trains qui parcourent la voie. La figure 26 est un exemple de ces tableaux graphiques mis par l'administration au service de ses employés.

Sur cette figure on a inscrit à gauche, sur l'axe des ordonnées, la série des stations, c'est-à-dire les divisions de l'espace à parcourir; l'écartement des stations entre elles est, sur le papier, proportionnel à la distance en kilomètres qui les sépare.

Dans le sens horizontal, c'est-à-dire sur l'axe des abscisses, se comptent les divisions du temps en heures, partagées elles-mêmes en subdivisions de 10 minutes chacune.

Pour exprimer qu'un train doit être sur un certain point de la ligne à une certaine heure, on marque sur le tableau sa position, en face de la station qu'il occupe et verticalement au-dessus de la division du temps qui correspond à l'heure indiquée. A mesure que le train progresse, sa position se déplace par rapport à l'axe des chemins et aussi par rapport à l'axe des temps. Mais si le train s'arrête, sa place, sur le graphique, ne change plus que par rapport à l'axe des temps. De sorte que les arrêts seront exprimés par des lignes horizontales plus ou moins longues.

La pente de la courbe exprime la vitesse du train; cette courbe est d'autant plus voisine de la verticale, que la marche du train est plus rapide; on reconnaît ainsi, au premier coup d'œil, les trains express, rapides, directs et omnibus.

La direction de la courbe indique le sens de la

marche du train : les lignes qui descendent vers la droite expriment les trains s'éloignant de Paris ; celles qui montent vers la droite correspondent aux trains se dirigeant sur Paris. Enfin les croisements des lignes sur le tableau indiquent

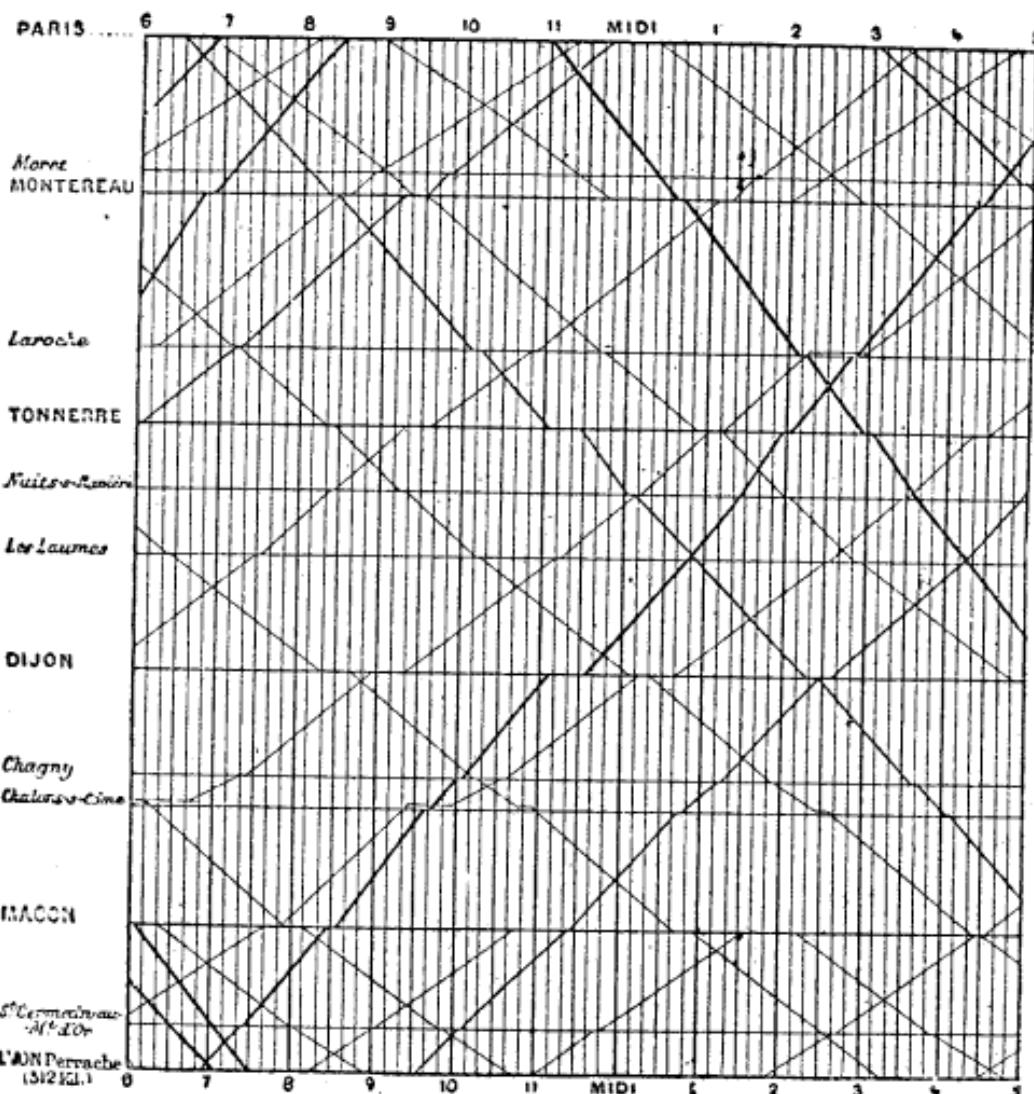


Fig. 26. — Graphique exprimant le mouvement des trains sur une ligne de chemin de fer (Méthode de l'ingénieur Ibry).

les lieux et les heures où deux trains se croisent sur la voie.

Cette admirable représentation est la seule qu'on devrait employer pour exprimer graphiquement le mouvement d'un point sur sa trajectoire. Dans ces tableaux, la marche des trains est censée uniforme et représentée par des droites au

lieu de courbes flexueuses qui exprimeraient à chaque instant les changements qu'éprouve la vitesse. Par là seulement, cette expression graphique du mouvement s'éloigne de la réalité; mais cela n'a sans doute pas d'inconvénient sérieux dans la pratique.

La courbe d'un mouvement très prolongé doit être tracée par fragments successifs. — Les graphiques en usage pour exprimer le mouvement sur les chemins de fer sont extrêmement chargés d'indications, parce qu'ils représentent la marche de tous les trains qui se meuvent en sens divers sur un tronçon plus ou moins étendu de la ligne. La surface du papier y est complètement utilisée. Mais il n'en serait pas de même si l'on ne voulait exprimer que la marche d'un seul train sur un long parcours et pendant un temps très long. En se reportant à la figure 25 on voit que la diagonale du carré exprime un parcours de 6 hectomètres en 6 minutes. Or, pour un parcours double et un temps double, la diagonale serait deux fois plus longue et le carré dans lequel elle serait inscrite devrait être quatre fois plus grand. Par suite de cette progression géométrique, il faudrait une feuille d'un mètre Carré pour exprimer la marche du mobile pendant 20 kilomètres. Et cette énorme surface ne porterait d'autre inscription qu'une ligne grêle qui la couperait en diagonale. Cet inconvénient serait, à lui seul, la condamnation de la méthode au point de vue pratique; on l'évite en fractionnant le tracé, et en remplaçant la courbe continue par une série de tronçons de courbes dont chacun exprime le mouvement pendant un temps donné.

C'est ainsi que la figure 27 montre, concentrée sur une bande étroite, l'expression des phases d'un mouvement qui, autrement, eût exigé une surface six fois plus grande. Sur cette bande, l'échelle des chemins est continue, mais celle des temps est discontinue. Après chaque période de 5 minutes, la courbe retourne à la première division du temps, mais reste sur la division du chemin où elle était arrivée. A partir de ce point recommence un nouveau tronçon de courbe. Ces

tronçons A, B, C, etc., expriment ainsi le marche du mobile sur un parcours de 25 hecromètres, et pendant une durée de 30 minutes, aussi clairement que pourrait le faire une courbe continue qui exigerait l'emploi d'une grande surface de papier (1).

Inscription du mouvement par le mobile lui-même. — Poncelet et Morin ont résolu ce problème en construisant la machine bien connue qui inscrit le mouvement de la chute des corps. Dans cette machine, le corps qui tombe est muni d'un style qui trace sur du papier et qui progresse suivant la verticale avec la vitesse même de la chute.

D'autre part, le papier, enroulé

(1) On y lit, en effet (tronçon A) que, pendant les 5 premières minutes, le mobile a parcouru 5 hecromètres, d'un mouvement uniforme. Cette allure (tronçon B) s'est soutenue pendant 2 minutes encore, puis un arrêt d'une minute s'est produit; après quoi, le mobile s'est remis en marche, d'un mouvement accéléré, jusqu'à la dixième minute.

Cette vitesse (tronçon C) de 2 hecromètres à la minute s'est maintenue jusqu'à la fin de la onzième minute, où elle a fait place à un mouvement plus lent, de 3 hecromètres en 4 minutes, qui a duré pendant le tronçon D et une partie de E jusqu'à la vingt-et-unième minute où un arrêt a eu lieu. Cet arrêt de 3 minutes, qui s'est prolongé pendant le tronçon F, a été suivi d'une autre période de mouvement uniforme dont la vitesse était d'un peu plus de 100 mètres par minute.

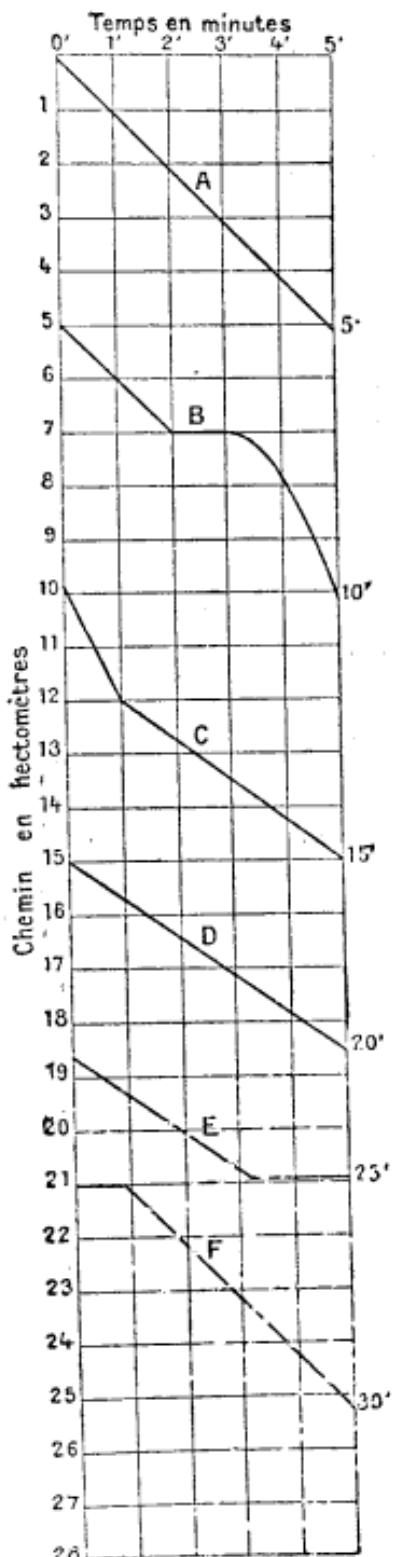


Fig. 27. — Fragments successifs de la courbe d'un mouvement.

sur un cylindre tournant, progresse, d'un mouvement uniforme, dans le sens horizontal. Le style tracera donc une courbe qui, sur la feuille déroulée, aura la forme d'une parabole, expression géométrique du mouvement uniformément accéléré.

Cette machine est le type des appareils inscripteurs dont on compte aujourd'hui un nombre considérable. Il faut remarquer toutefois que, par sa construction même, elle ne se prête à tracer la courbe des mouvements qu'en grandeur réelle ; on ne la pourrait donc appliquer à la représentation de mouvements trop petits ou trop grands pour être inscrits dans les dimensions d'une feuille de papier. Il s'ensuit que, pour ramener aux proportions convenables le mouvement dont on veut inscrire la courbe, il faut d'abord l'amplifier ou le réduire.

Amplification et réduction proportionnelles du mouvement qu'on veut inscrire. — Les mouvements très faibles qui se passent dans les organes vivants et que le physiologiste se propose de connaître, ont en général besoin d'être fortement amplifiés. On y arrive au moyen de leviers dont l'extrémité est munie de styles inscripteurs. C'est ainsi que le pouls des artères, soulevant et abaissant tour à tour le levier du Sphygmographe, trace les formes les plus variées (fig. 28), traduisant ainsi les différents états de la circulation du sang chez les malades (1).

Lorsqu'un mouvement est trop étendu pour être inscriptible en grandeur réelle, il faut le réduire avant de le transmettre au style traceur. Il y a pour cela différents moyens, dont voici les plus usuels :

On peut réduire le mouvement par un levier en le faisant agir sur le bras le plus long, tandis que le style est placé sur le bras le plus court. Le rapport de longueur des deux bras détermine le degré de réduction du mouvement.

On peut encore réduire proportionnellement un mouve-

(1) Voir *La Circulation du sang*. Paris, G. Masson, 1881.

ment à l'aide d'un fil de caoutchouc ; c'est un moyen expéditif et d'une précision suffisante dans un grand nombre de cas (1).

Soit $c b$ (fig. 29), un fil de caoutchouc bien homogène ; sous l'influence d'une traction, il s'allongera également dans toutes

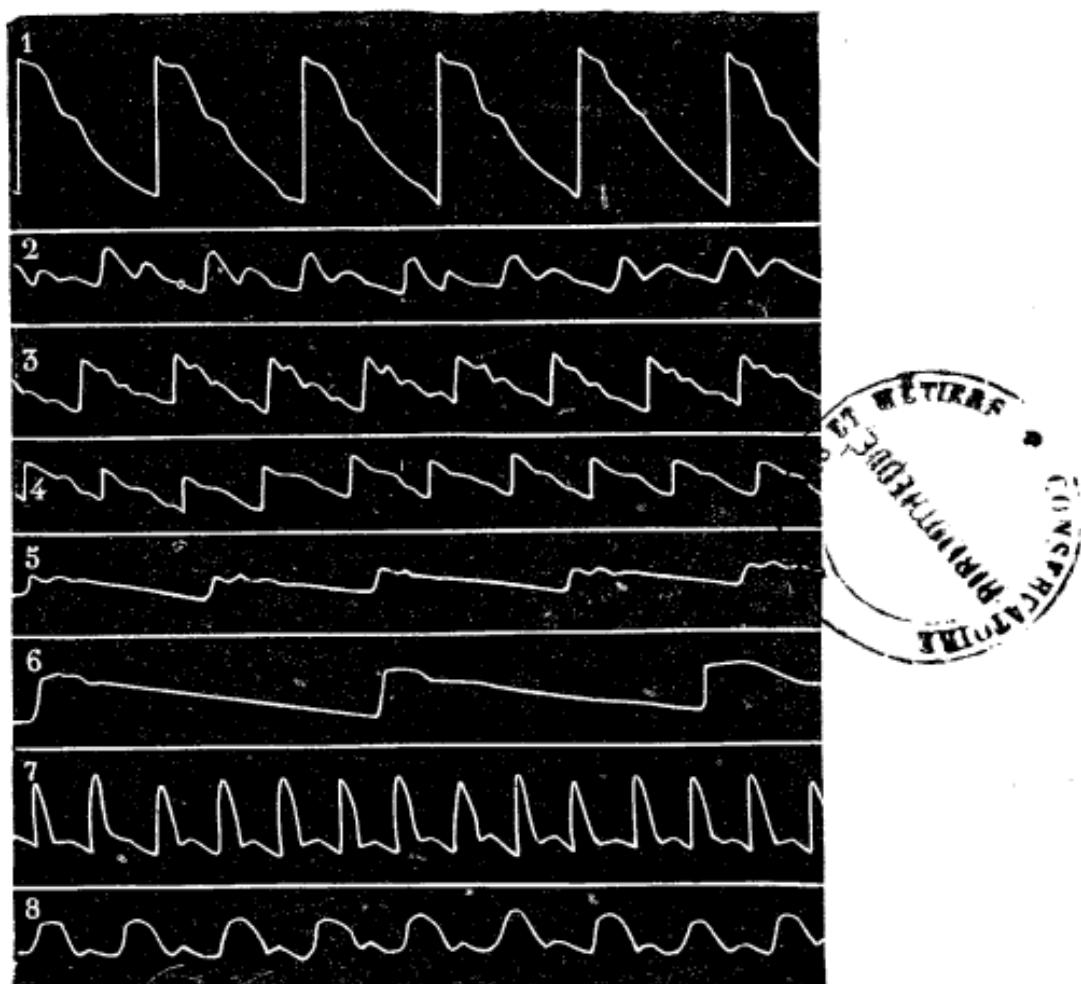


Fig. 28. — Formes graphiques amplifiées du pouls des artères dans différentes maladies.

ses parties. Fixons une des extrémités de ce fil en c , au moyen d'un clou, par exemple. Si nous exerçons une traction sur l'autre extrémité b , de façon à la porter en b' , le point a voisin de c ne parcourra que la courte dis-

(1) Ce procédé de réduction d'un mouvement au moyen d'un fil élastique a été imaginé et employé par l'amiral Paris et son fils dans leur appareil décrit sous le nom de *trace-vagues* (*Revue maritime et coloniale*, juin 1867).

tance $a'a$. Si nous avons fixé le style inscripteur au point a , ce style tracera sur un cylindre tournant une courbe dont

e l'amplitude aa' sera à celle du mouvement réel comme la longueur de fil ca est à longueur cb .

a Mais quand le mouvement doit subir une réduction énorme, comme cela arrive si l'on veut tracer, sur une bande de papier de quelques centimètres, le parcours d'un mobile sur une longueur de plusieurs kilomètres, il faut réduire ce mouvement au moyen de rouages. Des engrenages successifs de petits pignons et de grandes roues permettent, comme on sait, de réduire indéfiniment l'amplitude d'un mouvement. C'est à ce moyen que nous avons recouru pour obtenir la courbe du mouvement représentée figure 27. L'instrument qui a servi pour ces expériences est applicable au contrôle de la marche de toutes sortes de machines, nous le désignons sous le nom d'*Odographe* (1).

b **De l'Odographe.** — Soit, figure 30, un marcheur qui pousse devant lui une sorte de brouette très légère. La roue, dont le développement sur le sol représente le chemin parcouru, commandera, par une série de rouages réducteurs, la progression d'une bande de papier. D'autre part, un style traceur conduit par une horloge traversera la largeur du papier, d'une marche régulière et proportionnelle au temps. De la combinaison de ces deux mouvements résultera la courbe des espaces parcourus en fonction du temps. Les figures 31 et 32 montrent les détails de l'appareil.

b' La bande de papier, dont la longueur est d'un mètre envi-

(1) Voir le journal *La Nature*, 20 mars 1890.

ron, passe entre les cylindres d'un lamoir qui l'entraîne d'un mouvement proportionnel au chemin parcouru. Chaque tour de la roue, qui représente 3 mètres de chemin, actionnera, au moyen d'une bielle qui longe l'un des bras de



Fig. 30. — Marcheur poussant devant lui l'Odographe.

la brouette, le rouage qui fait mouvoir le lamoir, et fera passer une dent de ce rouage. Pendant ce temps la bande de papier progressera d'une longueur très petite, 0^{mm},1 par exemple; elle aura passé tout entière par le lamoir au bout d'un parcours de 30 kilomètres.

Le style qui frotte sur le papier est en laiton, le papier

lui-même est couvert d'une couche de blanc de zinc (*papier couché* du commerce) sur laquelle le laiton laisse une trace très fine et très nette, sans s'user comme un crayon ni exiger d'encre comme une plume.

Pour engendrer la courbe du mouvement, ce style est

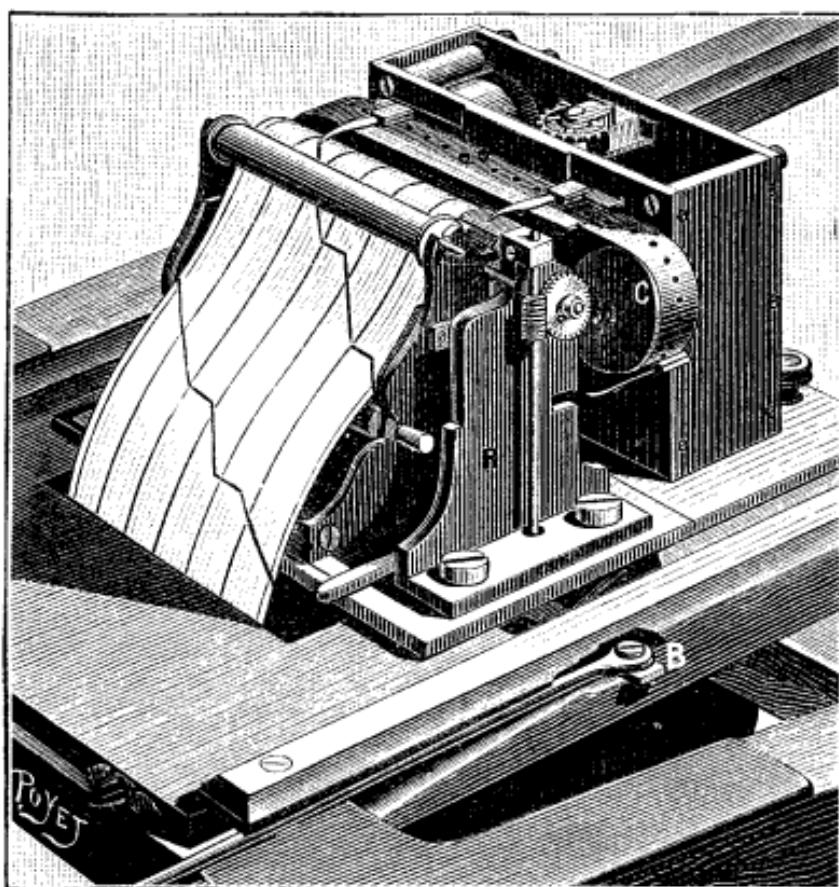


Fig. 31. — Détails de l'Odographe. On voit la bande qui a déjà reçu des tracés de marche et d'arrêt. Un style achève de parcourir cette bande; un autre est sur le point de tracer à son tour. Ces styles, au nombre de cinq, sont fixés à des distances de 6 centimètres l'un de l'autre, sur un ruban d'acier qu'un mouvement d'horlogerie conduit sur deux galets C. En B est l'extrémité de la bielle qui imprime le mouvement au laminoir.

animé d'une translation uniforme, et traverse la largeur de la bande de papier en *une heure*, sous l'action du rouage d'horlogerie. En outre, à mesure qu'elle est entraînée par le laminoir, la bande passe sous un peigne dont les dents tracent, dans le sens de sa longueur, des lignes équidistantes

entre elles et dont l'écartement correspond à une durée de 10 minutes. Cela facilite beaucoup la lecture de la courbe des espaces parcourus en fonction du temps.

Ainsi, à chaque heure, le style trace un tronçon de courbe

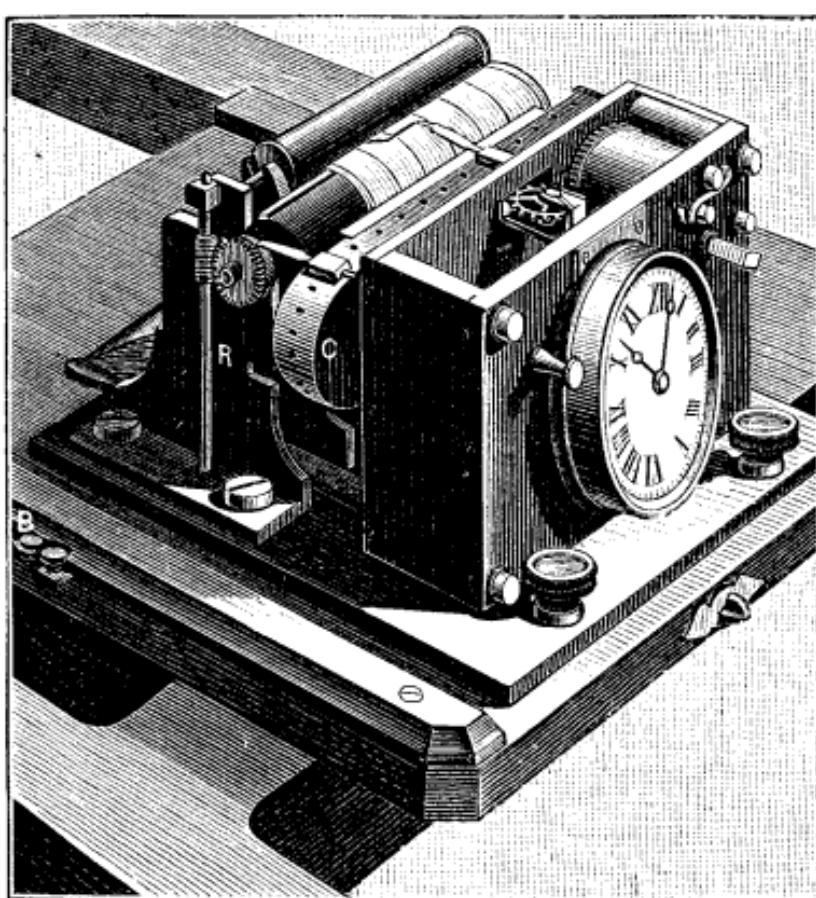


Fig. 32. — L'instrument est vu obliquement et par l'arrière. Le cadran de l'horloge est visible. La bande de papier est engagée dans le laminoir où elle reçoit le tracé d'un style ; elle porte déjà les subdivisions horaires tracées par les dents du peigne. En B, l'extrémité de la bielle agit par un cliquet sur une roue à rochet commandant par une vis sans fin R le mouvement du laminoir.

analogique à ceux qui, dans la figure 27, sont désignés successivement par les lettres A, B, C,... F, puisque le style met précisément une heure à traverser la bande de papier.

Une fois cette première courbe tracée, une autre recommence, car un second style vient tracer à son tour, puis un troisième quand une troisième heure commence,

et cela se répète ainsi tant que dure le mouvement (1).

Dans les arrêts, comme la bande cesse de progresser et que l'horloge continue de mouvoir le style, celui-ci trace une ligne droite perpendiculaire à l'axe longitudinal de la bande. Cette manière d'inscrire le mouvement est donc identique à celle qui a été imaginée par Ibry. Il nous a semblé que l'Odographe pouvait, avec quelques modifications spéciales, s'appliquer au contrôle de la marche d'un train de chemin de fer.

Une disposition nouvelle permit de transmettre, par des tubes à air, chaque tour de roue de la locomotive au rouage du laminoir, tandis que l'odographe, placé à l'intérieur d'un wagon, traçait continuellement les phases de la marche du train.

Grâce à l'obligeance de M. Millet, ingénieur en chef de la Traction au Chemin de fer du Midi, nous avons pu faire essayer l'Odographe sur des trains express entre Dax, et Bordeaux et vice-versa.

La figure 33 montre dans la colonne A un fragment du graphique original correspondant au parcours entre Dax et Morcenx. Pour mesurer à chaque instant la vitesse de marche, on présente sur la partie correspondante du tracé une petite échelle divisée, et l'on mesure la longueur du tronçon de la courbe correspondant à l'espace parcouru en 10 minutes ; on lit, dans le cas présent, que la vitesse était de 55 kilomètres à l'heure.

Ces graphiques sont donc de tous points semblables à ceux qu'on emploie dans les Compagnies de chemins de fer : de part et d'autre le mode d'expression du mouvement et des arrêts est le même ; toute la différence consiste en ce que les tracés d'Ibry étaient théoriques, c'est-à-dire supposaient uniforme la vitesse du train et la représentaient par des droites, tandis que nos tracés traduisent expérimentalement

(1) Ces styles sont conduits par un ruban d'acier sans fin que commande l'horloge.

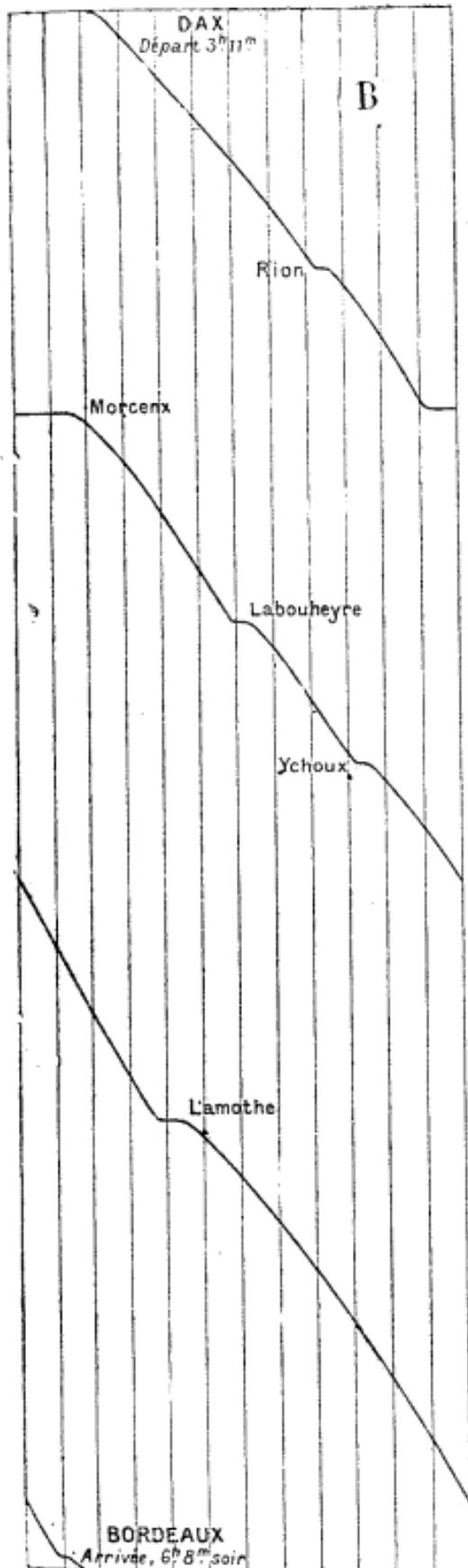


Fig. 7

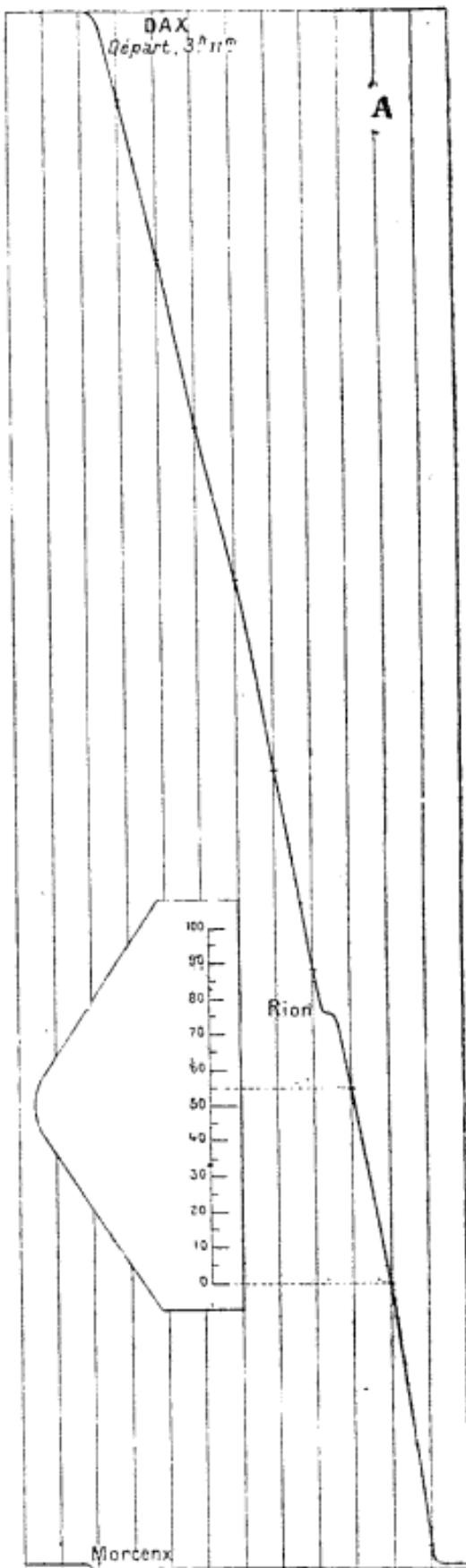


Fig. 6

Fig. 33. — Deux graphiques de l'Odographe exprimant, à des échelles différentes, la marche d'un train express.

la vitesse réelle, et en expriment les changements par des inflexions plus ou moins marquées.

On peut s'apercevoir que, de Dax à Rion, et de Rion à Morcenx, la ligne n'est pas droite, mais légèrement courbe, ce qui exprime un mouvement légèrement varié. Mais c'est surtout avant et après les arrêts que ces inflexions sont marquées. Au moment de l'arrêt, la courbe présente un brusque changement de direction, cela montre que, sous l'action des freins, le train passe de la vitesse à l'immobilité en un temps très court. Au moment du départ, au contraire, la courbe décrit une parabole, ce qui exprime l'accélération graduelle et relativement lente de la marche du train.

Pour faire tenir dans la longueur d'une page les phases du mouvement effectué sur un plus long parcours, il faudrait ralentir la marche du papier. On a obtenu ainsi la colonne B, qui retrace le parcours de Dax à Bordeaux, c'est-à-dire sur une longueur de 60 kilomètres. On doit donc régler dans l'Odographe la marche du papier suivant la vitesse moyenne du véhicule dont on veut contrôler le mouvement, que ce soit une locomotive, une voiture, un bateau, etc. (1).

Si vaste que soit le domaine de l'inscription mécanique des mouvements, il y a cependant, comme cela a été indiquer plus haut, des cas où cette méthode cesse d'être applicable. On va voir, dans un cas de ce genre, combien est précieux l'emploi de la Photographie.

Photographie des mouvements de l'Électromètre de Lippmann. — En 1877, notre confrère et ami Lippmann venait d'inventer son Électromètre capillaire, dont la sensibilité merveilleuse devait permettre de saisir toutes les variations électriques qui se produisent dans l'organisme vivant. Mais il fallait pour cela faire de l'Électromètre un instrument inscripteur; nous y sommes arrivé au moyen de la Photographie.

Comme la colonne de l'Électromètre est très fine, c'est

(1) Voir pour les détails de l'emploi de l'Odographe, *La Nature*, n° 278, 28 septembre 1878.

dans le champ du microscope qu'on en doit suivre les mouvements. Cette colonne se présente alors sous des aspects différents suivant les conditions de l'éclairage. Sur un champ clair, elle apparaît comme une ligne obscure ; sur un champ obscur, éclairée latéralement, elle brille d'un éclat très vif. On voit cette colonne s'allonger ou se raccourcir suivant la

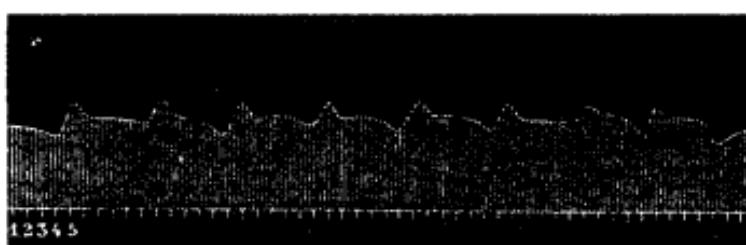


Fig. 34. — Photographie des variations électriques du cœur d'une Tortue.

direction et l'intensité du courant qui agit sur elle ; en recevant l'image sur une plaque photographique, on obtiendra une ligne noire très intense. Enfin, si la plaque sensible se déplace, d'un mouvement uniforme, perpendiculairement à l'axe de la colonne, tous les changements de longueur de celle-ci deviendront apparents sur l'image. En effet,

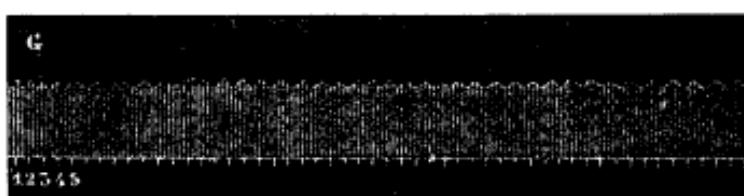


Fig. 34 (bis). — Photographie des variations électriques du cœur d'une Grenouille.

sous l'influence de la translation de la plaque, l'image de la colonne cessera d'être une ligne, mais s'étalera en une surface dont le bord présentera les sinuosités les plus variées, suivant les déplacements du niveau du mercure.

Pour éclairer la colonne de l'instrument, nous nous sommes servi d'une série d'étincelles d'une bobine d'induction munie d'un condensateur. Cet éclairage intermittent crée

des discontinuités dans les images qui forment une série de lignes brillantes d'inégales longueurs.

La figure 34 montre les variations électriques du cœur de la Tortue pendant ses mouvements de systole et de diastole. La figure 34 (*bis*) retrace les variations électriques d'un cœur de Grenouille.

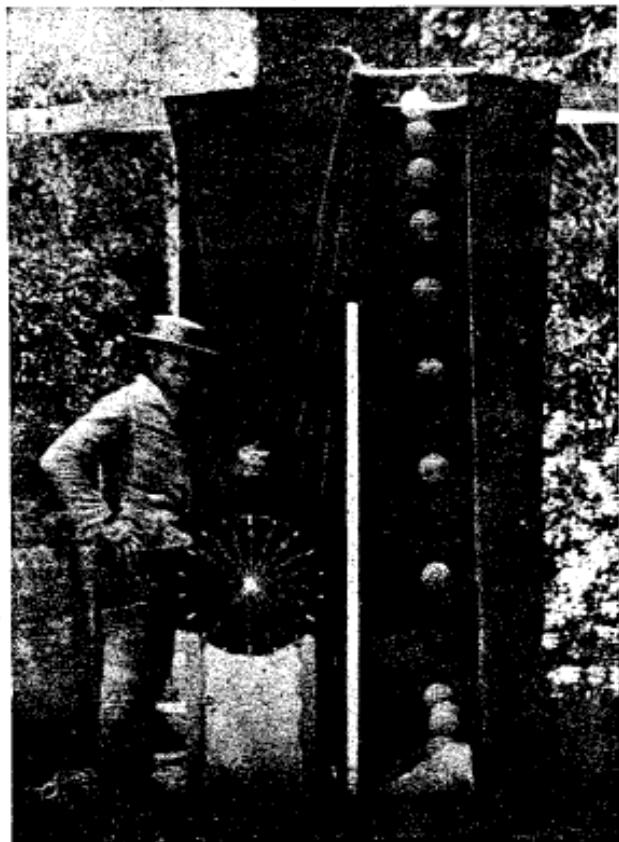
Les sinuosités suivies par le sommet de la colonne de l'Électromètre ressemblent beaucoup aux courbes que donnerait l'inscription mécanique des mouvements du cœur et en suivent toutes les phases. Le cœur, en effet, comme tous les autres muscles, change d'état électrique selon qu'il se resserre ou se relâche.

Démonstration par la Chronophotographie du mouvement de la chute des corps.

— Dans l'étude de ce mouvement, l'emploi de la Photographic a l'avantage de ne rien emprunter à la force motrice dont elle étudie les effets. Voici comment l'expérience a été faite (fig. 35) :

Un rideau de velours noir, verticalement tendu, forme un pli profond et très obscur devant lequel on fera tomber une sphère blanche éclairée par le soleil. Une règle divisée est verticalement placée près de ce champ noir pour mesurer les espaces parcourus ; un cadran chronométrique est destiné à

Fig. 35. — Photographie du mouvement d'un corps qui tombe.



mesurer l'intervalle de temps qui sépare les images successives.

Quand le disque obturateur a pris sa tesse, un aide, en tirant sur une ficelle, provoque la chute de la boule. La plaque photographique reçoit une série d'images de cette boule, exprimant les positions que celle-ci occupait à chacun des éclairements successifs. On a donc tous les éléments nécessaires pour déterminer la loi du mouvement.

Afin de rendre les mesures plus faciles, on agrandit, par projection, le petit cliché de la figure 35 et l'on obtient, à une échelle convenable, les positions diverses de la boule qui tombe. Menons horizonta-

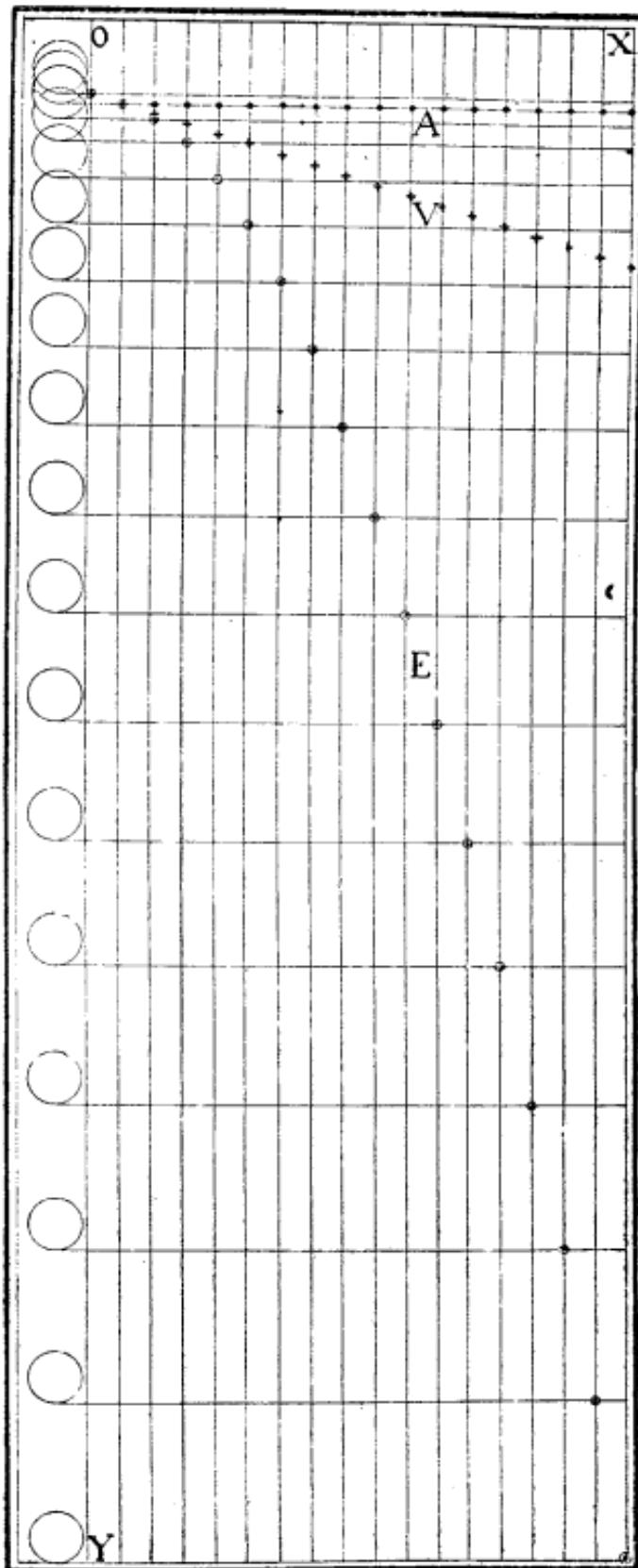


Fig. 36. — Courbes du mouvement d'un corps qui tombe.

lement des tangentes à l'un des bords de la boule, en chacune de ses positions ; on pourra lire (fig. 36) la série des chemins parcourus depuis l'origine du temps de chute, et l'on verra que les espaces parcourus croissent comme le carré des temps. Ainsi l'espace parcouru au second temps de la chute, c'est-à-dire après deux éclairements successifs, est quatre fois plus long que celui qui est parcouru dans le premier temps.

Si l'on veut construire la courbe des espaces parcourus en fonction du temps, on divisera la feuille par des lignes verticales équidistantes d'après lesquelles on comptera les intervalles de temps. A l'intersection de chacune de ces divisions avec les lignes horizontales correspondantes on trace un signe (un point dans un petit rond). La courbe E qui joindra tous ces signes entre eux sera une parabole, courbe *des espaces parcourus* en fonction du temps dans le mouvement uniformément accéléré.

La *courbe des vitesses* se construira en portant sur chacune des divisions du temps, et à partir de son origine, la longueur qui exprime l'espace parcouru par la boule dans l'intervalle de temps correspondant. De petites croix marquent les longueurs de ces séries d'ordonnées ; elles forment, dans leur ensemble, la ligne V, qui est la courbe des vitesses. Cette ligne est une droite obliquement inclinée, expression d'une vitesse uniformément croissante.

Enfin, la *courbe des accélérations* s'obtient en portant en ordonnée, sous chacune des divisions du temps, l'excès de la seconde vitesse sur la première, puis celui de la troisième sur la seconde, c'est-à-dire l'accroissement de vitesse, ou l'*accélération* dans la série des intervalles de temps successifs. Un gros point noir marque la longueur de chacune de ces ordonnées. L'ensemble de ces points, réunis par la ligne A, formant une droite horizontale, montre que l'accélération était uniforme (1).

Dans ces constructions on a pris pour unité de temps une

(1) Par suite d'une erreur de dessin, la valeur de l'accélération est deux fois trop faible dans la figure 36.

durée quelconque; cela suffisait pour mesurer les valeurs relatives de la vitesse et de l'accélération. Mais, pour en connaître la valeur absolue, il faut rapporter à l'unité de temps, *la seconde*, chacune de ces durées arbitraires. Le cadran chronométrique nous en donne le moyen, de même que l'échelle métrique permettrait d'évaluer sur la figure les espaces parcourus, en mètres et fractions de mètre.

Ainsi la Chronophotographie donne les éléments nécessaires pour construire les courbes d'un mouvement.

CHAPITRE IV

CHRONOPHOTOGRAPHIE SUR PLAQUE FIXE

SOMMAIRE. — Objet de la Chronophotographie; principes de la méthode; mesure des temps et des espaces. — Influence de la surface couverte par l'objet dont on prend l'image; influence de la vitesse de son mouvement. — Chronophotographie géométrique. — Chronophotographie stéréoscopique. — Moyens d'augmenter le nombre des images sans en produire la confusion: images alternantes. Dissociation des images sur la plaque photographique: dissociation par déplacement de l'appareil; dissociation par l'emploi d'un miroir tournant.

L'objet de la Chronophotographie étant de déterminer avec exactitude les caractères d'un mouvement, cette méthode doit, d'une part, représenter les différents lieux de l'espace parcourus par le mobile, c'est-à-dire sa trajectoire, et d'autre part, exprimer la position de ce mobile sur cette trajectoire à des instants déterminés.

Supposons qu'on ait braqué devant un champ obscur un appareil photographique ordinaire, et que, l'objectif étant ouvert, on lance devant ce champ une boule brillante éclairée par le soleil, de telle sorte que l'image de cette boule impressionne sur son passage différents points de la plaque sensible, on trouvera sur cette plaque une ligne continue, représentée (fig. 37) par la courbe supérieure, qui retracera exactement la *trajectoire* suivie par le corps brillant.

Si nous répétons l'expérience en admettant la lumière dans la chambre noire d'une façon intermittente et à des intervalles de temps égaux, nous obtiendrons une trajectoire discontinue (courbe inférieure de la même figure), dans

laquelle seront représentées les positions successives du mobile aux instants où se sont produites les admissions de la lumière : c'est la *trajectoire chronophotographique*.



Fig. 37. — Trajectoire simple et trajectoire chronophotographique d'une boule brillante qui se déplace devant un champ obscur.

Cette méthode suppose que l'intervalle de temps qui sépare deux images soit toujours le même et qu'on en connaisse exactement la durée. Pour obtenir les meilleures images possible, il faut que l'objet soit vivement éclairé et que le fond sur lequel il se détache soit parfaitement obscur. En outre, la durée des admissions de la lumière doit être très courte, afin que l'objet ne se déplace pas d'une manière sensible pendant chaque éclairement.

La figure 38 représente la forme que nous avions donnée primitivement à l'appareil chronophotographique (1). On faisait tourner au moyen d'une manivelle, un disque fenêtré D, dont la rotation était parfaitement uniformisée au moyen d'un régulateur. La plaque sensible s'introduisait avec son châssis C au foyer de l'objectif O. A chaque passage d'une fenêtre *f*, cette plaque recevait une image représentant l'objet éclairé, avec sa forme et sa position actuelles. Or, comme l'objet se déplaçait entre deux éclairements successifs, on obtenait une série d'images, analogues à celles de la boule (fig. 37), indiquant les attitudes et les positions successives de l'objet en mouvement. L'intervalle entre les images était parfaitement réglé à 1/10 de seconde; la du-

(1) Voir, pour la description des premières expériences, *C. R. de l'Acad. des Sciences*, 7 août 1882.

rée des éclairements était de $1/500$ de seconde. Enfin, une règle métrique avec des divisions bien apparentes était placée devant le champ obscur, dans le même plan que l'objet à photographier. L'image de cette règle, reproduite sur la plaque sensible, servait d'échelle pour mesurer la grandeur

réelle de l'objet et les espaces qu'il avait parcourus dans chaque dixième de seconde.

Au lieu de s'en rapporter, pour la mesure du temps, à la parfaite régularité du mouvement des disques obturateurs, il vaut mieux, dans les expériences qui

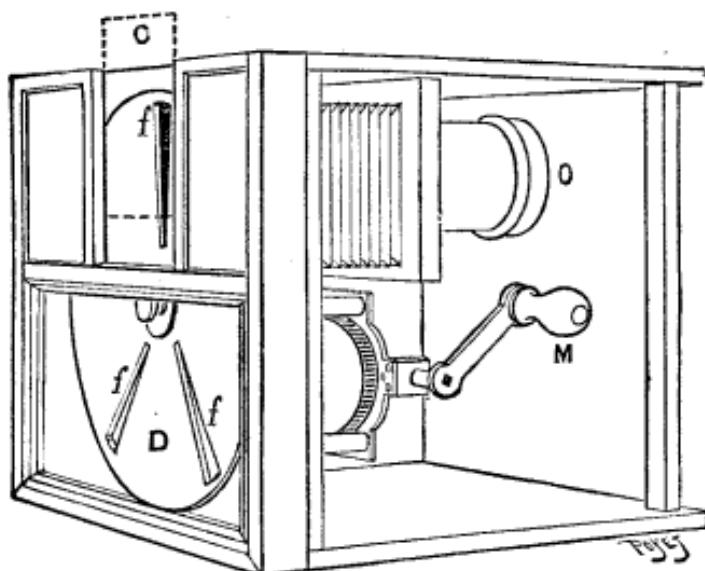


Fig. 38. — Disposition de l'appareil pour la Chronophotographie sur plaque fixe.

exigent beaucoup de précision, recourir à l'emploi du disque chronométrique (Chapitre 1, fig. 41). Ainsi, dans l'expérience représentée figure 33, et qui est relative à la chute des corps, on mesure les intervalles de temps qui séparent deux éclairements d'après l'espace angulaire dont l'aiguille s'est déplacée entre deux images successives.

Ce procédé, analogue à l'emploi du diapason pour contrôler la vitesse du papier dans l'inscription mécanique des mouvements (Voir *Chronostylographie*) permet de donner à la rotation des disques obturateurs une vitesse quelconque ; cette vitesse sera toujours connue d'après la position des images de l'aiguille sur le cadran.

Pour la mesure des espaces, l'image d'un mètre divisé sert, avons-nous dit, d'échelle pour mesurer les longueurs sur la plaque photographique. Mais comme dans toutes les

mesures qu'on doit prendre sur une image à dimensions réduites il faut faire une série de calculs pour avoir la longueur réelle des objets représentés, il est désirable de trouver le moyen de supprimer ces opérations un peu longues. On y arrive en agrandissant l'image, au moyen de la lanterne à projection, jusqu'à ce qu'elle ait ses dimensions réelles, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'échelle métrique présente exactement un mètre de longueur sur l'écran. Dès lors toutes les dimensions de l'image peuvent être directement mesurées.

Les épures que donne la Chronophotographie contiennent donc les deux notions nécessaires pour connaître un mouvement : celle d'espace et celle de temps. Toutefois ces deux notions qu'il fallait concilier sont, dans une certaine mesure, incompatibles entre elles, de telle sorte que, pour les obtenir toutes deux, on est souvent obligé de recourir à certains artifices, ainsi qu'on va le voir.

Influence de la surface couverte par l'objet en mouvement.



Fig. 39. — Un Homme qui marche : Chronophotographie sur plaque fixe.

ment. — Pour une même vitesse de translation, si l'objet étudié couvre peu de surface dans le sens du mouvement, on en peut reueillir un grand nombre d'images sans qu'elles se confondent en se superposant : c'est le cas du projectile que nous considérons tout à l'heure. La notion de temps est

donc très complète quand celle d'espace est très restreinte.

Mais si nous prenons les images d'un Homme qui marche (fig. 39), la notion d'espace est plus complexe : chaque image couvre une surface étendue et renseigne sur les positions que prennent le corps, les bras et les jambes. Or, par cela même que chaque image occupe plus d'espace, le nombre



Fig. 40. — Cheval arabe au galop. La grande surface couverte par chacune des images fait qu'elles se superposent entre elles presque complètement.

qu'on en peut prendre est moins grand, sinon elles se surposent, ce qui produit une véritable confusion.

Avec un gros animal, un Cheval par exemple, le nombre des images devra être très restreint, car la longueur de chacune d'elles, mesurée dans le sens du mouvement, est très grande, de sorte que la superposition se produirait, comme sur la figure 40.

Influence de la vitesse de l'objet en mouvement. — Pour des vitesses de translation différentes, le nombre des images qu'on peut prendre en un temps donné sans que la confusion se produise est d'autant plus grand que la translation est plus rapide. On peut s'en convaincre en comparant les images successives obtenues dans la course (fig. 41) et dans la marche (fig. 39) : les images du coureur sont bien plus éloignées les unes des autres, quoique la fréquence des éclairages ait été la même dans les deux cas. Si la course s'arrêtait, les images se superposeraient entre elles.

Parfois, cette superposition des images peut être utilisée ; elle donne une intensité plus grande à celles qui représentent les moments de moindre vitesse de l'objet en mouve-

ment. Une des plus anciennes applications de la Photographie à l'étude du mouvement fut faite en 1865 par MM. Onimus

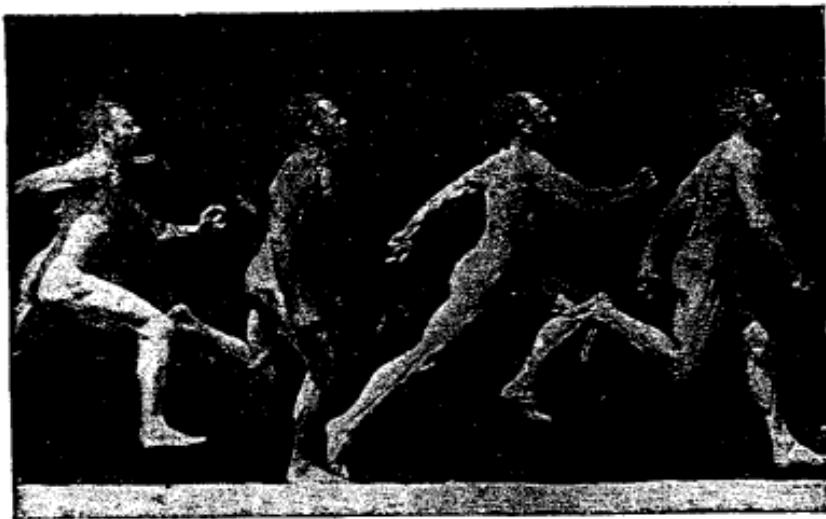


Fig. 41. — Homme qui court. Chronophotographie sur plaque fixe.

et Martin. Ces expérimentateurs, après avoir mis à nu le cœur d'un animal vivant, dirigèrent sur cet organe l'objectif

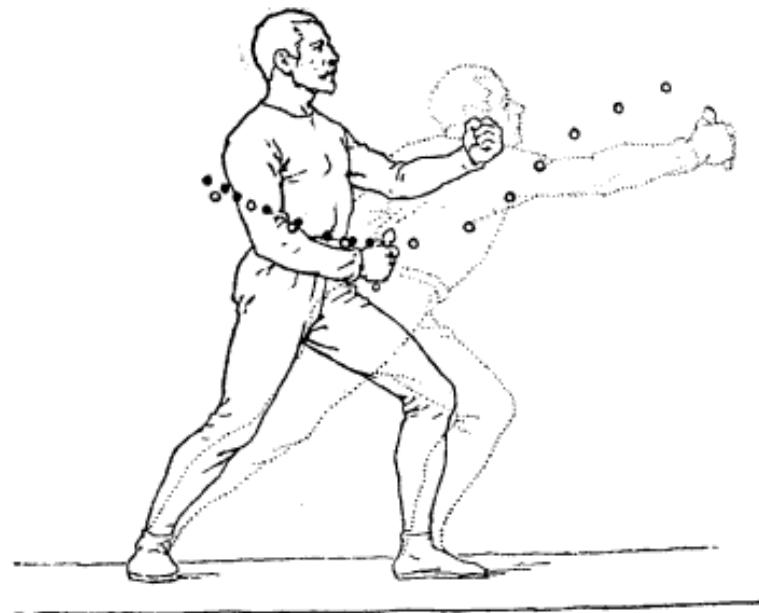


Fig. 42. — Boxeur représenté dans les deux attitudes extrêmes de son action.

d'un appareil photographique ouvert en permanence. Les images obtenues avaient un double contour représentant les deux formes extrêmes du cœur, l'une dans sa plus grande

réplétion, l'autre dans sa plus grande vacuité. En effet, à ces moments extrêmes, le cœur est un instant immobile et son contour s'accuse sur la plaque sensible, tandis qu'il ne laisse pas de traces nettes pendant les phases du mouvement.



Fig. 43. -- Homme vêtu de noir et portant des lignes et des points blancs pour l'étude chronophotographique du mouvement des points remarquables du corps.

Les phases intermédiaires, dans lesquelles le déplacement a été très rapide, n'avaient pas laissé d'images appréciables.

Chronophotographie géométrique. — La confusion des images par superposition impose une limite aux applications de la Chronophotographie sur plaque fixe. Dans bien

M. Demeny a recouru à cette méthode tombée dans un injuste oubli et dont il ne connaissait pas lui-même ces premières applications. Dans une étude sur les exercices physiques, il prit devant un fond obscur l'image d'un boxeur en action. Deux attitudes extrêmes s'affirmaient particulièrement ; et c'est d'après elles qu'on a dessiné la figure 42 qui montre le boxeur dans la préparation du mouvement et après le mouvement accompli.

des cas cependant, au moyen de certains artifices, on échappe à cet inconvénient.

Le moyen le plus naturel consiste à réduire artificiellement la surface du corps étudié. On rend invisibles, en les noircissant, les parties qu'il n'est pas indispensable de représenter dans l'image, et l'on rend lumineuses au contraire celles dont on veut connaître le mouvement. C'est ainsi qu'un Homme vêtu de velours noir (fig. 43), et portant sur les membres des galons et des points brillants, ne donne, dans l'image, que des lignes géométriques sur lesquelles pourtant se reconnaissent aisément les attitudes des différents segments des membres.

Dans l'épure que l'on obtient ainsi (fig. 44), le nombre des

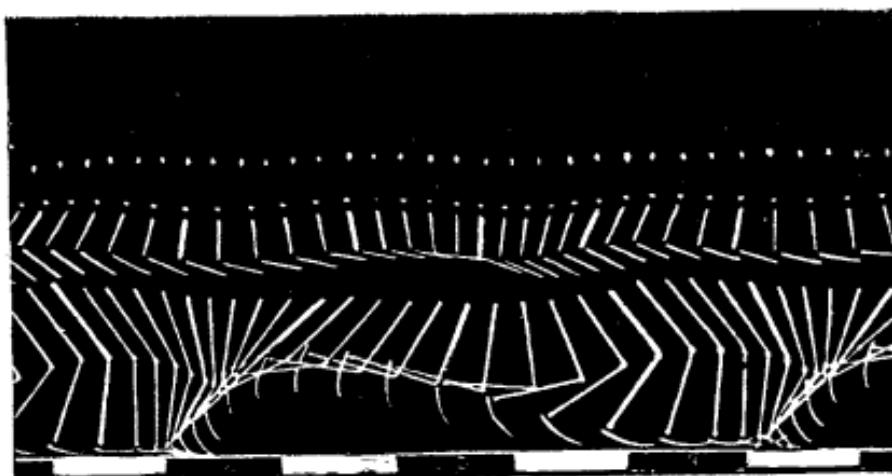


Fig. 44. — Images d'un coureur réduite à des lignes brillantes qui représentent l'attitude de ses membres (Chronophotographie géométrique).

images peut être considérable et la notion de temps très complète, tandis que celle d'espace a été volontairement restreinte au strict nécessaire.

Chronophotographie stéréoscopique. — On a vu au chapitre II comment on obtient les images stéréoscopiques des figures engendrées dans l'espace par le mouvement de lignes droites ou courbes. Ces images étaient discontinues, c'est-à-dire formées au moyen d'ouvertures intermittentes de l'objectif; cela avait pour but de mieux faire comprendre

la génération de ces figures en relief, en montrant les positions successives de la ligne qui les engendre. Or, si les intervalles entre les éclaircements sont rigoureusement égaux, on a la Chronophotographie stéréoscopique et par conséquent l'expression complète du mouvement. Cette méthode est applicable à un grand nombre de cas où il faut savoir si le mobile se déplace dans un plan ou suivant les trois dimensions de l'espace.

Moyens d'augmenter le nombre des images sans produire de confusion.— La limite aux applications de la Chronophotographie est donnée, avons-nous dit, par la superposition des images et par la confusion qui en résulte; or cette superposition se produit d'autant plus vite que l'objet couvre une plus grande surface, ou que son mouvement est plus lent. Dans ces deux cas, si l'on veut avoir des indications nombreuses des positions de l'objet dans l'espace, il faut recourir à certains procédés; l'un d'eux consiste à prendre des *images alternantes*, l'autre à *dissocier* les images en les faisant tomber sur des points différents de la plaque sensible.

Images alternantes. — On se sert pour les obtenir d'un appareil stéréoscopique à deux objectifs traversés tous deux par un même disque obturateur. Ce disque ne doit avoir qu'une seule fenêtre qui, dans son mouvement rotatif, produit alternativement les admissions de la lumière par l'objectif de droite et par celui de gauche.

On obtiendra ainsi deux séries d'images que l'on superposera sur deux lignes parallèles. La série supérieure correspondra par exemple à celle des nombres impairs, l'inférieure à celle des nombres pairs, comme cela est représenté ci-dessous :

4	3	5	7	9
2	4	6	8	10

C'est de cette manière qu'ont été prises les images de la figure 45, qui montre les phases du coup d'aile d'un Goéland au vol. On ne pouvait obtenir sans confusion, sur une seule

série, que cinq images dans un coup d'aile; or, grâce aux deux séries qui se complètent l'une par l'autre, on a doublé le nombre des images et l'on peut suivre la succession des mouvements qu'elles représentent, en passant alternativement d'une image impaire à l'image paire suivante et inversement, comme cela est indiqué par de petites flèches sur la figure.

Il est presque inutile d'ajouter que ces images n'ont plus rien de stéréoscopique, car elles sont recueillies suc-

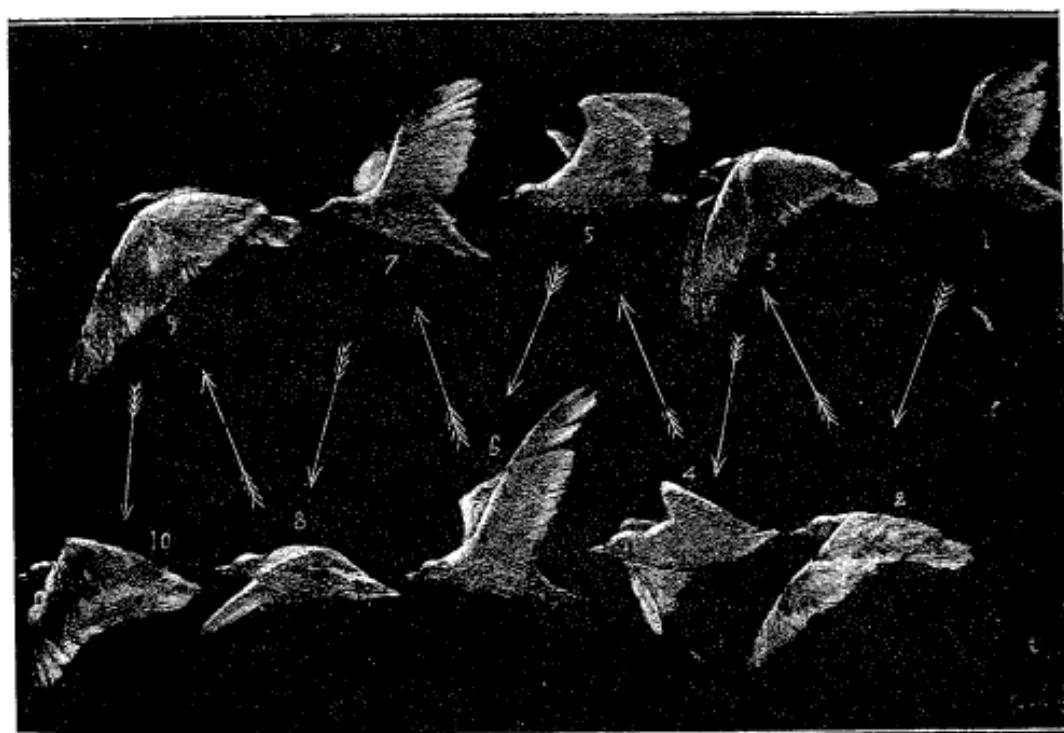


Fig. 43. — Images alternantes pour multiplier le nombre des indications données par la Chronophotographie.

sivement, le disque à une seule fenêtre n'éclairant jamais au même moment qu'une seule des deux plaques photographiques.

Dissociation des images sur la plaque photographique.

— Lorsque l'objet dont on prend les images successives ne fait que des mouvements sur place, ses images se superposent et se confondent. On peut échapper à cet inconvénient par différents procédés dont l'un nous est déjà connu, celui qui

consiste à imprimer à la plaque sensible un mouvement horizontal de translation.

Lorsque nous avons parlé de l'inscription photographique des variations de l'Électromètre de Lippmann, nous avons montré les images successives de la colonne brillante de cet instrument se formant les unes à la suite des autres, grâce au déplacement de la plaque sensible. Cette manière de représenter les phases de la variation électrique est tout à fait comparable à l'inscription mécanique d'un mouvement par un style sur un papier qui se déplace. Ce genre de dissociation serait applicable dans un grand nombre de cas s'il n'exigeait une construction spéciale et assez compliquée, celle d'un châssis où la plaque est entraînée par un mouvement d'horlogerie.

Mais, avec les appareils ordinaires, on peut obtenir une dissociation semblable en imprimant à l'image elle-même un mouvement de translation sur la plaque photographique, celle-ci restant immobile. Il suffirait pour cela de communiquer à l'appareil chronophotographique un mouvement de rotation autour de son axe vertical pendant qu'on prend les images. En effet, l'axe optique principal de l'objectif, se déplaçant dans le plan de l'horizon, l'image d'un Homme située devant le champ obscur se déplacera horizontalement sur la plaque sensible. Et si cet Homme exécute sur place certains mouvements qui lui donnent des attitudes différentes, ou s'il marche avec une très grande lenteur, ses attitudes successives, au lieu de se confondre par superposition, se dissocieront en une série d'images juxtaposées, comme si l'Homme se fût déplacé horizontalement, et avec une vitesse suffisante, devant le champ obscur.

Mais alors, dira-t-on, la notion d'espace est faussée, puisqu'un changement d'attitudes exécuté sur place se traduit de la même manière qu'un mouvement de translation. Il faudra indiquer dans le cliché la position réelle de chacune des images; on y arrive d'une façon très simple. A côté de l'Homme qui saute sur place ou qui marche lentement,

on dispose devant le champ obscur un objet blanc qui reste entièrement immobile. Les images de cet objet s'échelonneront en série sur la plaque. Or, comme on sait qu'elles correspondent à un objet fixe, ces images servent de points

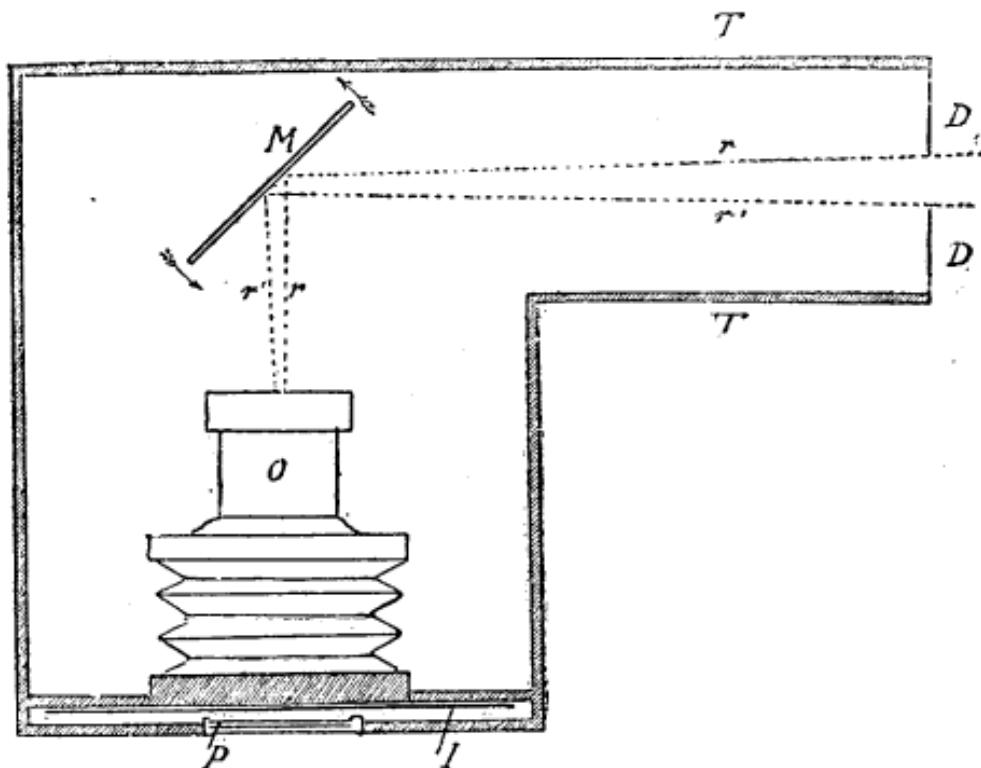


Fig. 46. — Miroir tournant pour dissocier les images d'un objet qui se déplace avec trop peu de vitesse.

de repère pour estimer les positions réelles que l'Homme occupait à chaque instant.

Ce déplacement imprimé à l'appareil chronophotographique est un moyen très simple de dissocier les images, mais il est assez difficile à exécuter avec régularité (1). Un procédé plus recommandable et qui donne les mêmes résultats consiste à réfléchir l'image de l'objet dans un miroir tournant avant de l'envoyer dans l'appareil chronophotographique. Ce miroir, argenté par les procédés de Foucault, tourne

(1) Un autre inconvénient de ce procédé, c'est qu'il risque de fausser l'appareil; en effet le disque obturateur, animé d'un mouvement extrêmement rapide, tend à conserver son plan de rotation et à tordre son axe si on le déplace brusquement.

autour d'un axe vertical; il est très facile de lui imprimer, au moyen d'un rouage d'horlogerie, un mouvement uniforme et plus ou moins rapide suivant le besoin (fig. 46).

Ces différents moyens de dissocier les images étendent le domaine de la Chronophotographie sur plaque fixe, en la rendant applicable à l'étude des mouvements lents ou des changements d'attitude sur place et sans translation. Toutefois la méthode cesse d'être applicable quand la très longue durée du mouvement qu'on veut représenter exige un très grand nombre d'images et que celles-ci ne peuvent être contenues dans les dimensions de la plaque. Elle n'est pas applicable non plus quand l'objet en mouvement se détache en couleur sombre sur un fond clair; il faut alors recourir à une nouvelle méthode, c'est la Chronophotographie sur plaque mobile, nous la décrirons plus loin.

CHAPITRE V

DESCRIPTION DES APPAREILS

SOMMAIRE. — Construction de l'appareil : châssis, objectif, disques obturateurs. — Établissement du champ obscur à la Station physiologique. — Champ obscur pour la Photographie dans l'eau. — Photographie d'objets brillants dans l'obscurité ou dans la lumière rouge. — Couleur des objets et manière de les éclairer. — Réglage et préparation du champ obscur. — Choix de l'objectif. — Mise au point. — Prise des images.

De l'appareil chronophotographique. — Un appareil photographique ordinaire peut donner des images chronophotographiques, s'il est muni d'un obturateur produisant des éclairements très courts à des intervalles de temps réguliers. Pour cela, un disque percé de fenêtres étroites et tournant dans une fente pratiquée dans la monture de l'objectif est la disposition la plus simple, celle que nous avons employée tout d'abord. Le disque était conduit, au moyen de poulies et d'un câble sans fin, par un mouvement d'horlogerie muni d'un bon régulateur.

Mais la nécessité de relier l'un à l'autre la chambre noire et le mouvement d'horlogerie, celle de changer à chaque instant de disque suivant la fréquence et la durée des éclairages qu'il fallait produire, nous a fait abandonner cette disposition embarrassante. Nous nous sommes décidé à construire un instrument spécial, portatif et réglable à volonté suivant le besoin. Cette construction était d'autant plus nécessaire, que certains mouvements ne peuvent être chronophotographiés sur plaque fixe, mais qu'il en faut recueillir les images successives sur une longue

bande de pellicule sensible se déroulant au foyer de l'objectif.

Le Chronophotographe représenté (fig. 47) se prête à tous ces besoins, mais nous n'en décrirons pour le moment que les pièces qui servent à prendre les images sur plaque fixe.

L'appareil se compose de deux corps réunis entre eux

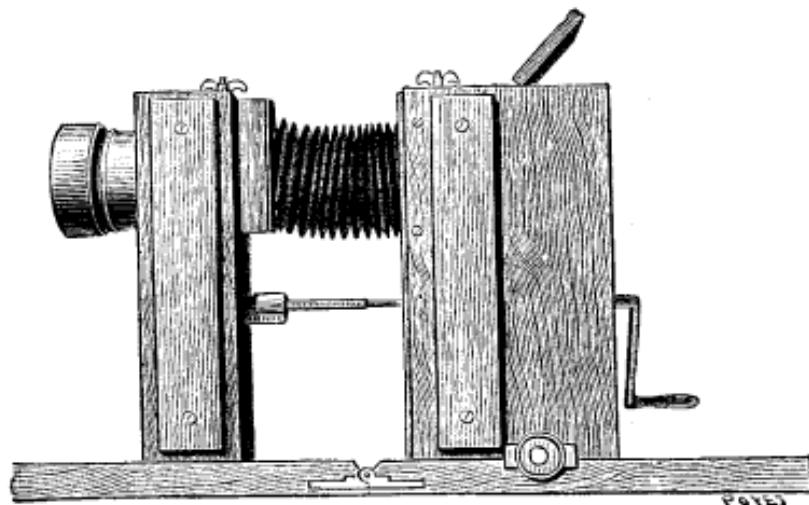


Fig. 47. — Disposition de l'appareil, se prêtant à toutes les applications de la Chronophotographie (Échelle 1/10).

par un soufflet. L'arrière-corps, dans lequel s'introduisent les châssis, glisse pour les besoins de la mise au point sur un rail au moyen d'un bouton à crémaillère.

L'objectif est contenu dans une boîte (fig. 48) fendue en dessous et qui coulisse dans une ouverture de l'avant-corps de l'appareil qu'elle remplit exactement. La fente située en dessous de la boîte coupe en deux l'objectif perpendiculairement à son axe optique principal, et laisse passer les disques fenêtrés qui, en tournant, produisent des intermittences dans l'admission de la lumière.

Un soufflet s'adapte, par une de ses extrémités à la boîte de l'objectif, tandis que l'autre, collée à l'arrière-corps, se trouve en rapport, par sa large ouverture, soit avec le chassis à verre dépoli (fig. 49), soit avec le chassis négatif (fig. 50).

Les seules pièces qui méritent une description spéciale sont les *disques obturateurs* et l'*arbre* qui sert à leur transmettre le mouvement.

Les disques obturateurs tournent en sens contraire l'un de l'autre ; la rencontre des ouvertures dont ils sont percés produit les éclairements. Cette disposition permet d'employer des disques de petit diamètre et par conséquent de réduire beaucoup les dimensions totales de l'appareil. Celui-ci, en effet n'excède pas le volume ordinaire d'une chambre 24-30. Quant à l'arbre qui fait tourner les disques, il emprunte

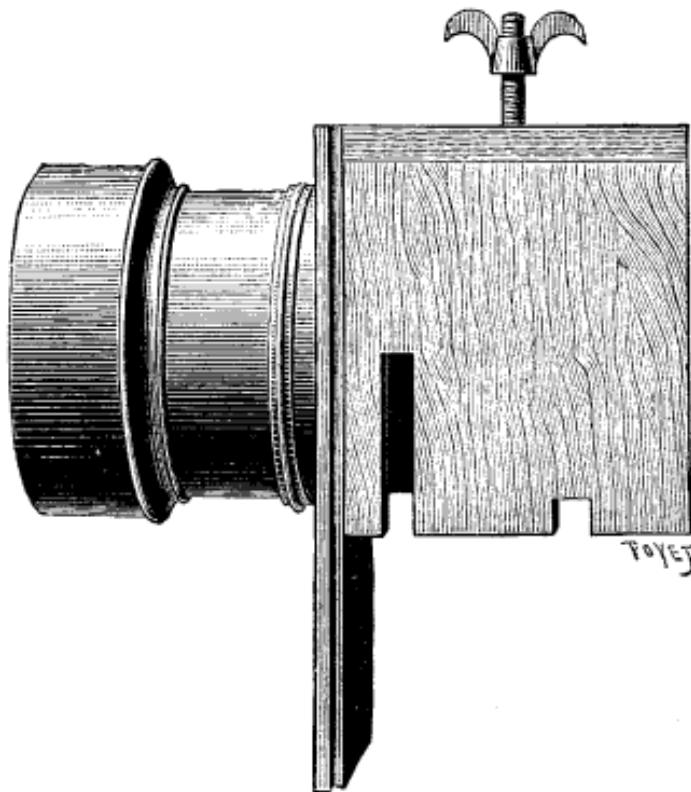


Fig. 48. — Objectif monté dans sa boîte à coulisse; en bas est la fente pour le passage des disques obturateurs.

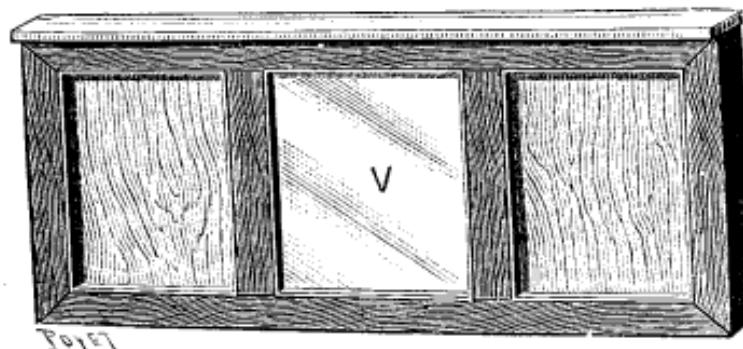


Fig. 49. — Châssis à verre dépoli pour la mise au point dans la Chronophotographie sur plaque fixe.

son mouvement à des rouages actionnés par une manivelle, et qu'il n'y a pas lieu de décrire en ce moment. Or, dans la

mise au point, le tirage doit varier, et les deux corps de l'appareil s'éloigner plus ou moins l'un de l'autre; il faut donc que l'arbre s'accorde à ces changements de lon-

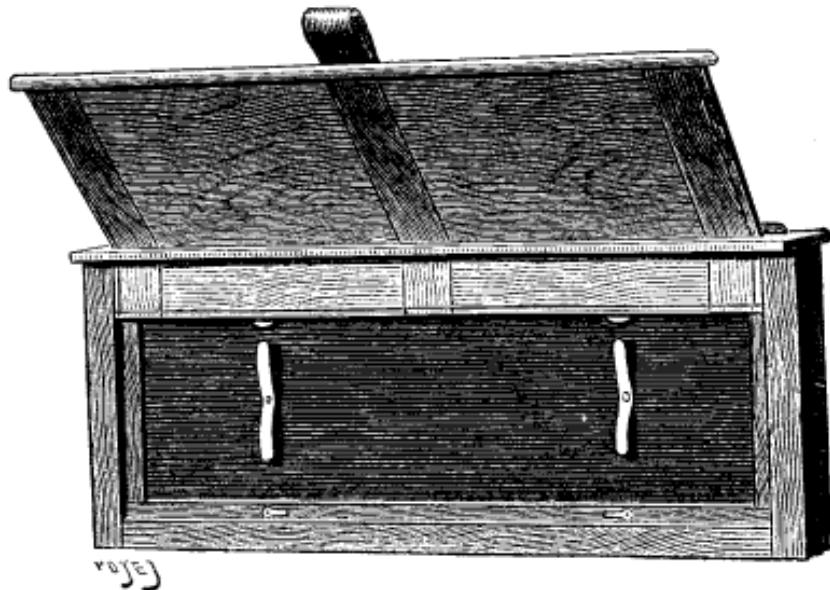


Fig. 50. — Châssis négatif.

gueur. Dans ce but, il est formé de tubes carrés glissant à frottement l'un dans l'autre; c'est ce qu'on appelle dans l'industrie un mouvement télescopique.

Établissement d'un champ obscur pour la Chronophotographie. — Le principe de la Chronophotographie sur plaque fixe exige que le corps dont on étudie le mouvement forme seul ses images sur la plaque sensible, tandis que le fond sur lequel il se détache n'envoie dans l'appareil aucun rayon lumineux. Un rideau de velours noir peut servir à cet usage, à la condition qu'il ne soit pas directement frappé par le soleil, car toute substance, quelque obscure qu'en soit la couleur, réfléchit toujours une certaine quantité de lumière quand elle est vivement éclairée.

Chevreul a indiqué le seul moyen d'obtenir le *noir absolu*: il consiste à noircir intérieurement une caisse dans la paroi de laquelle on pratique une ouverture. A côté de ce trou obscur, tout noir matériel éclairé par le soleil semble coloré.

Pour nous rapprocher le plus possible des conditions

idéales indiquées par Chevreul, nous avons construit (fig. 51) à la Station physiologique (1) une sorte de hangar profond



Fig. 51. — Disposition du champ obscur de la Station physiologique. En avant est une cabine roulant sur rails où se trouvent les appareils. Au-dessus du champ obscur, une charpente permet de placer les appareils à 12 mètres de hauteur lorsqu'on doit prendre les images d'en haut.

et large dont l'intérieur est peint en noir. Un rideau de velours noir en occupe le fond ; l'ouverture du hangar à

(1) Cet établissement, créé au Parc des Princes, grâce au concours de l'État et du Conseil municipal de la Ville de Paris, se prête à certaines études qu'on ne saurait réaliser dans les laboratoires ordinaires. C'est un champ d'expériences comme il n'en existe encore nulle part : on y trouve une longue piste circulaire, parfaitement horizontale, de 500 mètres de circuit, sur laquelle l'Homme et les grands animaux peuvent être étudiés dans leurs allures normales. Un champ obscur permet d'appliquer la Chronophotographie sur plaque fixe à l'analyse de mouvements très étendus. Un champ uniformément éclairé et de pareille surface se prête à la Chronophotographie sur pellicule mobile. Des Dynamomètres inscripteurs, des Spiromètres, des Compteurs de pas, des appareils divers pour la mensuration des sujets en expérience sont

11 mètres de long sur 4 de hauteur. Cette cavité est orientée de telle sorte que le soleil n'en puisse éclairer l'intérieur. Enfin, devant l'ouverture est une piste en pavé de bois noircie sur laquelle on fait passer, sous la pleine lumière du soleil, les Hommes ou les animaux dont on veut analyser les mouvements.

En théorie, devant un champ parfaitement obscur, on peut prendre un nombre indéfini d'images sans que la plaque soit impressionnée en dehors de celles-ci. En pratique, lorsqu'on a pris plusieurs centaines d'images successives d'un objet lumineux, la plaque présente parfois un léger voile dans les parties qui correspondent au champ obscur ; ce qui prouve qu'une faible quantité de lumière émane encore de ce champ. L'apparition du voile limite la durée du développement et diminue ainsi la vigueur des images. Il faut donc éviter les moindres réflexions de lumière par le champ obscur, car, si faible que soit la quantité de lumière qui en émane, comme elle agit sur la plaque sensible à chaque ouverture de l'objectif, la somme de ces petites actions qui s'ajoutent peut produire un effet sensible.

Une des premières conditions pour obtenir de bonnes images, c'est la pureté de l'atmosphère. Des poussières flottant dans l'air ferment, quand elles sont éclairées par le soleil, une sorte de brouillard lumineux qui altère la pureté du champ. Leur effet est très sensible quand un Cheval passe à une allure vive sur la piste qui s'étend au-devant du champ obscur. Cette piste doit donc être tenue humide. Le sol du voisinage est gazonné, l'intérieur du hangar soigneusement lavé.

Il arrive souvent que les rayons de soleil, sans pénétrer profondément à l'intérieur du hangar, en frappent cepen-

destinés aux études sur la locomotion de l'Homme. D'autre part, des Pneumographes, Sphygmographes et Cardiographes permettent de saisir les effets des exercices physiques sur les fonctions de la vie organique et de suivre pas à pas les progrès de l'entraînement des sujets. Enfin, des enclos servent à éléver en liberté les différentes espèces d'animaux dont on veut étudier la locomotion, normale ou modifiée.

dant le sol au voisinage de l'entrée, et que, réfléchis sur le fond de velours, ils altèrent sensiblement l'obscurité du champ. Aussi, bien que le sol du hangar soit fait d'asphalte noir, il faut quelquefois étendre une bande de velours sur les parties que le soleil frappe directement. (1)

En tout cas, on diminue les chances de réflexion de la lumière en réduisant au strict nécessaire l'ouverture du hangar obscur. Il arrive rarement que le mouvement qu'on étudie se passe dans toute la longueur du champ noir qui est de 11 mètres; souvent aussi l'on n'a pas besoin des 4 mètres de hauteur que présente son ouverture; on la réduit alors, au moyen de stores et de rideaux noirs, à des dimensions plus petites, et l'obscurité en est augmentée.

La plupart des expériences n'exigent pas un champ de si grandes dimensions, et peuvent être réalisées fort simplement dans des conditions parfaites. Une caisse cubique de 0^m,50 de côté, doublée à l'intérieur de velours noir, forme un champ obscur excellent, surtout si l'ouverture de cette caisse est un peu rétrécie. C'est ainsi qu'on photographie les mouvements des petits animaux et en général de tous les objets de petites dimensions. C'est au-devant d'une caisse de ce genre qu'ont été obtenues les figures du chapitre II, montrant les formes que décrit dans l'espace un fil blanc qui s'y meut suivant les trois dimensions.

Champ obscur pour la Photographie dans l'eau. — Lorsqu'on veut étudier la locomotion des Poissons ou tout autre mouvement qui se passe dans l'eau, il faut illuminer vivement les objets dont on veut prendre l'image, tandis qu'autour d'eux tout est dans une profonde obscurité.

A cet effet on place devant un champ noir une vasque rectangulaire dont les parois sont faites de glaces; le fond de cette vasque est aussi formé d'une glace, et c'est par là

(1) Une disposition qui serait parfaite, mais que les ressources de la Station physiologique ne nous ont pas permis de réaliser, serait d'abaisser le sol à l'intérieur du hangar de façon que le soleil ne le rencontre jamais.

qu'on fait pénétrer la lumière du soleil réfléchie par un miroir incliné, situé au niveau du sol.

La figure 52 montre cette disposition. La vasque de cristal y fait partie d'un canal de forme elliptique où les animaux peuvent nager circulairement comme les Chevaux tournent dans un cirque. On remplit d'eau le canal jusqu'aux trois quarts de sa hauteur et on en éclaire la partie transparente

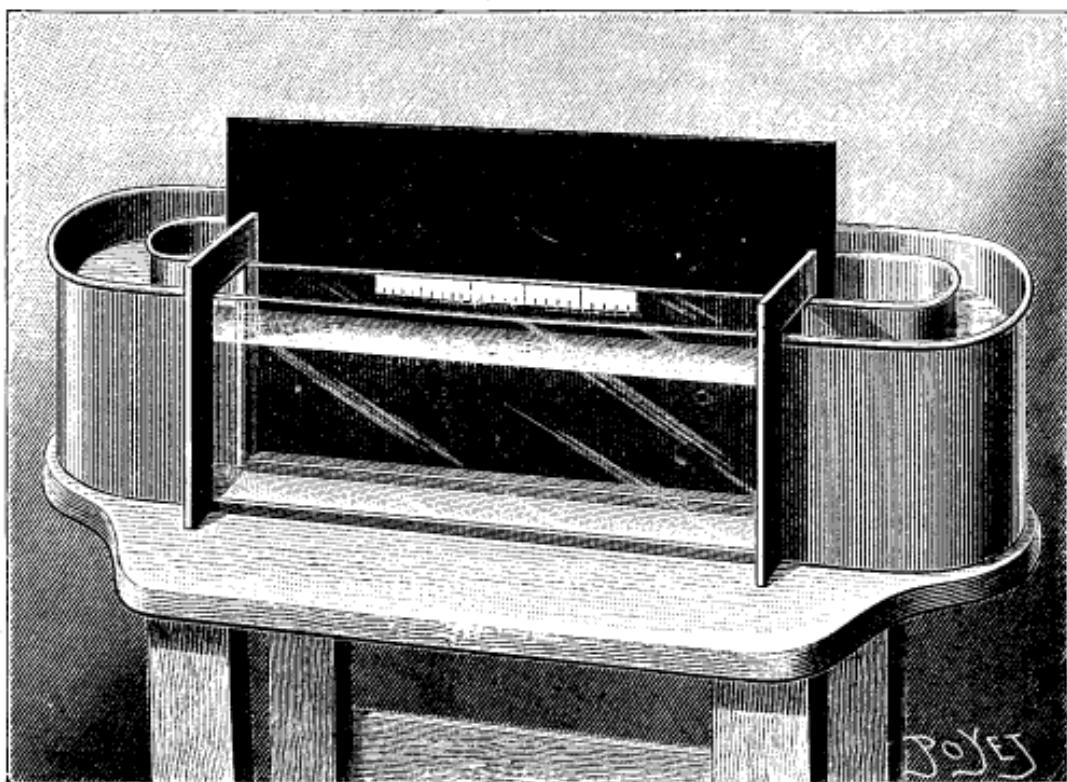


Fig. 23. — Champ obscur pour étudier les mouvements qui se passent dans les liquides.

au moyen d'un miroir incliné placé en dessous et qui reçoit directement les rayons du soleil.

Ce canal, monté sur une haute table munie de brancards, se transporte avec facilité. On le place au-devant d'une fenêtre ouverte par où la lumière solaire vient tomber sur le miroir incliné. Suivant les heures du jour, on fait varier l'orientation de l'appareil et l'inclinaison du miroir, de façon que les rayons lumineux soient verticalement réfléchis à travers la vasque.

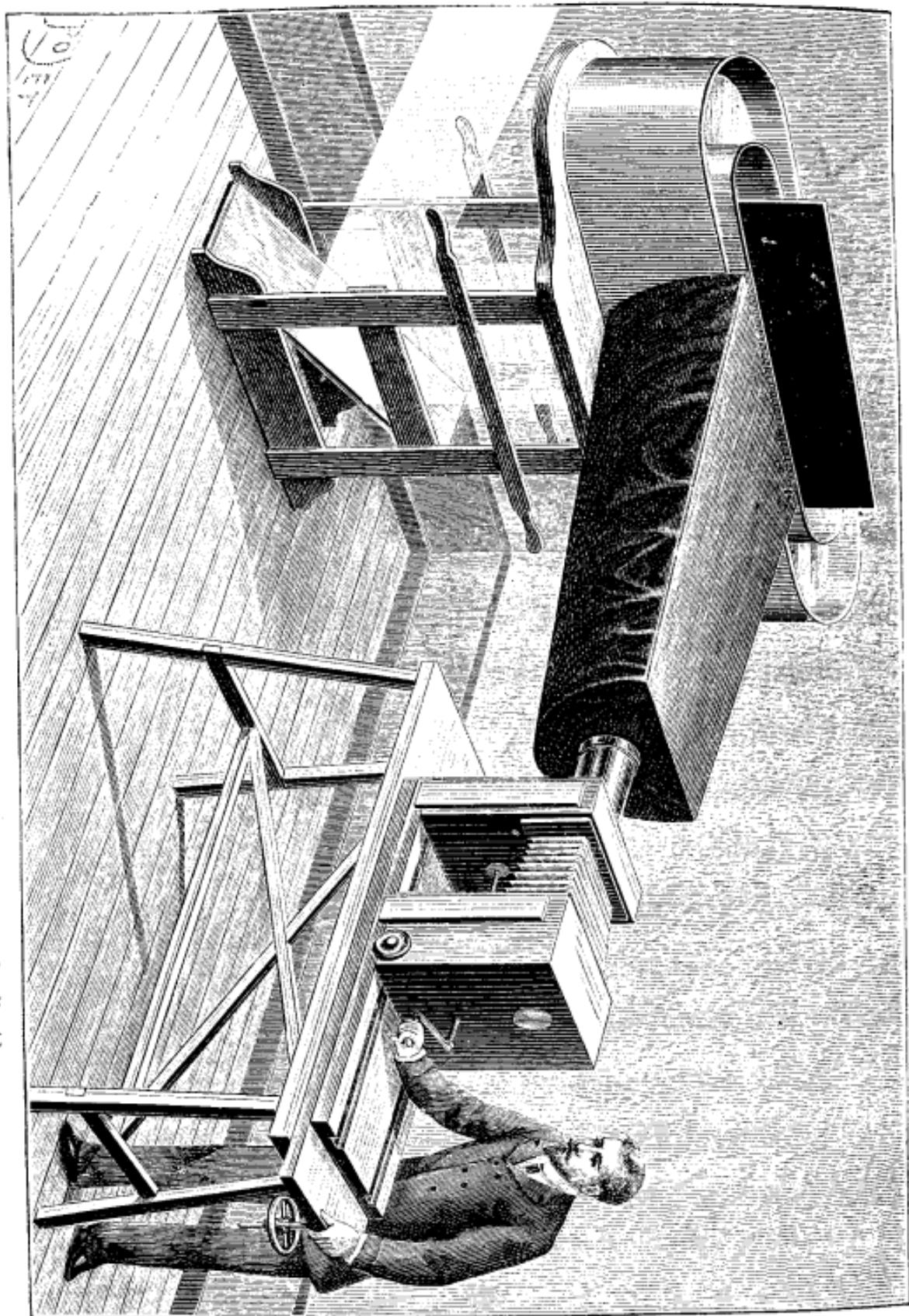


Fig. 52 (*bis*). — Disposition de l'expérience pour étudier les mouvements des liquides.

Illuminés de cette manière, tous les objets qui flottent dans l'eau présentent un vif éclat, mais l'eau elle-même, si elle est bien limpide, est parfaitement invisible.

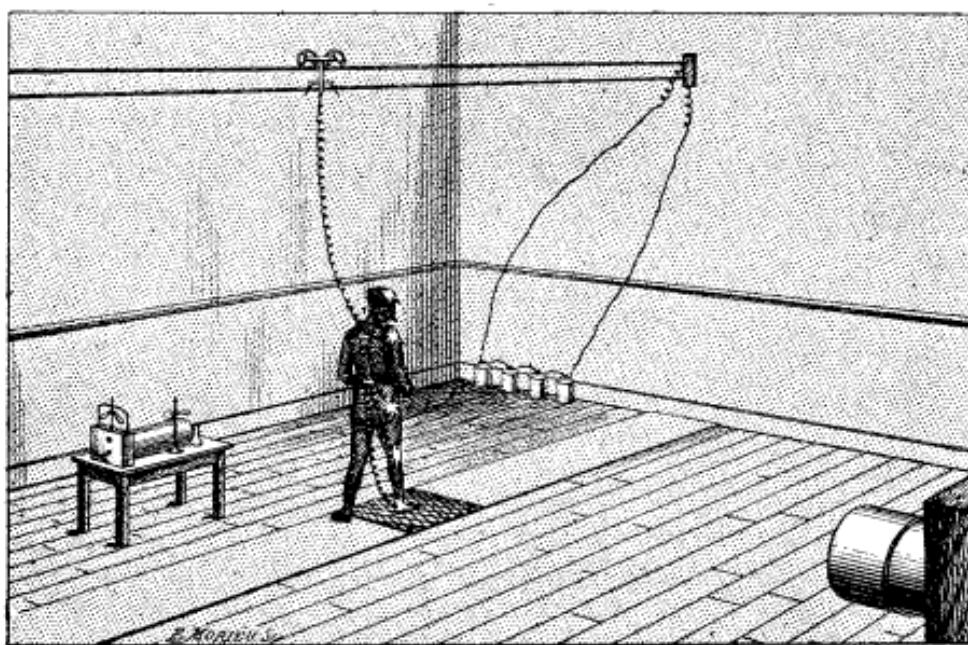


Fig. 53. — Disposition employée par MM. Demeny et Quénau, pour étudier les mouvements anormaux de la marche, par la Chronophotographie.

Reste à former le champ obscur en plaçant un rideau de velours noir derrière la partie transparente et à éliminer toute lumière venant du dehors.

On y arrive au moyen de châssis légers couverts d'étoffe noire et disposés en une sorte de pyramide rectangulaire dont la base enveloppe la vasque de cristal et dont le sommet livre passage à l'objectif photographique. Une ouverture située près de ce sommet permet à l'opérateur de surveiller ce qui se passe dans l'eau et de saisir le moment opportun pour la prise des images.

Photographie d'objets brillants dans l'obscurité ou dans la lumière rouge. — On n'a pas besoin de champ obscur lorsque, pendant la nuit, ou dans un local éclairé par la lumière rouge, on photographie les mouvements d'un corps lumineux par lui-même, d'une lampe à incan-

descence par exemple; cela donne d'excellentes images.

L. Soret a le premier recouru à cette disposition. La nuit, dans une salle de théâtre uniquement éclairée par quelques

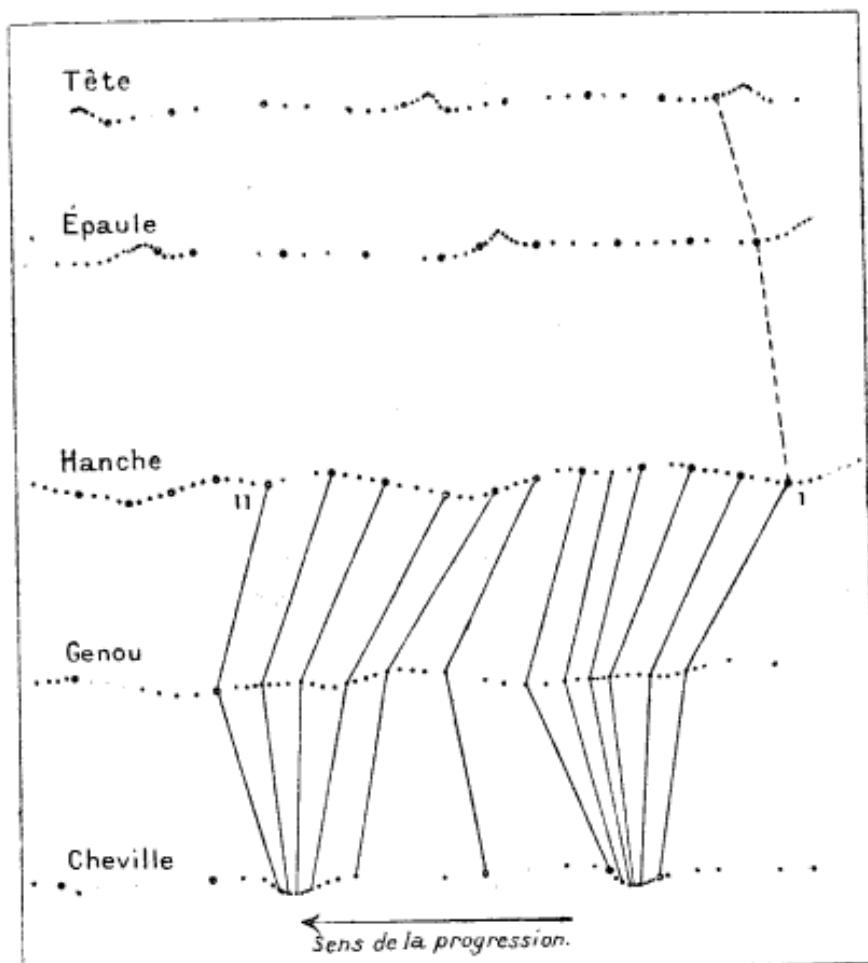


Fig. 54. — Espace des mouvements de la jambe, obtenue par MM. Demeny et Quénu dans un cas de claudication.

lanternes rouges, il étudiait les mouvements de la Chorégraphie en appliquant sur la tête et sur les pieds des danseuses de petites lampes à incandescence. Soret obtint de cette manière des trajectoires fort curieuses où les courbes décrites s'entrelaçaient avec une élégante régularité.

MM. Demeny et Quénu ont également recouru aux lampes à incandescence pour analyser par la Chronophotographie la marche de malades atteints de différentes sortes de claudication.

Une chambre, dans les bâtiments d'un hôpital, fut munie de vitres rouges (fig. 53); on traça sur le parquet la piste sur laquelle devait marcher le malade et l'on mit l'appareil au point pour cette distance. Des lampes à incandescence furent appliquées aux articulations d'une jambe, à l'une des épaules et sur la tête du sujet. Ces lampes étaient placées sur un circuit mis en communication avec les piles par un chariot qui glissait sur des fils métalliques et accompagnait les mouvements du marcheur.

L'image obtenue (fig. 54) était formée d'une série de points brillants correspondant aux positions successives de chacune des lampes. En reliant entre eux ces points par des lignes, on avait la Chronophotographie géométrique de la marche du sujet (1).

On peut varier à l'infini l'emploi de la lumière rouge combiné à celui de la lumière électrique. Si, par exemple, on disposait d'un projecteur électrique puissant dont on dirigeait le faisceau au travers d'une chambre à lumière rouge, les objets soumis à l'éclairage électrique donneraient seuls leurs images sur la plaque photographique.

Couleur des objets et manière de les éclairer. — Quand les objets qu'on étudie sont de couleur blanche, ou tout au moins suffisamment photogénique, il suffit de les éclairer vivement pour en avoir de bonnes images, car si le champ sur lequel ils se projettent est parfaitement obscur, en pro-

(1) Comme il serait très difficile, dans cette longue suite de points, de reconnaître ceux qui ont été formés au même instant, on a recouru à la disposition suivante : Le disque obturateur portait cinq fenêtres et donnait par conséquent cinq images à chaque tour. Or, une des fenêtres avait été faite plus large que les autres, il en résultait une intensité plus grande de l'image qu'elle formait sur la plaque, cette image correspondant à une pose plus longue. Sur le cliché négatif dont la figure 54 est la reproduction, on voit que dans chaque série de points, il y en a un, de quatre en quatre, qui est plus marqué que les autres : ce sont ces gros points qu'il faut réunir entre eux par des lignes pour représenter dans l'épure les positions des différents rayons du membre à des instants successifs. Quant aux petits points intermédiaires, ils ne sont pas inutiles, car ils expriment par leur écartement plus ou moins grand la vitesse de chacune des articulations.

longeant un peu le développement de la plaque, les images se détacheront vigoureusement. Mais parfois la couleur des objets n'est pas suffisamment photogénique ou même ne l'est pas du tout ; il faut alors recourir aux colorations artificielles.

En cherchant à saisir par la Chronophotographie les changements de forme et d'aspect que présentent les oreillettes et les ventricules du cœur d'un animal, nous avons rencontré cette difficulté à son plus haut degré, car la couleur rouge des muscles et du sang n'impressionnait pas du tout la plaque photographique. En passant au pinceau une solution de gouache sur la surface du cœur, nous l'avons rendu photogénique et avons eu de bonnes images avec des temps de pose très courts.

Sur les conditions d'éclairage les plus propres à faire valoir le modelé des objets, nous n'aurons que peu de chose à dire ; les photographes ont acquis à cet égard une telle habileté qu'on ne saurait mieux faire que de leur emprunter leurs procédés.

En général, les objets devraient être frappés par la lumière directe, mais les exigences du fond obscur forcent souvent à recourir à un éclairage latéral. Sous cette lumière rasante, le modelé de certaines parties de l'objet est parfois très bien accentué, mais d'autres parties sont beaucoup trop dans l'ombre. On y remédie au moyen de réflecteurs convenablement orientés.

En somme, le problème de l'éclairage comporte des solutions très variées, mais qui ne prennent d'importance que dans les cas assez rares où les épreuves doivent avoir un caractère artistique.

Réglage et préparation du champ obscur. — L'étendue qu'on doit donner au champ obscur est réglée sur celle du mouvement dont on veut suivre les phases. C'est à ces dimensions qu'il faut réduire l'ouverture de la cavité noire, afin qu'il s'y introduise le moins possible de lumière. Dans le plan où devra se produire le mouvement, on place la règle métrique et, s'il y a lieu, le cadran chronométrique :

enfin, on dispose l'appareil à une distance convenable pour que la surface sensible qu'on veut utiliser corresponde à l'étendue du champ obscur.

Mais, pour ce réglage, il faut que les limites du champ soient visibles sur le verre dépoli, on doit donc les indiquer

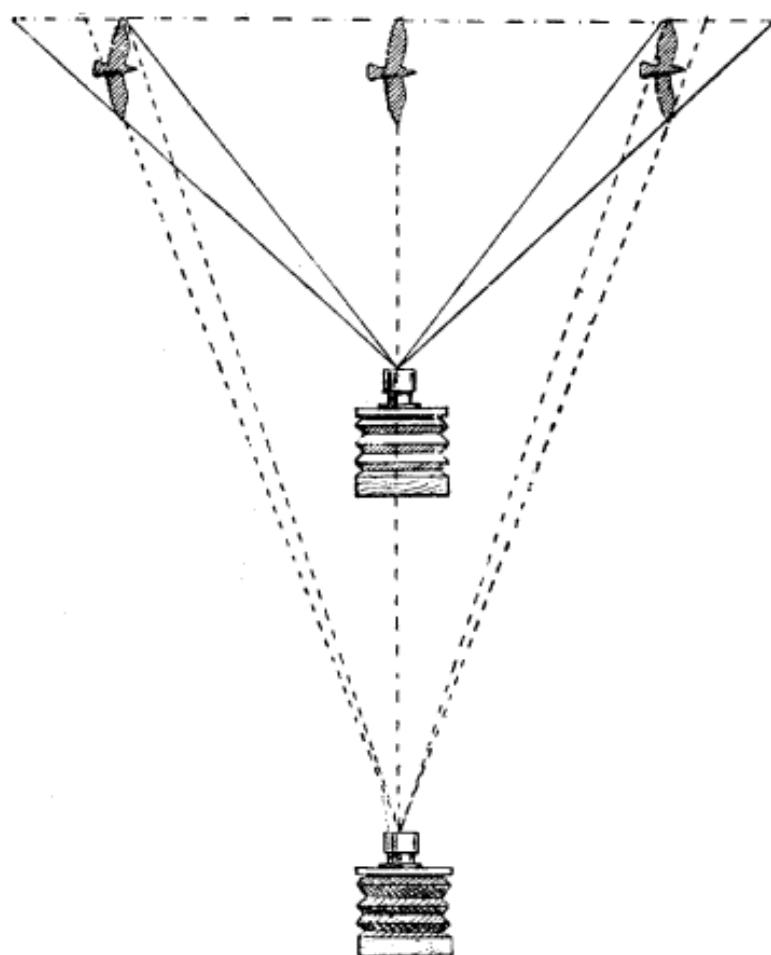


Fig. 55. — Changements qui se produisent dans la perspective d'un animal en mouvement suivant la distance à laquelle est placé l'appareil photographique.

en y disposant des bandes de couleur claire ou quelque objet bien apparent.

Choix de l'objectif. — Quand le mouvement qu'on étudie se pose rigoureusement dans un plan, on peut se servir d'un objectif quelconque et s'éloigner jusqu'à ce que l'image ait sur le verre dépoli les dimensions voulues. Dans ce cas, les

objectifs à courts foyers sont toujours préférables, étant plus lumineux; mais, en dehors de ces conditions, l'emploi des courts foyers présente des inconvénients.

Si l'objet qu'on photographie offre une certaine profondeur, il se montre, aux différents points de son trajet, sous des perspectives différentes pour un observateur placé à petite distance. Or, cette différence de perspective diminue à mesure que l'observateur s'éloigne de l'objet. Prenons un exemple concret : un Oiseau (fig. 55) sera représenté avec des perspectives très différentes si l'appareil est situé près de lui : au début du vol, cet Oiseau sera vu d'avant; au milieu du vol l'image le représentera franchement vu de côté; à la fin du vol, il sera vu d'arrière. Ces différences de perspectives seront moins sensibles pour un appareil plus éloigné, et les images successives seront plus facilement comparables entre elles quand on devra mesurer les trajectoires et les vitesses des différentes parties de l'Oiseau. Mais, comme en s'éloignant on obtient des images de plus en plus petites, on devra, pour leur conserver des dimensions suffisantes, employer des objectifs à plus longs foyers.

Ce que nous pourrions ajouter à cet égard serait superflu; les traités de Photographie donnent sur ce sujet les indications les plus précises.

Mise au point. — La mise au point se fait sur le châssis à verre dépoli (fig. 49). On met en coïncidence les fenêtres des disques obturateurs en tournant à la main l'axe qui les conduit. L'image se regarde par une ouverture située en arrière de l'appareil, au-dessus de la manivelle (1).

Prise des images. — De même qu'on limite au strict nécessaire l'ouverture du champ obscur, de même on doit limiter la durée de l'introduction de la lumière dans l'objectif. Si la plaque sensible était démasquée inutilement avant

(1) Cette partie de l'arrière-corps contient une chambre spéciale destinée à la Chronophotographie sur pellicule mobile dont il sera question plus tard. C'est à travers cette chambre qu'on examine l'image sur le verre dépoli.

le début et après la fin du phénomène qu'on veut saisir, les ouvertures intermittentes de l'objectif laisseraient arriver sur la plaque de petites quantités de lumière qui tendraient à produire un voile.

On évite cet inconvénient en plaçant devant l'objectif un obturateur spécial du genre de ceux qu'on actionne en pressant dans la main une poire de caoutchouc. Cet *obturateur d'avant* permet, pendant qu'il est fermé, d'ouvrir le rideau du châssis, de mettre l'appareil en marche et de préparer l'expérience, tout en laissant la plaque sensible dans l'obscurité. Ce n'est qu'au moment où le phénomène intéressant va se produire qu'on presse la poire de caoutchouc, l'obturateur d'avant s'ouvre, et la prise des images commence. Aussitôt que le phénomène est terminé, on ferme l'obturateur d'avant, et l'on a tout le temps de refermer le châssis sans que la plaque risque d'être soumise à des éclairements nuisibles.

CHAPITRE VI

APPLICATIONS DE LA CHRONOPHOTOGRAPHIE A LA MÉCANIQUE

SOMMAIRE. — Chute des corps dans l'air. — Expériences de balistique. — Résistance de l'air aux surfaces diversement inclinées. — Applications de la Chronophotographie à l'Hydrodynamique : veines fluides; changement du profil du liquide dans les ondes. — Mouvements intérieurs du liquide dans les ondes. — Courants et remous. — Influence de la forme des corps immergés dans les courants. — Oscillations et vibrations. — Roulis des navires. — Vibrations des ponts métalliques.

Chute des corps dans l'air. — La détermination du mouvement des corps qui tombent est un des problèmes fondamentaux de la Dynamique. On peut même dire que la mémorable expérience de Galilée fut l'origine de la Mécanique expérimentale, car elle apprit à mesurer les forces d'après les mouvements qu'elles impriment aux corps matériels.

Le mouvement uniformément accéléré dû à la pesanteur suppose une chute libre du mobile. Quant les corps tombent dans l'air, la résistance de ce milieu modifie la loi du mouvement, et cette résistance, qui croît sensiblement comme le carré de la vitesse de chute, finit par devenir égale à la pesanteur. A ce moment la chute est devenue uniforme, la résistance de l'air étant égale au poids du corps.

Il y aurait donc, dans la Chronophotographie, une méthode prompte et facile pour mesurer la résistance de l'air à des mobiles de différentes formes, animés de différentes vitesses. Mais de telles expériences devraient être faites dans un espace clos, à l'abri des courants d'air. Que dans un tel espace un projecteur électrique lance, pendant la nuit, un fais-

ceau de lumière vertical, les corps de différentes formes qu'on y fera tomber seront vivement éclairés par leur face

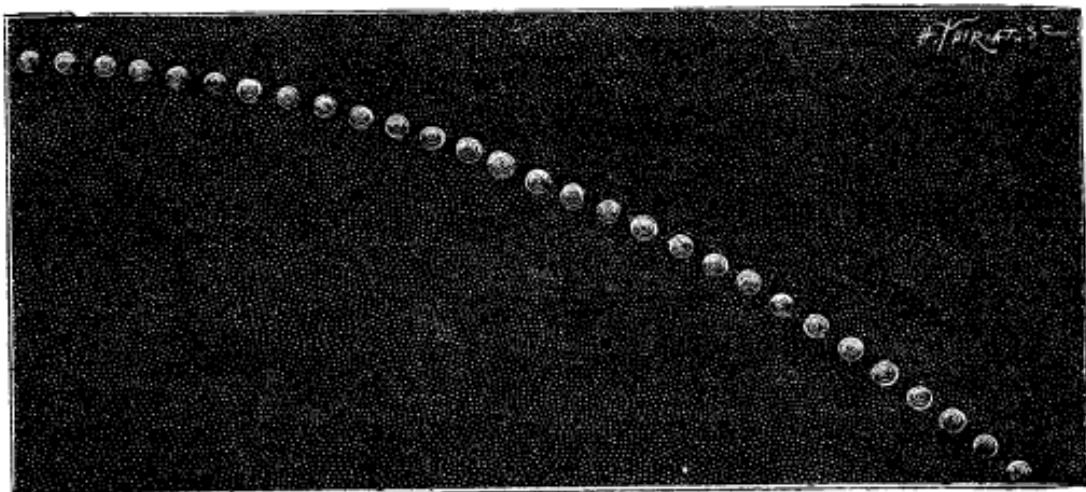


Fig. 56. — Positions successives d'un projectile rapportées à deux axes, l'un vertical, l'autre horizontal.

inférieure et donneront sur la plaque du Chronophotographe leurs positions successives à des instants connus (1).

Mais à l'air libre, le moindre souffle de vent trouble la

(1) A Paris, la Galerie des machines de l'Exposition de 1889 se prêterait admirablement à ce genre d'expériences. Des cintres de cet immense vaisseau les corps tomberaient dans le faisceau de lumière, à côté duquel un câble, portant de distance en distance des lampes à incandescence, représenterait l'échelle des longueurs, tandis qu'un cadran chronométrique à aiguille brillante marquerait les temps. Les expériences qu'on ferait ainsi auraient un grand intérêt au point de vue de la locomotion aérienne; elles contrôleraient et continueraient les belles études que poursuivent en ce moment, à la tour Eiffel, notre confrère et ami Cailletet et M. Colardeau.

En faisant tomber un mobile de poids connu, on lirait sur la plaque sensible, à partir de quel moment la chute serait devenue uniforme, et l'on connaîtrait, pour cette vitesse, la résistance de l'air, puisqu'elle serait égale au poids du mobile.

Enfin, dans une série d'expériences, en faisant tomber le même corps, lesté de charges successivement croissantes, de façon que le poids du mobile s'accrût suivant la progression 1, 2, 3, etc., on verrait à quelles vitesses le mouvement devient uniforme. Et puisque la résistance de l'air est alors égale au poids du mobile, on saurait quelle est, pour la forme de ce mobile, la loi d'accroissement de la résistance de l'air en fonction de la vitesse.

marche du mobile, et si l'on ne dispose que d'une faible hauteur de chute, les effets de la résistance de l'air n'arrivent pas à uniformiser la vitesse, à moins qu'on ne se serve de corps très légers.

Dans l'expérience représentée figure 35, on a fait tomber une balle de caoutchouc du poids de 30 grammes et de 11 centimètres de diamètre. C'est à peine si, après deux mètres de chute, la diminution de l'accélération se faisait sentir; mais cet effet serait plus sensible sur un petit ballon léger insufflé d'air.

Expériences de balistique. — La Chronophotographic retrace les trajectoires des projectiles lancés avec peu de vitesse et montre comment ces corps se comportent, suivant leurs formes et suivant la nature des forces qui agissent sur eux.

Lorsqu'un projectile sphérique est lancé horizontalement, la trajectoire qu'il suit est sensiblement une branche

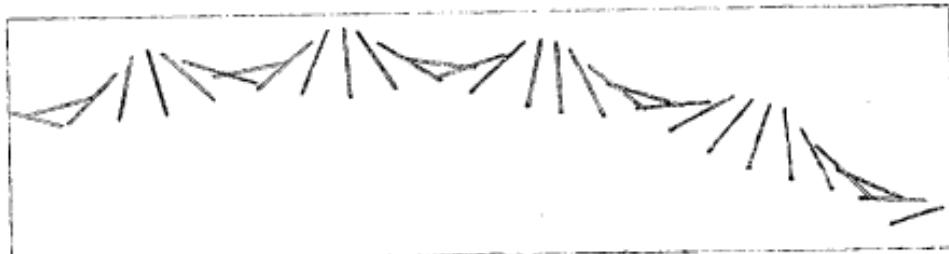


Fig. 57. — Bâton lancé horizontalement avec un mouvement de tournoiement dans un plan vertical (image négative).

de parabole; elle est toutefois altérée par la résistance de l'air, ainsi qu'on le verra tout à l'heure.

Si le projectile s'éloigne de la forme sphérique, si c'est un bâton qu'on lance en lui imprimant un mouvement de rotation dans un plan vertical, les images du bâton (fig. 57) présenteront des directions très variées, mais le centre de gravité, c'est-à-dire le milieu de ce bâton, suivra la trajectoire parabolique.

Pour rendre le phénomène plus saisissant, réunissons, au moyen d'un fil, deux masses inégales et lançons-les en leur

imprimant aussi un mouvement de rotation. Ces deux masses (fig. 58) tourneront l'une autour de l'autre comme un astre autour de son satellite; ni l'une ni l'autre de ces masses ne suivra la trajectoire parabolique, mais le centre de gravité



Fig. 58. — Mouvement d'un système de deux boules liées ensemble par un fil.

du système qu'elles forment ensemble se mouvra exactement sur cette trajectoire.

Enfin, dans les expériences de ce genre, on peut rendre apparente la façon dont la résistance de l'air modifie le mouvement imprimé aux masses. Prenons, par exemple, la tra-

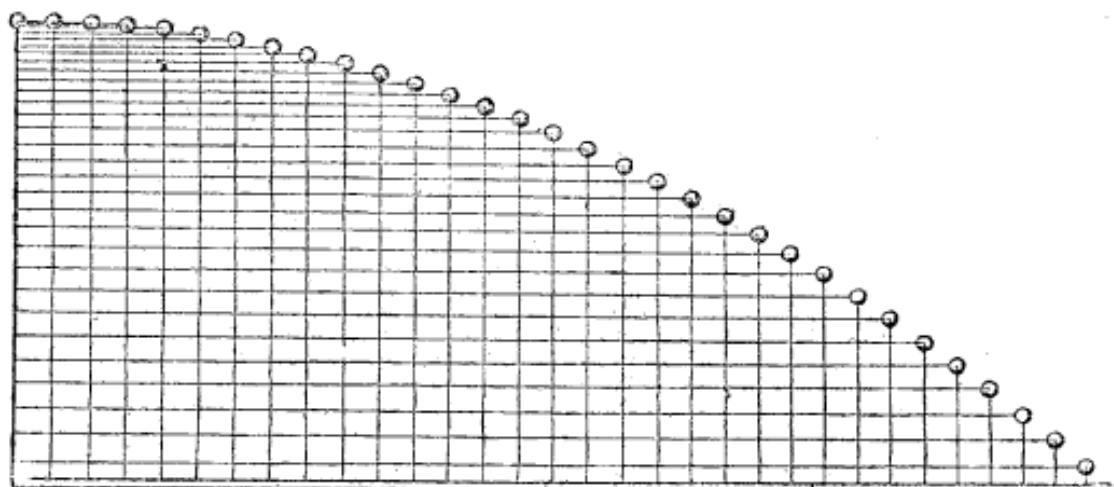


Fig. 59. — Trajectoire d'un projectile rapportée à deux axes (image négative).

jectoire d'un projectile sphérique lancé horizontalement, et construisons (fig. 59) l'épure de ce mouvement, en rapportant chacune des positions du mobile à deux axes perpendiculaires entre eux.

Si la résistance de l'air n'intervenait pas, le mouvement de translation horizontale se maintiendrait uniforme. Or, si l'on prend au compas la longueur d'un des derniers éléments

du parcours horizontal et qu'on la compare à l'un des premiers éléments, on voit qu'il s'est produit, vers la fin du mouvement, un ralentissement sensible.

De même, si l'on mesure la vitesse de la chute, on trouve que son accélération a notablement diminué sous l'influence de la résistance de l'air. Nous avons même observé, dans une autre expérience, que si on laisse tomber verticalement un mobile, puis qu'on le lance horizontalement de la même hauteur, la durée de la chute verticale n'est pas la même dans les deux cas mais que, dans le second, la résistance de l'air la ralentit davantage.

Ce résultat expérimental avait frappé M. le capitaine Uchard, qui en a été témoin à la Station physiologique. Appliquant cette donnée qu'il croit nouvelle au mouvement des projectiles d'artillerie, il a vérifié par le calcul que la résistance de l'air à leur chute n'est pas la même, suivant qu'ils tombent verticalement en chute libre, ou qu'ils sont animés d'une vitesse initiale (1).

Résistance de l'air aux surfaces diversement inclinées.

— Les tentatives que l'on fait de toute part pour créer des machines volantes exigent, pour réussir pleinement, la connaissance de l'action de l'air sur les surfaces inclinées qui s'y déplacent, avec différentes vitesses et sous différents angles. D'habiles expérimentateurs ont réussi à construire de petits appareils légers qui, abandonnés dans l'air, y glissent à la façon des Oiseaux planeurs. L'œil a peine à suivre cette trajectoire, parfois assez compliquée, où des inflexions variées de la courbe suivie se combinent à des changements d'inclinaison de l'axe du système.

Une feuille de carton bristol pliée suivant sa longueur, en angle obtus dièdre, relevée à son arrière, et terminée en avant par une pointe, fut lestée au moyen d'une aiguille d'acier collée dans la concavité de son pli longitudinal.

(1) A. Uchard, *Remarques sur les lois de la résistance de l'air*. Paris, Berger-Levrault, 1892.

On laissa tomber verticalement ce petit appareil planeur, et la trajectoire chronophotographique en fut prise, à raison de 20 images par seconde. La figure 60 représente un décalque de cette trajectoire, qui commence à droite et en haut de la figure.

Le mobile tombe d'abord verticalement, d'un mouvement accéléré ; mais bientôt, par un effet de gouvernail que produit la courbure de son extrémité d'arrière, il infléchit sa courbe et se meut suivant une ligne horizontale qui tend peu à peu à devenir ascendante. A ce moment, le planeur perd de sa vitesse et son axe se redresse en s'approchant de la

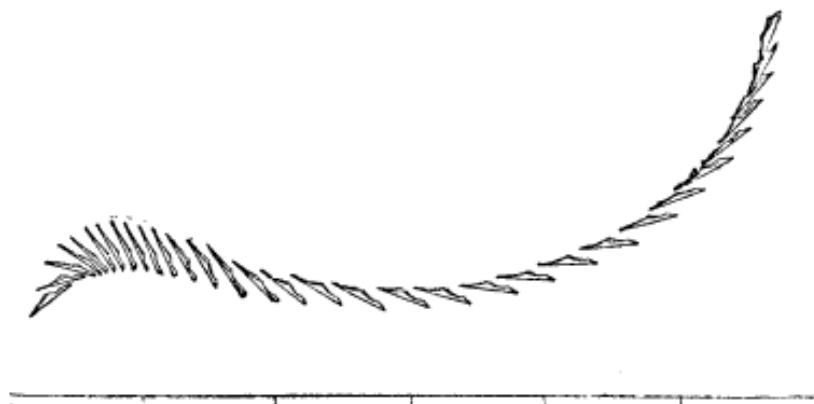


Fig. 60. — Trajectoire chronophotographique d'un appareil planeur décrivant dans l'air une courbe sinuuse (20 images par seconde).

verticalité. Puis, l'axe revenant graduellement à la direction horizontale, le mobile plonge de nouveau, la pointe en bas, et eut repassé par une nouvelle phase de descente accélérée si l'expérience n'eût été arrêtée à ce moment.

Toutes ces inflexions bizarres que les aviateurs connaissent aujourd'hui, à la suite de patientes observations, sont expliquées par eux au moyen des lois d'Avanzini et de Joëssel qui montrent que, si une lame mince se déplace obliquement dans un fluide, les conditions d'équilibre de cette lame se modifient, suivant la vitesse de translation et suivant l'angle que la lame forme avec la direction de son mouvement. Nous n'insisterons pas maintenant (1) sur l'interprétation de ces ex-

(1) Voir *Le Vol des Oiseaux*, chap. xix. Paris, G. Masson, 1890.

périences, qui devront être suivies d'une façon méthodique. Il s'agissait seulement de montrer de quel secours peut être la Chronophotographie pour de semblables études.

Applications de la Chronophotographie à l'Hydrodynamique. — Les mouvements des liquides sont d'une observation très difficile ; ce n'est qu'au moyen d'artifices qu'on est parvenu à les saisir. C'est ainsi que Savart, éclairant une veine fluide par une étincelle électrique, vit les changements de formes et de distances que présentent les gouttes du liquide. M. Boy, appliquant à cette étude la Photographie instantanée, a obtenu d'excellentes images, où l'aspect de la veine fluide est représenté pendant la durée très courte de l'étincelle électrique.

Dans une masse liquide en mouvement, il se produit des phénomènes extrêmement complexes : changements de forme de la surface et déplacement des molécules intérieures. Ces phénomènes peuvent être saisis par la Chronophotographie.

Plaçons-nous dans les conditions représentées figure 52, où de l'eau, contenue dans une gouttière à parois de cristal, est éclairée de bas en haut par les rayons du soleil qui réfléchit un miroir disposé en dessous de la gouttière et au niveau du sol.

Si l'eau est parfaitement limpide, elle est traversée par la lumière solaire sans en rien envoyer dans la direction de l'appareil photographique, sauf dans la partie de sa surface qui mouille la paroi de verre située du côté de l'observateur. En cet endroit, en effet, la capillarité forme un ménisque concave qui règne tout le long de la paroi. La lumière solaire qui a traversé l'eau éprouve sous ce ménisque une réflexion totale. On voit sur la glace dépolie de l'appareil photographique une ligne très brillante et très fine qui marque le niveau de l'eau et qui, se déplaçant avec lui, traduira sur l'épreuve photographique toutes ses ondulations.

Quant aux mouvements qui se passent à l'intérieur du liquide, on les rend visibles au moyen de petits corps brillants en suspension dans l'eau et que la lumière solaire

éclaire vivement. A cet effet, on fond, en proportions convenables, de la cire qui est moins dense que l'eau et de la résine dont la densité est plus grande; puis, avec cette matière plastique, on fait un grand nombre de petites boules qu'on argente par le procédé en usage dans les pharmacies. Ces perles brillantes doivent être légèrement plus denses que l'eau douce, de manière que, si on les y plonge, elles gagnent le fond avec lenteur. Il suffit alors d'ajouter graduellement dans la vasque une petite quantité d'eau salée pour que les perles se tiennent suspendues en équilibre indifférent dans ce mélange.

Enfin, une règle centimétrique dessinée sur du papier, est collée sur la paroi de la vasque, au-dessus de niveau du liquide. Cette règle, qui se reproduira sur les images, servira d'échelle pour mesurer l'amplitude des mouvements photographiés.

Avec ce dispositif on peut exécuter un grand nombre d'expériences sur les liquides; nous n'en présenterons que quelques-unes sous forme de photogrammes.

Changements du profil du liquide dans les ondes. — La ligne brillante qui marque le niveau de l'eau prend, lorsqu'on agite ce liquide, des inflexions diverses qui rappellent celles des cordes vibrantes. Les ventres et les noeuds, c'est-à-dire les *crêtes* et les *creux*, tantôt occupent des points fixes à la surface de l'eau comme dans le clapotis, et tantôt se déplacent avec une vitesse variable comme dans la vague et la houle.

La figure 61 représente le mouvement sur place d'une onde de clapotis simple. On a obtenu ce mouvement en plongeant dans l'eau, à des intervalles de temps égaux et convenablement réglés, un cylindre plein qui imprimait au liquide des oscillations régulières. Ces impulsions rythmées doivent être produites dans la partie du canal opposée à celle où le mouvement est étudié.

L'objectif de l'appareil étant ouvert en permanence, la ligne brillante du niveau de l'eau laisse la trace de son pas-

sage dans tous les lieux qu'elle a parcourus, mais avec une intensité plus grande dans les points où sa vitesse était moindre: ainsi, au voisinage des nœuds et aux points morts de son oscillation, c'est-à-dire aux *crêtes* et aux *creux* où la vitesse, avant de changer de signe, passe par un minimum (fig. 61).

Si l'on veut mieux connaître les changements de vitesse



Fig. 61. — Forme d'une onde de clapotis simple.

que présente le profil de l'onde aux différentes phases d'une oscillation simple, il faut recourir à la Chronophotographie, c'est-à-dire admettre la lumière pendant des instants très courts et à des intervalles de temps réguliers. On obtient alors (fig. 62) les positions successives du niveau du



Fig. 62. — Onde de clapotis simple représentée par la Chronophotographie.

liquide. Ces positions se traduisent par des courbes plus espacées au milieu de l'oscillation, plus rapprochées au voisinage des crêtes et des creux.

Enfin, si l'on change la cadence du mouvement, en l'accélérant d'une manière graduelle, on tombe dans d'autres périodes de clapotis où les ondes sont plus courtes (fig. 63). Dans tous les cas, le profil de l'onde qui passe par les crêtes et les creux a la forme que les hydrauliciens lui ont assignée : celle d'une trochoïde.

Les ondes accompagnées de translation, vagues et houles, montrent sur les images chronophotographiques la vitesse de leur transport, ainsi que leurs changements de forme et d'amplitude.

La figure 64 représente une vague produite de la manière suivante : le cylindre étant immergé à l'extrémité droite de la paroi de cristal, en un point invisible à l'observateur, on



Fig. 63. — Onde de clapotis de période plus courte.

le soulève, puis on l'abaisse brusquement. On recueille pendant ce temps une série d'images correspondant aux premiers instants du phénomène.

C'est d'abord une suite d'abaissements progressifs du profil de l'eau pendant que le cylindre émerge, puis une brusque intumescence au moment où le cylindre plonge de nouveau.

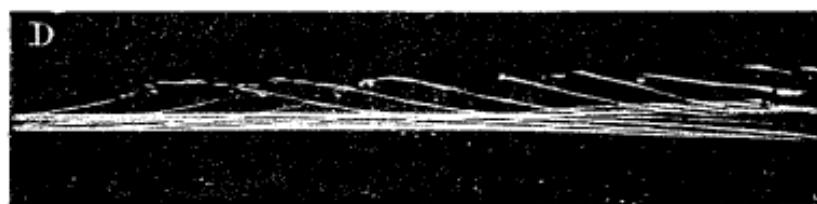


Fig. 64. — Onde animée de translation.

Cette intumescence chemine vers la gauche de la figure en diminuant peu à peu de hauteur. Des ondes plus petites interfèrent avec l'onde principale et marchent avec elle.

Comme le nombre des images était de 10 par seconde, on évaluera la vitesse de l'onde en mesurant d'après l'échelle métrique le chemin parcouru par sa crête pendant chaque $1/10$ de seconde.

Les ondes animées de translation donnent, à la Chronophotographie, des profils incomplets : le versant postérieur est le mieux marqué et parfois seul visible sur les images (1).

Mouvements intérieurs du liquide dans les ondes. —

On répand en grand nombre dans l'eau du canal les perles brillantes dont il a été question plus haut, et l'on reproduit les mouvements de clapotis ou de vagues. Les images montrent la trajectoire de ces perles dans les différentes parties de l'onde, et par conséquent les mouvements que font en ces points les molécules du liquide lui-même.

Sur la figure 65, on reconnaît, à son profil, l'onde de clapotis

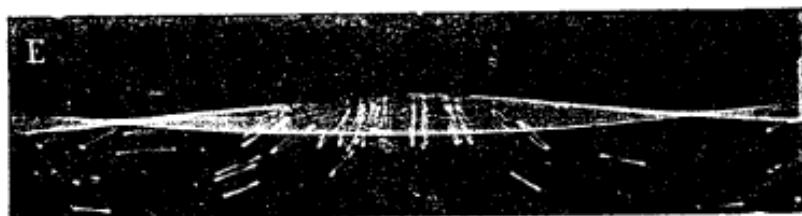


Fig. 65. — Mouvements des molécules à l'intérieur d'une onde de clapotis simple.

simple. A l'intérieur de cette onde les molécules oscillent, verticalement à la partie ventrale, horizontalement au niveau des nœuds, obliquement dans les positions intermédiaires.

Pour mieux suivre les caractères de ce mouvement, il faut recourir à un clapotis de période plus courte (fig. 66). On y voit comment les trajectoires des molécules se disposent suivant des courbes dont le centre est au nœud. C'est une confirmation des études analytiques de notre confrère Boussinesq.

Dans les ondes qui cheminent, les vagues et la houle, le mouvement intérieur des molécules est différent. Ainsi la figure 67 est une onde produite par une immersion brusque

(1) Il semble que, par l'effet du transport de l'onde, le ménisque capillaire s'efface du côté où l'onde progresse, c'est-à-dire sur le versant intérieur.

du cylindre dans le liquide. L'onde marchait de droite à gauche ; l'objectif a été ouvert en permanence.

Les molécules de la surface décrivent un arc de parabole dans un plan parallèle à la direction du transport de l'onde (1). Plus profondément dans le liquide, la courbe décrite est de

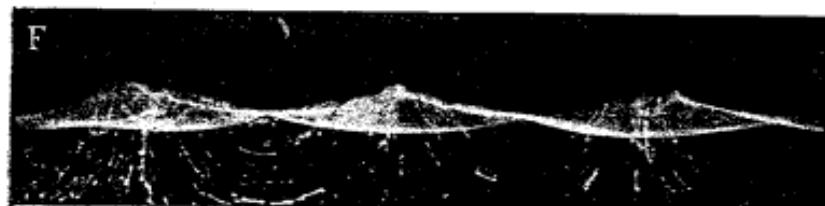


Fig. 66. — Mouvement des molécules dans une série d'ondes de clapotis à courte période.

moins en moins prononcée et finit par se réduire à un déplacement à peu près rectiligne.

Quand on imprime au cylindre un mouvement de va-et-vient comme dans l'expérience figure 67, les molécules décrivent à la surface du liquide des courbes fermées.

Dans toutes ces expériences, la nature de l'impulsion

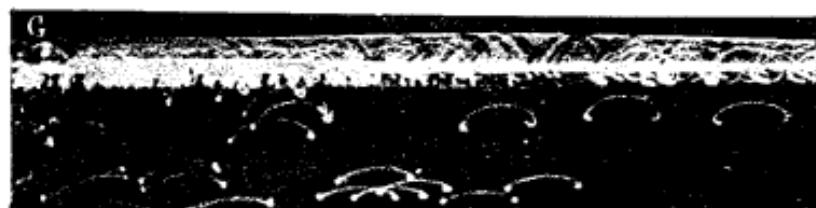


Fig. 67. — Mouvement intérieur des molécules dans une onde animée de translation.

donnée au liquide modifie tellement les caractères du mouvement, que pour obtenir des résultats précis il faudrait, au lieu d'agir avec la main, se servir d'un moteur mécanique pour donner à l'eau du canal l'impulsion initiale.

(1) Les petites perles qui flottent à la surface du canal donnent, dans l'image, leur trajectoire, sous deux aspects différents : tantôt c'est une ligne brillante, et tantôt une ligne sombre. Ce dernier effet, assez singulier au premier abord, tient à ce que les perles flottantes qui touchent la paroi de cristal interrompent la continuité du ménisque capillaire qui brille à la surface de l'eau ; leur présence y produit une tache obscure.

Courants et remous. — La forme annulaire du canal permet d'y faire naître des courants continus au moyen d'une petite hélice immergée dans l'eau, en un point éloigné de celui où le mouvement s'observe. Les petites perles brillantes participeront, en chaque point, au mouvement du liquide lui-même. Enfin, les images chronophotographiques, montrant les positions successives de ces points brillants à des instants connus, permettront de déterminer, dans les différentes régions du courant, la trajectoire et la vitesse des molécules liquides.

Dans la figure 68 on avait placé sur le trajet du courant un obstacle formé par une plaque de verre inclinée à 45°



Fig. 68. — Changements de vitesse et de direction des molécules liquides dans un courant qui rencontre un plan incliné.

environ. Cette plaque, maintenue à frottement entre les deux parois de cristal, ne présente que sa tranche à l'objectif chronophotographique. La plaque a été démasquée pendant 3 secondes ; la fréquence des images était de 42 par seconde ; le courant marchait de droite à gauche.

Si nous ne considérons d'abord que la trajectoire des différents filets liquides, nous voyons que ceux-ci arrivent sur l'obstacle avec des directions plus ou moins obliques et que, suivant la théorie d'Avanzini, il se fait un partage de ces filets près du bord inférieur du plan incliné.

En arrière de l'obstacle, les filets liquides exécutent des remous capricieux.

Quant à la vitesse des molécules en chaque région du canal, elle se déduit de l'écartement des images. Celles-ci, parfois confondues en une trajectoire continue, expriment la grande lenteur du courant ; d'autres fois, écartées les unes des autres,

elles permettent de mesurer d'après l'échelle métrique le chemin parcouru en $1/42$ de seconde, c'est-à-dire la vitesse absolue du courant.

Avec cette disposition il est facile de déterminer l'influence qu'exercent sur le partage des filets liquides l'inclinaison du plan et la vitesse du courant. On peut également déterminer comment se comportent les filets lorsqu'ils rencontrent des obstacles de différentes formes.

Ainsi, dans la figure 69, l'obstacle était formé par une caisse,



Fig. 69. — Effets produits sur un courant par l'immersion d'un solide en forme de parallélépipède rectangle.

en forme de parallélépipède rectangle, immergée dans le canal dont elle occupait toute la largeur. Les faces supérieure et inférieure de cette caisse étaient en verre pour laisser passer la lumière; le courant allait de gauche à droite.

Au-devant de la paroi verticale, les filets liquides se partagent, et leur vitesse s'accroît aussitôt qu'ils commencent à s'infléchir; ils passent à grande vitesse le long des bords de la caisse et vont former des remous en arrière.

Les figures 70 et 71 montrent comment le courant se comporte à la rencontre d'un corps pisciforme, c'est-à-dire d'un solide dont la coupe serait une sorte de fuseau inégalement effilé à ses deux extrémités (1).

(1) Ce solide immergé, devant laisser passer la lumière de bas en haut, était formé de deux joues d'ébonite dont le profil fusiforme est visible sur la figure 70; ces joues touchaient les parois du canal; entre elles, une lame transparente de celluloïde était courbée suivant leur contour, et soudée par ses bords à ceux des joues d'ébonite, de manière à former une cavité close. La transparence insuffisante de ces parois de celluloïde fait que les perles qui cheminent au-dessus de l'obstacle sont moins éclairées et cependant encore visibles dans les photogrammes.

Les expériences de ce genre éclairent le mécanisme de la natation des Poissons ; elles seront peut-être utiles aussi pour déterminer expérimentalement les formes de moindre résistance, soit pour les corps immergés dans un liquide en mouvement, soit pour ceux qui se meuvent dans un



Fig. 70. — Le courant rencontre un corps pisciforme par sa grosse extrémité.

liquide immobile. Ces conditions sont en effet réversibles, d'après la plupart des auteurs.

L'intensité des remous, qui constituent des pertes de force vive, peut être considérée comme un critérium des résistances que rencontrent les corps immergés dans un courant.



Fig. 71. — Le courant rencontre un corps pisciforme par son extrémité effilée.

Or, on voit que si le corps pisciforme présente au mouvement de l'eau son extrémité la plus obtuse (fig. 70), les veines fluides en suivent les parois en présentant le minimum de déviation. Mais si l'on renverse le sens du courant de façon que le liquide aborde le corps pisciforme par son extrémité la plus aiguë (fig. 71), le liquide, après avoir dépassé le maître-couple, formera des remous très prononcés.

Cette expérience confirme une opinion déjà émise au point de vue des avantages que présente la forme des Poissons. Ceux-ci rencontreraient dans l'eau très peu de résistance, parce que leurs formes d'arrière sont extrêmement effilées (1).

(1) La Chronophotographie nous paraît pouvoir s'appliquer à l'étude
MAREY. — Le Mouvement.

Quand le courant est lancé avec violence contre un obstacle situé près de sa surface, le liquide se soulève et retombe en cascade de l'autre côté. Ce phénomène fugitif, dont l'œil ne peut saisir les détails, est traduit dans toutes ses phases par la Chronophotographie. Ainsi la figure 72 montre, par les changements du niveau de l'eau, les phases successives de l'intumescence du liquide qui arrive sur l'obstacle; tandis que les perles brillantes traduisent le mouvement des molécules dans les couches profondes du canal.

Cette énumération sommaire des applications de la Chro-



Fig. 72. — Onde liquide franchissant un obstacle.

nophotographie à l'analyse des mouvements des liquides suffira pour montrer les ressources de cette méthode (2).

Oscillations et vibrations. — Dans les oscillations d'un pendule, la pesanteur agit, tour à tour, en sens inverses sur la masse suspendue, de sorte que cette masse présente des accélérations alternativement positives et négatives dont les phases, aujourd'hui bien connues, dépendent de l'action de la pesanteur à chaque instant. Il en est de même pour les mouvements vibratoires où la force élastique de la tige vibrante équivaut à l'action de la pesanteur dans les oscillations.

Mais, dans certains cas, les conditions du mouvement sont assez complexes pour qu'il soit difficile de prévoir l'os-

des mouvements de l'air et à montrer comment se comportent des corps légers et vivement éclairés placés dans un courant d'air plus ou moins rapide qui rencontrerait des obstacles de différentes formes.

(2) Les hydrauliciens pourront peut-être aussi recourir à la Chronophotographie pour contrôler sur certains points les théories des vagues et des courants, et même pour étudier l'action des différentes sortes de propulseurs, d'après le mouvement qu'ils impriment aux molécules du liquide dans lequel ils se meuvent.

cillation qui devra se produire : cela arrive pour les pendules articulés. De ce genre est le balancement alternatif de nos membres inférieurs dans la marche et dans la course, car pendant que la cuisse oscille autour de l'articulation de la hanche, la jambe oscille autour du genou et le pied autour de la cheville. Ces mouvements, qui se combinent entre eux et réagissent les uns sur les autres, donnent une

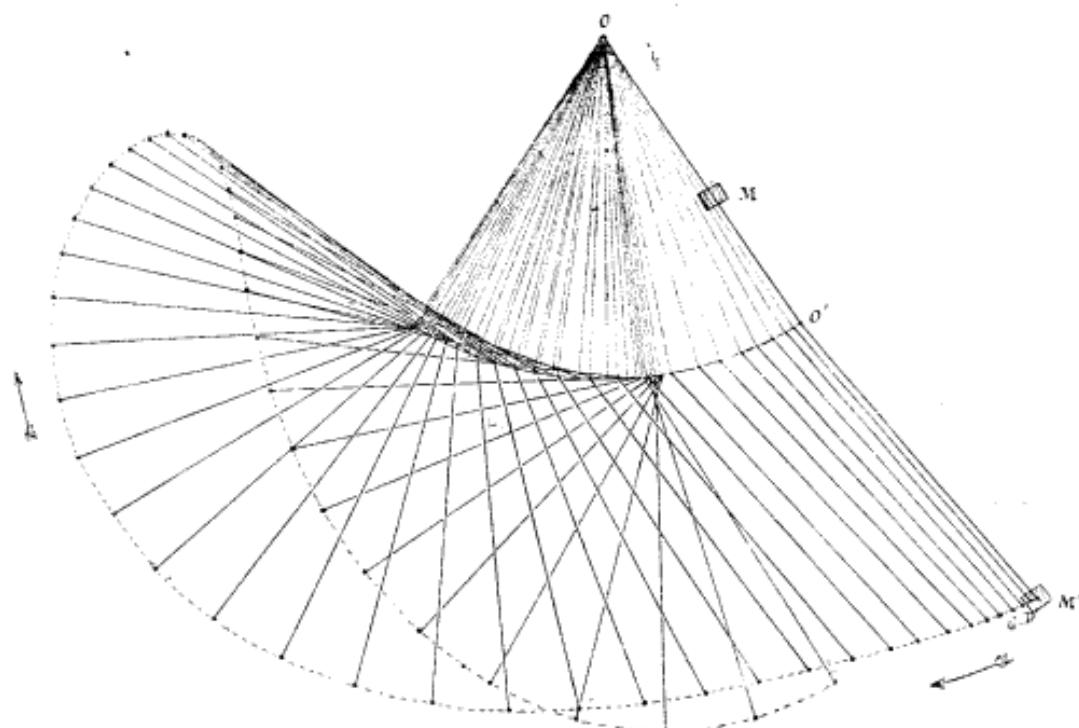


Fig. 73. — Pendule articulé ; une oscillation de droite à gauche suivie d'une demi oscillation de gauche à droite.

résultante extrêmement compliquée ; la figure 73 montre que la Chronophotographie en traduit tous les détails.

Vibrations des tiges flexibles. — Un officier très distingué de notre Armée, s'occupant de problèmes balistiques, désirait savoir si les vibrations transversales du canon d'un fusil se font sentir jusqu'à l'extrémité de l'arme. On professe, paraît-il que, dans ce genre de vibrations des tiges flexibles, les ventres et les nœuds sont également sensibles sur toute la longueur de la tige, et que les derniers éléments de celle-ci présentent une courbure.

L'expérience faite par la Chronophotographie sur une longue tige de sapin montre qu'il n'en est pas ainsi. On imprime à cette tige des vibrations transversales (fig. 74); or, après la formation du dernier nœud, l'extrémité libre de la tige est très sensiblement rectiligne.

Roulis des navires. — Le balancement des navires qu'on nomme le roulis est un phénomène fort complexe qui se compose de l'oscillation propre du bateau et des mouvements que lui impriment les vagues lorsque la mer est agitée. Si le calcul permet de prévoir approximativement les carac-

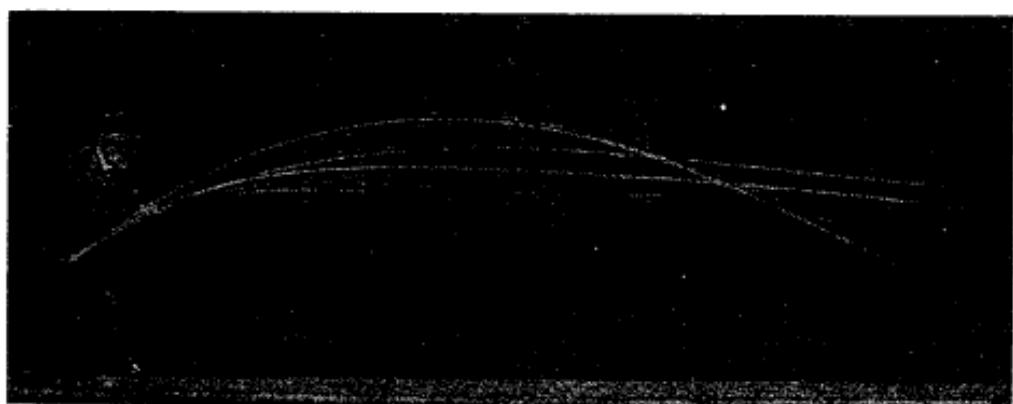


Fig. 74. — Vibrations d'une tige élastique de bois.

tères du mouvement du navire en eau calme, ceux qui se produisent sur une mer agitée ne peuvent être déterminés que par l'expérimentation. La Chronophotographie se prête fort bien à ces études.

Des essais sur des corps flottants, imitant grossièrement la forme de navires, nous ont montré qu'il est facile de déterminer le centre ou les centres instantanés du roulis.

En plaçant un petit modèle de bateau devant un champ obscur, et en disposant sur le mât des points brillants, on obtient par la Chronophotographie une série de lignes ponctuées dont chacune représente une des positions du mât dans les phases successives d'une oscillation de roulis. Or, si l'on mène des droites suivant ces lignes ponctuées, et si l'on prolonge ces droites jusqu'à ce qu'elles se coupent

au-dessous du niveau de l'eau, on détermine avec une précision parfaite l'intersection de ces lignes, c'est-à-dire le centre autour duquel l'oscillation du navire se fait à chaque instant.

Pour un corps cylindrique flottant, l'oscillation se fait autour de l'axe du cylindre ; mais pour les autres formes, et surtout si le flotteur est muni d'une quille, l'oscillation se fait autour de centres incessamment variables.

Un éminent ingénieur de notre Marine a fait avec nous quelques recherches sur le roulis, dans des conditions plus pratiques, sur de petits modèles de navires représentant les principaux types usités.

Les mêmes études pourront être faites encore plus utilement à la mer, sur des bâtiments dont les mâts portant des lampes électriques donneront leur image lumineuse dans l'obscurité de la nuit.

Vibrations des ponts métalliques. — M. Deslandres (1) vient de faire sur la résistance des ponts métalliques d'intéressantes expériences par la Stylographie et la Chronophotographie.

Il a obtenu les tracés des vibrations qu'éprouvent les travées de métal soumises à des ébranlements périodiques. Les graphiques montrent que, si le pas d'un Cheval attelé à une voiture a une cadence qui corresponde aux vibrations propres de la travée, celle-ci prend des vibrations dont l'amplitude va en croissant, à tel point que, dans un cas, la déformation du pont atteignit *treize* fois la valeur de celle que produisait, à l'état statique, le poids du même véhicule. Nous regrettons de ne pouvoir que mentionner ce remarquable travail.

Nous bornerons ici l'exposé des applications qu'on peut faire de la Chronophotographie à l'étude des phénomènes mécaniques ; le lecteur jugera sans doute, par les exemples qui précèdent, que ces applications pourront être extrêmement nombreuses.

(1) Deslandres, *Actions des chocs rythmés sur les ponts métalliques* Annales des Ponts et Chaussées. Déc. 1892).

CHAPITRE VII

CHRONOPHOTOGRAPHIE SUR PLAQUE MOBILE

Principes et historique de la méthode.

SOMMAIRE. — Revolver astronomique de Janssen. — Expériences de Muybridge : champ lumineux ; appareils photographiques disposés en série ; déclenchement électrique des obturateurs. — Fusil photographique ; disposition intérieure de l'instrument ; manière de changer les plaques sensibles. — Principes de la Chronophotographie sur plaque mobile. — Emploi du Chronophotographe. — Nécessité des arrêts de la pellicule au moment de chaque pose. — Choix de l'instant où l'on veut prendre les images. — Forme et dimension des images. — Réglage du nombre et de la dimension des images. — Reproduction, agrandissement et réduction des images chronophotographiques.

Depuis son invention, la Photographie sert à comparer, au moyen d'images authentiques, le présent avec le passé. Sur une série de portraits pris à différentes époques, chacun suit les changements que l'âge a apportés dans les traits de son visage ; un ingénieur surveille de loin l'avancement des travaux d'un chantier, un agronome la culture de ses champs.

Mais c'est M. Janssen qui le premier, dans un but scientifique, imagina de prendre automatiquement une série d'images photographiques pour représenter les phases successives d'un phénomène. C'est donc à lui que revient l'honneur d'avoir inauguré ce qu'on appelle aujourd'hui la *Chronophotographie sur plaque mobile*.

Il s'agissait de déterminer les positions successives de la

planète Vénus à différents instants de son passage sur le disque du soleil. Notre savant confrère créa pour cet usage son *Revolver astronomique*, dans lequel une plaque sensible de forme circulaire se déplaçait, de temps en temps, d'un an-

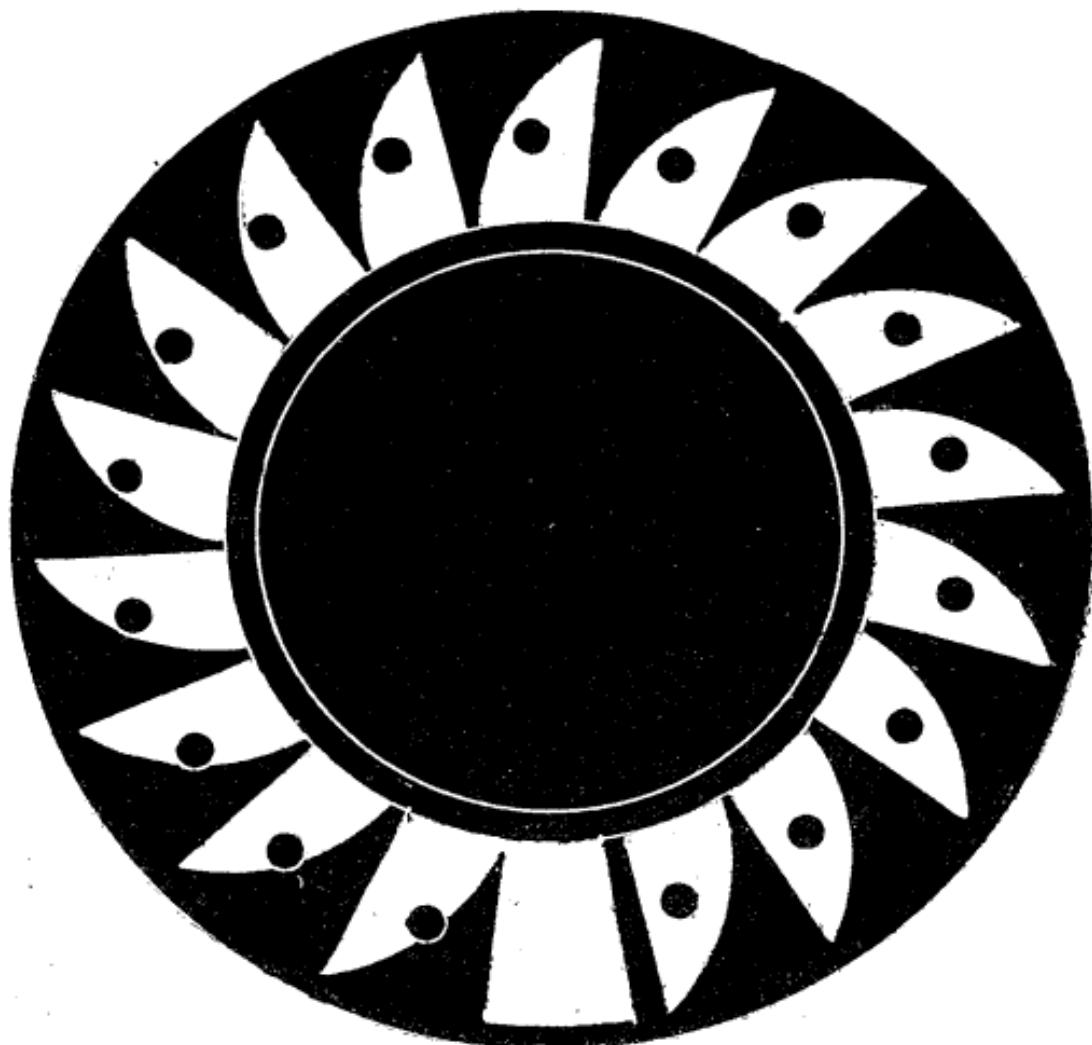


Fig. 75. — *Fac-simile* positif d'une plaque photographique obtenue avec le Revolver astronomique pour le passage de la planète Vénus sur le Soleil, le 8 décembre 1874 (dessin de M. Janssen).

gle de quelques degrés, et recevait, chaque fois, une image nouvelle sur un point différent de sa surface.

La figure 75 montre une série d'épreuves disposées en couronne et représentant les positions successives de la planète sur le disque du Soleil à des intervalles de 70 secondes environ.

Sur cette image on voit la silhouette obscure de la planète se détacher sur un champ clair formé par une partie de la surface du Soleil. Le disque de Vénus qui, dans la première image, déborde le limbe solaire, est en contact avec lui dans la troisième.

M. Janssen a également proposé d'appliquer les photogrammes successifs à l'étude de la locomotion animale (1).

Il appartenait à M. Muybrige de San-Francisco de réaliser par une méthode assez différente de celle de Janssen l'analyse de la locomotion du Cheval, de l'Homme et de certains animaux.

Méthode et appareils de M. Muybrige. — M. Stanford, ancien gouverneur de la Californie, pensa que la Photographie pourrait saisir les attitudes du Cheval dans ses différentes allures et entreprit de faire faire des expériences à ce sujet. Il eut la bonne fortune de confier ce travail à M. Muybrige qui obtint, dans la Photographie des allures, le succès le plus complet. La description de ces expériences a été donnée

(1) Voici comment notre confrère s'exprimait en 1878 : « La propriété du Revolver, de pouvoir donner automatiquement une série d'images nombreuses et aussi rapprochées qu'on veut, d'un phénomène à variations rapides, permettra d'aborder des questions intéressantes de mécanique physiologique se rapportant à la marche, au vol, aux divers mouvements des animaux. Une série de photographies qui embrasserait un cycle entier des mouvements relatifs à une fonction déterminée fournirait de précieuses données pour en éclairer le mécanisme. »

« On comprend, par exemple, tout l'intérêt qu'il y aurait, pour la question encore si obscure du vol, à obtenir une série de photographies reproduisant les divers aspects de l'aile durant cette action. La principale difficulté viendrait actuellement de l'inertie de nos substances sensibles, eu égard aux durées si courtes d'impression que ces images exigent ; mais la science lèvera certainement ces difficultés.

« A un autre point de vue, on peut dire aussi que le revolver résout le problème inverse du phénakistoscope. Le Phénakistoscope de M. Plateau est destiné à produire l'illusion d'un mouvement ou d'une action au moyen de la série des aspects dont ce mouvement ou cette action se compose. Le Revolver photographique donne, au contraire, l'analyse d'un phénomène en reproduisant la série de ces aspects élémentaires. (*Bulletin de la Société française de Photographie*, n° du 14 déc. 1876.)

dans un ouvrage publié sous les auspices de M. Stanford par le docteur Willmann (1).

Le champ d'expérience était formé (fig. 76) d'une piste passant au-devant d'un écran blanc incliné et orienté de

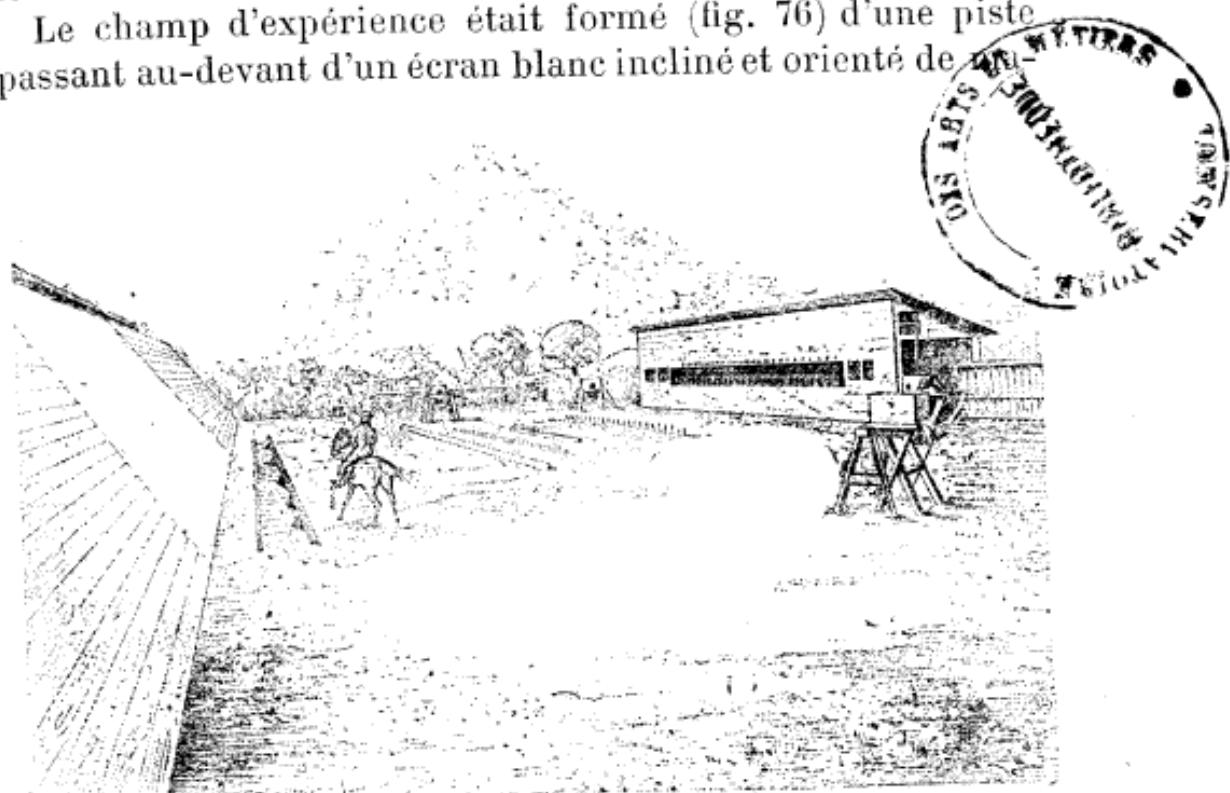


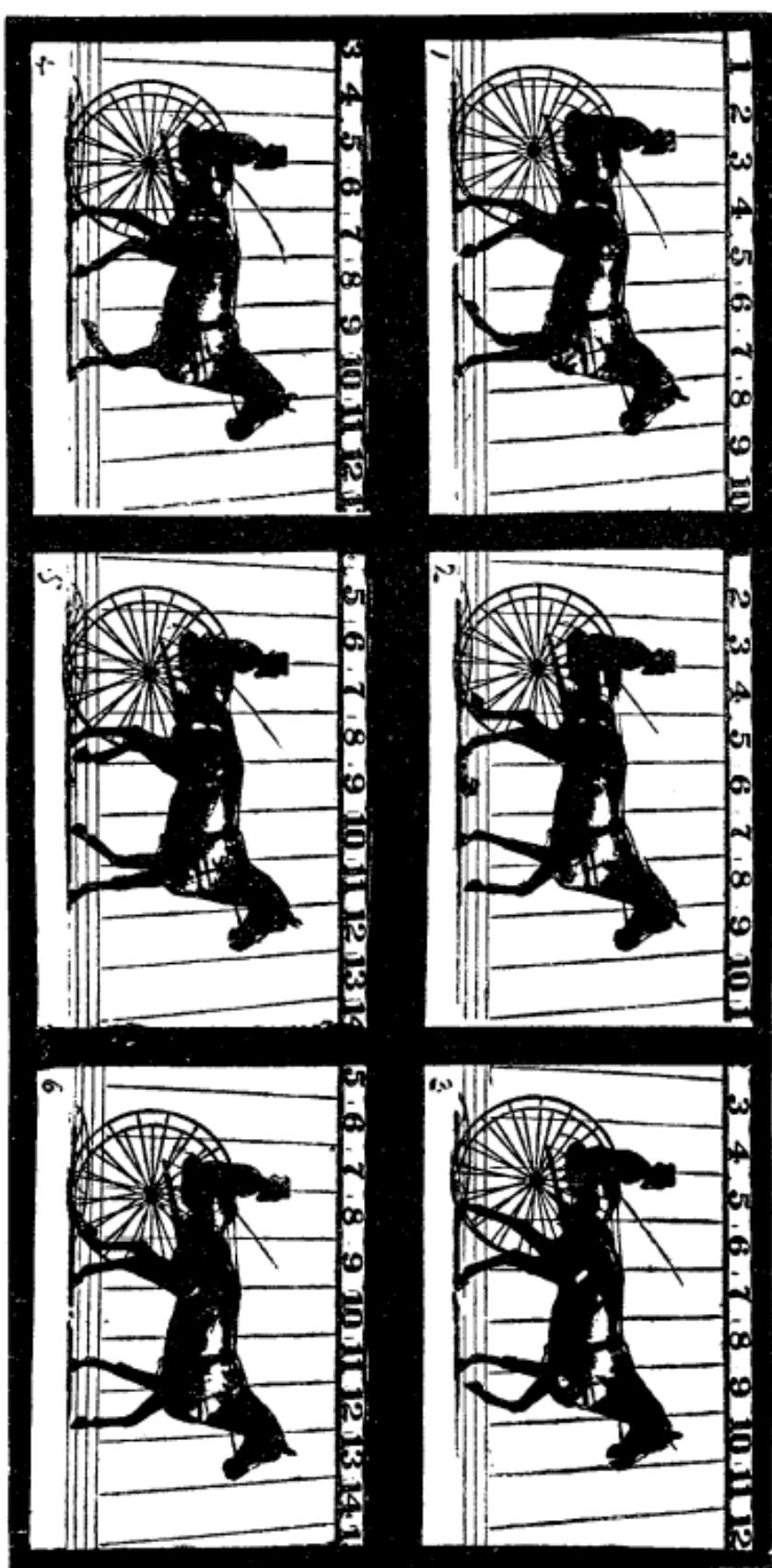
Fig. 76. — Champ d'expériences établi par M. Muybridge. A gauche, l'écran incliné qui réfléchit la lumière solaire et devant lequel passe le Cheval ; à droite, la série des appareils photographiques. — D'autres appareils montés sur des tréteaux servent à obtenir des images simultanées du Cheval vu sous différents angles.

nière à réfléchir la lumière solaire dans la direction des appareils photographiques. Sur l'écran étaient tracées des divisions équidistantes qui, se reproduisant dans chacune des images, servaient à mesurer les distances parcourues par le cheval.

Une série d'appareils photographiques étaient braqués, en face de la piste, sur les différents points de sa longueur. Des fils électriques, tendus en travers de la piste, se rendaient à des électro-aimants dont chacun maintenait fermé l'obturateur de l'un des appareils photographiques. Le Cheval, en passant sur la piste, rompait successivement

(1) *The Horse in Motion*, as shown by instantaneous Photography. In-4°, London, Turner and Co, 1882.

PHOTOGRAMMES INSTANTANÉS SUCCESSIFS DE M. MUYBRIDGE.



LE MOUVEMENT.

106

Fig. 77. — Six images successives d'un Cheval au pas ; la première image est en haut et à gauche. Vitesse du pas, d'après Muybridge : l'intervalle qui sépare les divisions verticales tracées sur l'écran est de 0^m,8 ; ces repères servent à déterminer la vitesse de translation du Cheval et à mesurer l'étendue des mouvements de ses membres. (Figure tirée du journal *la Nature*.)

ces fils et provoquait l'ouverture instantanée des appareils, dont chacun prenait l'image de l'animal dans l'une de ses attitudes successives. La figure 77 montre une série de ces photographies instantanées.

Ces admirables expériences ont fixé bien des points de la théorie des allures du Cheval sur lesquels il y avait de grandes divergences d'opinion, même parmi les hommes spéciaux. En effet, les figures de Muybridge permettent d'apprécier les déplacements successifs des membres du Cheval et les positions de son corps aux instants correspondants. Ces déplacements se mesurent au moyen des divisions tracées sur l'écran. Ainsi, dans la première image de la figure 77 la tête du Cheval est comprise dans l'espace qui porte le n° 8; la seconde image la montre dans l'espace 9; les images suivantes dans les espaces 10 et 11, etc. Pendant ce temps, chacun des membres change d'attitude. Dans un album que M. Muybridge nous a gracieusement offert, on trouve la représentation de toutes sortes d'allures du Cheval et celles de différents animaux : Bœufs, Cerfs, Chiens, Porcs, etc. Ailleurs sont des coureurs, des sauteurs, des lutteurs dont les silhouettes, recueillies instantanément, montrent des attitudes fort intéressantes au point de vue de la représentation artistique des mouvements de l'Homme (1).

Le Fusil photographique. — Dès l'apparition de la Photographie instantanée, il nous sembla que les mouvements de l'Oiseau qui vole pouvaient être analysés par cette méthode. Nous priâmes donc M. Muybridge d'appliquer ses appareils à l'étude du vol des Oiseaux; il s'empressa de satisfaire à cette demande et, quand il vint à Paris en

(1) Dans ces premiers travaux M. Muybridge ne se servait encore que de plaques au collodion humide; la découverte du gélatino-bromure d'argent lui a permis, plus récemment, de poursuivre ses études dans des conditions plus parfaites et de publier de magnifiques planches d'animaux en mouvement.

Dans ces dernières années, M. Ottomar Anschütz (de Lissa) a obtenu par la méthode de Muybridge de très belles séries photographiques montrant l'Homme et les animaux en mouvement.

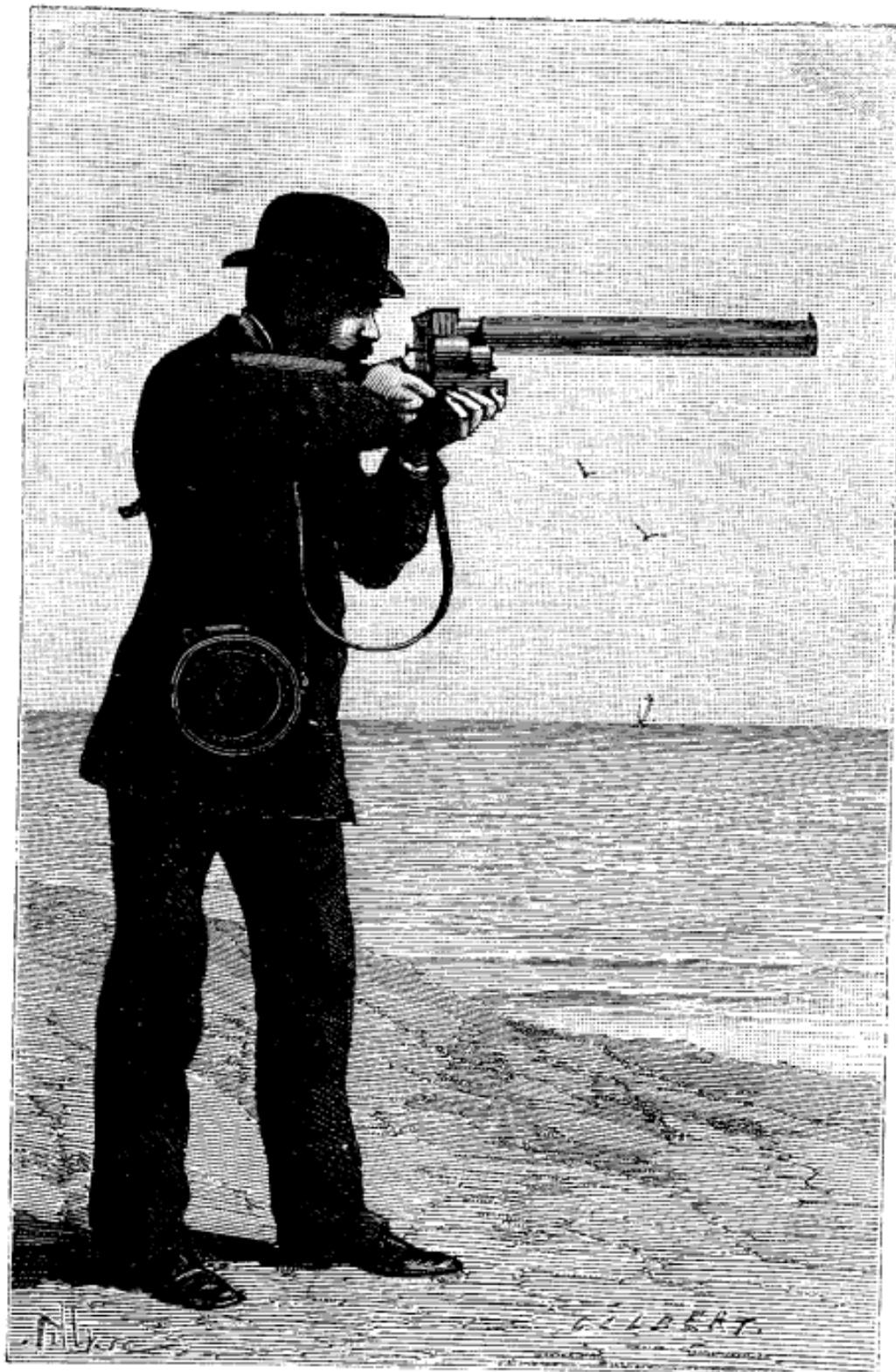


Fig. 78. — Le Fusil photographique.

août 1881, nous apporta plusieurs clichés de Pigeons photographiés en 1/500 de seconde.

Dans ces images, où plusieurs Oiseaux étaient figurés s'en-volant à la fois, chacun d'eux se trouvait dans une attitude particulière : l'un avait les ailes élevées, l'autre les portait en avant, un autre les abaissait. Ces attitudes nous parurent coïncider assez exactement avec celles que nous avaient fait prévoir certaines études faites par la Méthode graphique sur le mécanisme du vol (1).

Mais, outre que la netteté de ces images n'était pas suffisante, il leur manquait ce qui donne tant d'intérêt à celles du Cheval en mouvement, la disposition en série montrant les attitudes et les positions successives de l'animal. C'est qu'en effet il n'est pas possible d'appliquer au vol libre de l'Oiseau, la méthode qui avait si bien réussi pour le Cheval et, qui consistait à faire provoquer par l'animal lui-même l'ouverture d'une série d'appareils photographiques.

Nous entreprimes alors de réaliser un appareil basé sur le principe de celui de M. Janssen, mais capable de donner une série d'images à des intervalles de temps très courts (1/12 de seconde, au lieu des 70 secondes qui séparaient les images du Revolver astronomique), afin de saisir les phases successives du mouvement de l'aile. Cet instrument, en forme de fusil, permet de viser l'Oiseau et de le suivre dans son vol. Au moment où l'on presse la détente, la plaque sensible reçoit une image, puis se met en mouvement, s'arrête encore pour recevoir une autre image, et ainsi de suite, s'arrêtant à chaque fois que l'obturateur tournant laisse arriver la lumière sur la plaque sensible. Le Fusil photographique est représenté figure 79 (2).

(1) *La Méthode graphique*, p. 211.

(2) Voici les détails de la construction : Le canon du fusil est un gros tube noir ci (fig. 79) qui renferme un objectif photographique. En arrière, et solidement montée sur la crosse, est une large culasse cylindrique dans laquelle est contenu un rouage d'horlogerie ; l'axe du barillet se voit extérieurement en B. Quand on presse la détente du

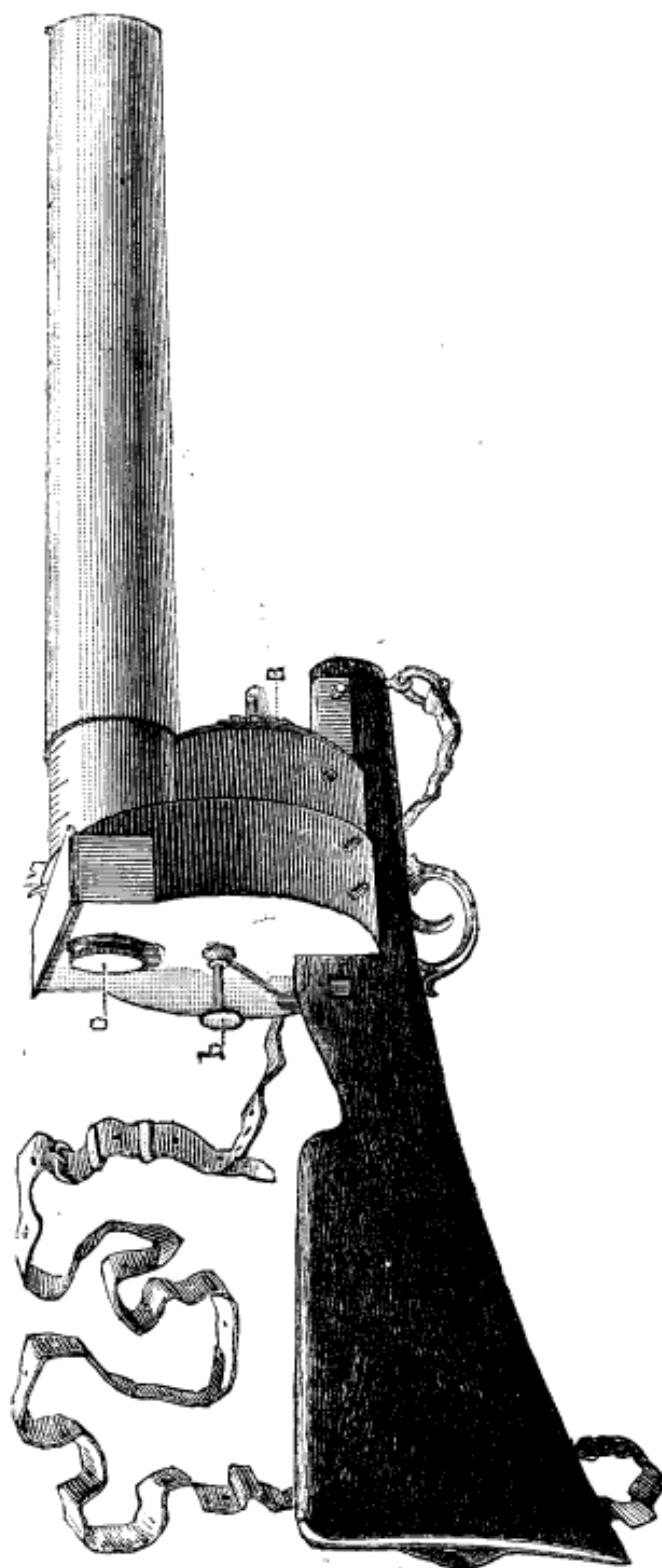


Fig. 79. — Aspect extérieur du Fusil photographique.

Les glaces au gélatino-bromure d'argent qui reçoivent les images sont taillées au diamant, soit en

fusil, le rouage se met en marche et imprime aux différentes pièces de l'instrument le mouvement nécessaire. Un axe central, qui fait douze tours par seconde, commande toutes les pièces de l'appareil. C'est d'abord (fig. 80) un disque de métal opaque et percé d'une étroite fenêtre ; ce disque forme obturateur et ne laisse pénétrer la lumière émanant de l'objectif que douze fois par seconde, et chaque fois pendant $1/720$ de seconde. Derrière ce premier disque, tournant librement et sur le même arbre, s'en trouve un autre qui porte douze fenêtres et en arrière duquel vient s'appliquer la glace sensible, de forme circulaire ou octogonale. Ce disque fenestré doit tourner d'une manière intermittente, de façon à s'arrêter douze fois par seconde en face du faisceau de lumière qui pénètre dans l'in-

forme de disque, soit en octogones comme on le voit sur la

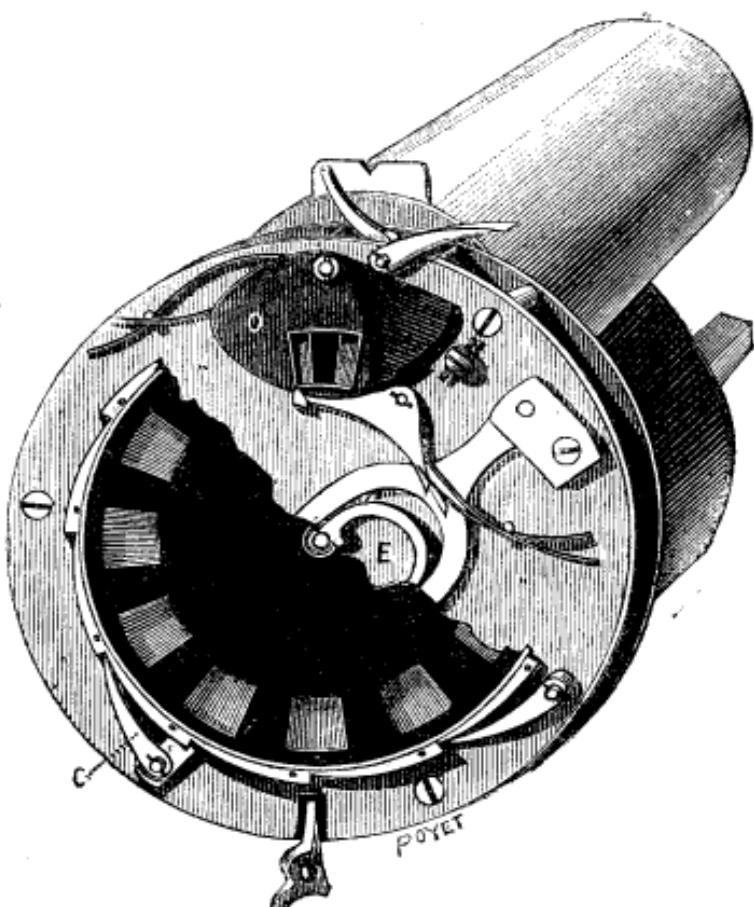


Fig. 80. — Détails intérieurs du Fusil photographique.

figure 82 où sont représentées à des intervalles de 1/12 de seconde les attitudes successives d'une Mouette qui vole.

trument. Un excentrique E placé sur l'arbre produit cette rotation saccadée, en imprimant un va-et-vient régulier à une tige munie d'un cliquet C qui saisit, à chaque oscillation, une des dents formant une couronne au disque fenêtré.

Un obturateur spécial O arrête définitivement la pénétration de la lumière dans l'instrument aussitôt que les douze images ont été obtenues. D'autres dispositions ont pour but d'empêcher la plaque sensible de dépasser par sa vitesse acquise la position où le cliquet l'amène, et où elle doit être parfaitement immobile pendant la durée de l'impression lumineuse. Un bouton de pression b (fig. 79) appuie énergiquement sur la plaque dès que celle-ci est introduite dans le fusil. Sous l'influence de cette pression, la plaque sensible adhère à la face postérieure de la roue

Ces petites images, agrandies par projection, donnent de curieux détails sur la position des ailes, sur la torsion des rémiges par la résistance de l'air, ainsi qu'on le voit sur la figure 83; mais, dans la plupart des cas, ces images sont trop petites et incapables de supporter un agrandissement suffis-

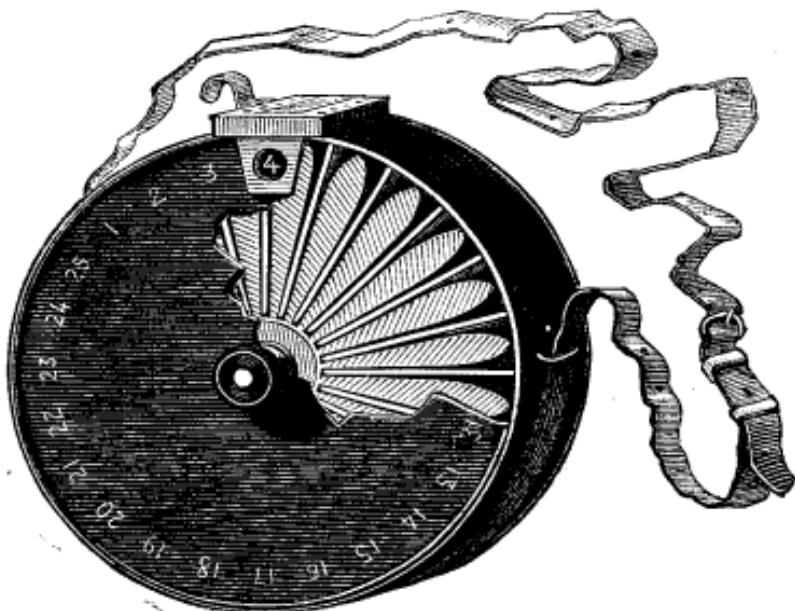


Fig. 81. — Boîte à *escamoter* contenant les plaques photographiques.

sant. Pour avoir des images de plus grandes dimensions, certains auteurs, entre autres M. Londe et le général Sébert, ont construit des appareils munis d'objectifs multiples dont les obturateurs s'ouvrent successivement. Mais la multiplicité des objectifs présente de sérieux inconvénients. Outre qu'elle rend l'instrument fort coûteux si l'on emploie des objectifs de bonne qualité, elle donne des images qui, prises de points de vue différents, ne sont pas comparables entre elles quand on photographie, d'une faible distance, des objets de petites dimensions.

fenêtrée qui est recouverte de caoutchouc pour éviter les glissements.

On fait la mise au point en allongeant ou en raccourcissant le canon, ce qui déplace l'objectif en avant ou en arrière; enfin on vérifie cette mise au point en observant au microscope, par une ouverture *o* (fig. 82) faite à la culasse du fusil, la netteté de l'image sur un verre dépoli.

En effet, dans ces appareils, les divers objectifs *voient*, si l'on peut ainsi dire, l'objet sous des incidences différentes. Or, ces changements de perspective, s'ils ont peu d'inconvénients quand on opère sur des objets éloignés et de grandes dimensions, ne permettraient pas d'étudier des objets de

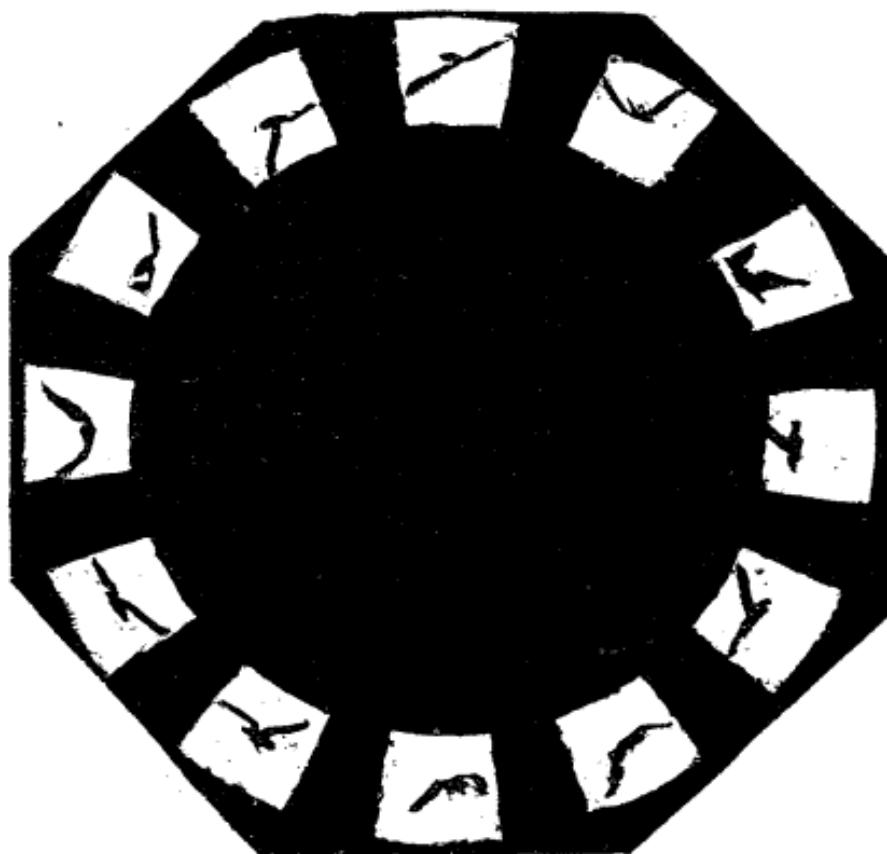


Fig. 82. — Photographie d'une Mouette pendant son vol. Reproduction par l'héliogravure, d'un cliché obtenu à l'aide du Fusil photographique.

petite taille qui doivent être observés de près (1); à plus forte raison ne se prêtent-ils pas à photographier les êtres microscopiques. C'est pourquoi nous avons résolu de n'employer qu'un seul objectif.

Afin de simplifier le matériel instrumental, on a réuni dans un seul appareil les conditions nécessaires pour pratiquer, suivant le besoin, la Chronophotographie sur plaque

(1) Voir chap. v, p. 80.

fixe ou sur plaque mobile, et pour varier à volonté la fréquence des images ainsi que la durée des temps de pose.

Principes de la Chronophotographie sur plaque mobile.

— Les défauts du Fusil photographique tenaient, pour la plupart, à ce que les images étaient recueillies sur une plaque de verre dont le poids était trop grand. L'inertie d'une pareille masse, qui devait à chaque instant se mouvoir puis s'arrêter, limitait forcément le nombre des images ; le maximum en était de 12 par seconde, encore fallait-il les faire très petites pour ne pas donner au disque de verre trop de surface et par suite une masse trop grande. On supprima ces inconvénients en substituant au disque de verre une



Fig. 83. — Agrandissement d'une des images obtenues avec le Fusil photographique.

bande de pellicule extrêmement légère sensibilisée au gélatino-bromure d'argent.

Cette bande de pellicule, animée d'une translation rectiligne, devra passer au foyer de l'objectif, s'arrêter pendant chaque pose, et cheminer automatiquement d'une manière saccadée, en recevant une série d'images successives d'assez grandes dimensions. Le format que nous avons choisi est de 9 centimètres en carré; c'est précisément la mesure adoptée pour les appareils à projections qui agrandissent ces images dans les proportions convenables. Enfin, comme la bande pelliculaire peut avoir plusieurs mètres de long, le nombre des images qu'on recueillera est pour ainsi dire illimité.

Disposition du Chronophotographe. — Les organes nécessaires pour prendre les images successives sur une bande pelliculaire sont réunis, avons-nous dit, dans l'appareil que le lecteur connaît déjà. L'arrière-corps de cet appareil porte à sa partie postérieure un compartiment

spécial, la *chambre aux images*, où chemine la pellicule sensible. Pour y faire arriver la lumière, il suffit de substituer au châssis qui renfermait la plaque fixe un autre châssis

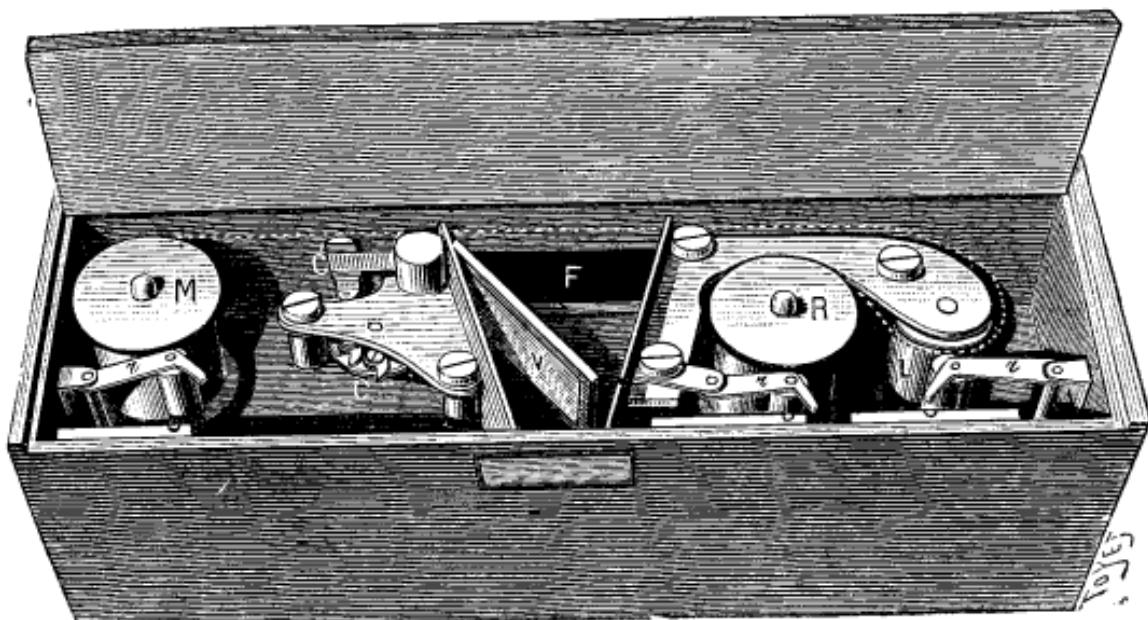


Fig. 84. — Disposition intérieure de la chambre aux images.

(fig. 85) percé d'une fenêtre à ouverture variable; c'est la *fenêtre d'admission*. A chaque éclairement, la lumière

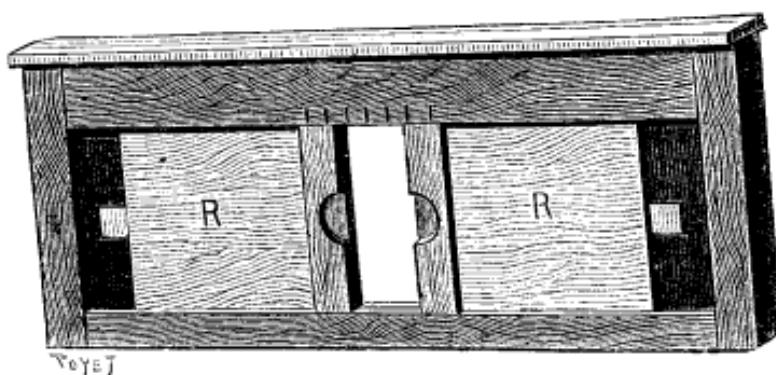


Fig. 85. — Fenêtre d'admission se substituant au chassis négatif lorsqu'on opère sur une pellicule qui se déroule. La largeur de la fenêtre se règle par le glissement des rideaux R R, suivant la dimension que doit avoir l'image.

traverse cette fenêtre et va former une image sur la pellicule mobile préalablement mise au point. La pellicule se déroule d'un mouvement saccadé, sous l'action d'un

rouage qui la fait passer d'une bobine sur une autre.

La disposition de ces *bobines* nous occupera tout d'abord,

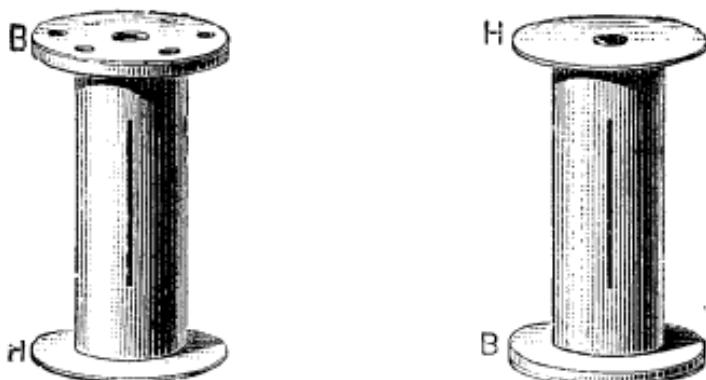


Fig. 86. — Deux bobines de métal destinées à l'enroulement de la pellicule sensible. Ces bobines sont orientées en sens contraire l'une de l'autre ; les lettres H et B indiquent sur chacune d'elles le haut et le bas.

car elles constituent l'organe essentiel qui permet de charger ou de décharger l'appareil en pleine lumière.

Les bobines (1) (fig. 86) ont 9 centimètres de hauteur.

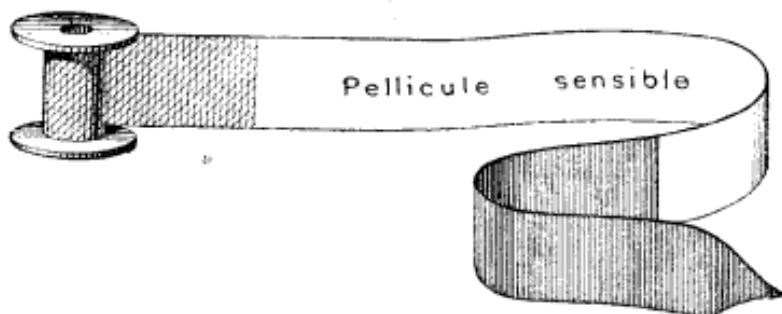


Fig. 87. — Montrant comment la pellicule se prolonge, à ses deux extrémités, par des bandes de papier opaque.

Sur l'une de ces bobines qui sert de magasin on enroule la pellicule sensible dont les deux extrémités sont conti-

(1) Les *bobines* sont faites de métal. Deux fonds, l'un supérieur, mince, l'autre inférieur, épais, sont soudés aux deux bouts d'un cylindre métallique léger. Un tube intérieur, qui joint les deux fonds, permet d'enfiler la bobine sur une broche verticale fixée à l'intérieur de la chambre. Une couronne de petits trous percés dans le fond inférieur de la bobine sert à son entraînement : quand une cheville implantée dans un plateau tournant pénétrera dans l'un de ces trous, le plateau entraînera la bobine dans son mouvement rotatif.

nuées par des bandes ou queues de papier opaque terminées en pointes. L'une de ces pointes s'engage (fig. 87) dans une fente longitudinale percée à travers le noyau de la bobine et l'on procède à l'enroulement. D'abord on enroule la première queue de papier, puis la pellicule sensible qui lui est adhérente, et enfin la seconde queue de papier. Un lien de caoutchouc appliqué autour de la bobine maintient cet enroulement bien serré. Cette préparation se fait dans le laboratoire photographique, mais une fois qu'elle est terminée on peut porter en pleine lumière la bobine ainsi chargée, car la pellicule sensible est abritée par une série d'enroulements du papier opaque.

Changement de l'appareil. — Quand on ouvre la chambre aux images on y voit (fig. 84) deux broches verticales : celle de gauche recevra la bobine-magasin que l'on connaît déjà

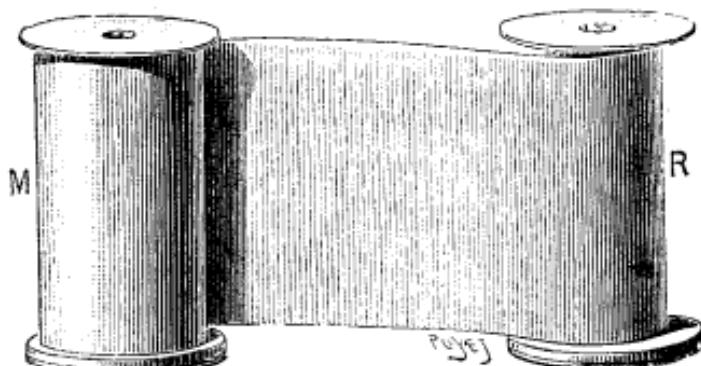


Fig. 88. — Bobine magasin chargée, M ; on déroule l'extrémité de la bande de papier qui la recouvre pour l'enrouler en sens contraire sur la bobine réceptrice R.

et dont le chargement vient d'être décrit; la broche de droite recevra la bobine réceptrice, c'est-à-dire celle sur laquelle passera la pellicule, à mesure qu'elle aura reçu les images. Pour que ce passage s'opère, il faut que l'extrémité de la bande de papier qui recouvre la bobine-magasin soit engagée sur la réceptrice. Le sens de l'enroulement est représenté figure 88. Les deux bobines étant alors enfilées sur leurs broches respectives, on engage la bande de papier dans une rainure verticale où elle passera tout à l'heure, entraînant

à sa suite la pellicule sensible. Deux rouleaux compresseurs (*rr*, fig. 84) s'appliquent alors sur les bobines pour y assurer la régularité de l'enroulement et du déroulement.

Nous n'insisterons pas sur la description des organes qui produisent le mouvement saccadé de la pellicule; la disposition nouvelle que nous avons donnée à l'appareil, pour en rendre la marche plus sûre et l'emploi plus facile, diffère notablement de celle que nous avons antérieurement décrite (1). Du reste, mieux que toute description, quelques essais, faits au moyen d'une bande de papier simple au lieu de pellicule sensible, permettent à l'opérateur d'acquérir bien vite l'habitude de charger les bobines et de les faire passer dans la chambre aux images.

Une manivelle placée à l'arrière du Chronophotographe met en marche tous les rouages de l'instrument, ainsi que les disques obturateurs. Ce mouvement extrêmement rapide doit nécessairement être continu, car on ne saurait, comme dans le Fusil photographique, arrêter et remettre en marche ces masses pesantes. C'est la pellicule toute seule qui s'arrête au moment de chaque pose, pincée par un organe spécial qui la laisse libre aussitôt que l'image est prise.

Nécessité des arrêts de la pellicule au moment de chaque pose. — Quelques personnes ont cru que, dans la construction assez compliquée à laquelle nous avons eu recours pour obtenir les arrêts de la pellicule, nous nous étions donné une peine inutile, et l'on a dit que, pour des éclairements très courts, la translation de la pellicule sensible était négligeable.

Il serait facile de prouver par le calcul que, pendant la durée d'un éclairement, soit $1/1000$ de seconde, la pellicule progresse d'une quantité suffisante pour enlever aux images la netteté qui en fait toute la valeur. Mais il est plus simple, et plus convaincant peut-être, de montrer par une expérience que, sans les arrêts, on n'obtient pas de bonnes images.

(1) *Revue générale des Sciences*, 15 novembre 1891.

En supprimant, une fois sur deux, les arrêts de la pellicule au moment de la pose, nous avons obtenu une série d'images alternativement *foues* et nettes. La figure 89 représente deux de ces images consécutives; leur différence



Fig. 89. — Deux images successives obtenues sur la bande pelliculaire : l'image de gauche sans arrêt de la bande au moment de l'admission de la lumière ; celle de droite avec arrêt de la bande.

de netteté est assez manifeste pour qu'il soit inutile d'insister sur la nécessité de l'arrêt pendant la pose.

Choix de l'instant où l'on veut prendre les images.

— Quand le Chronophotographe est braqué sur le sujet dont on veut étudier les mouvements, on met le rouage en marche en tournant une manivelle; les différentes pièces acquièrent leur vitesse uniforme, mais la pellicule reste immobile jusqu'au moment où se produira le phénomène qu'on veut saisir. A cet instant, l'opérateur presse sur une *gâchette*; aussitôt la pellicule se met en marche et les images se prennent jusqu'au moment où, en cessant de presser sur la gâchette, on provoque l'arrêt de la pellicule. L'emploi de cette gâchette permet donc, au besoin,

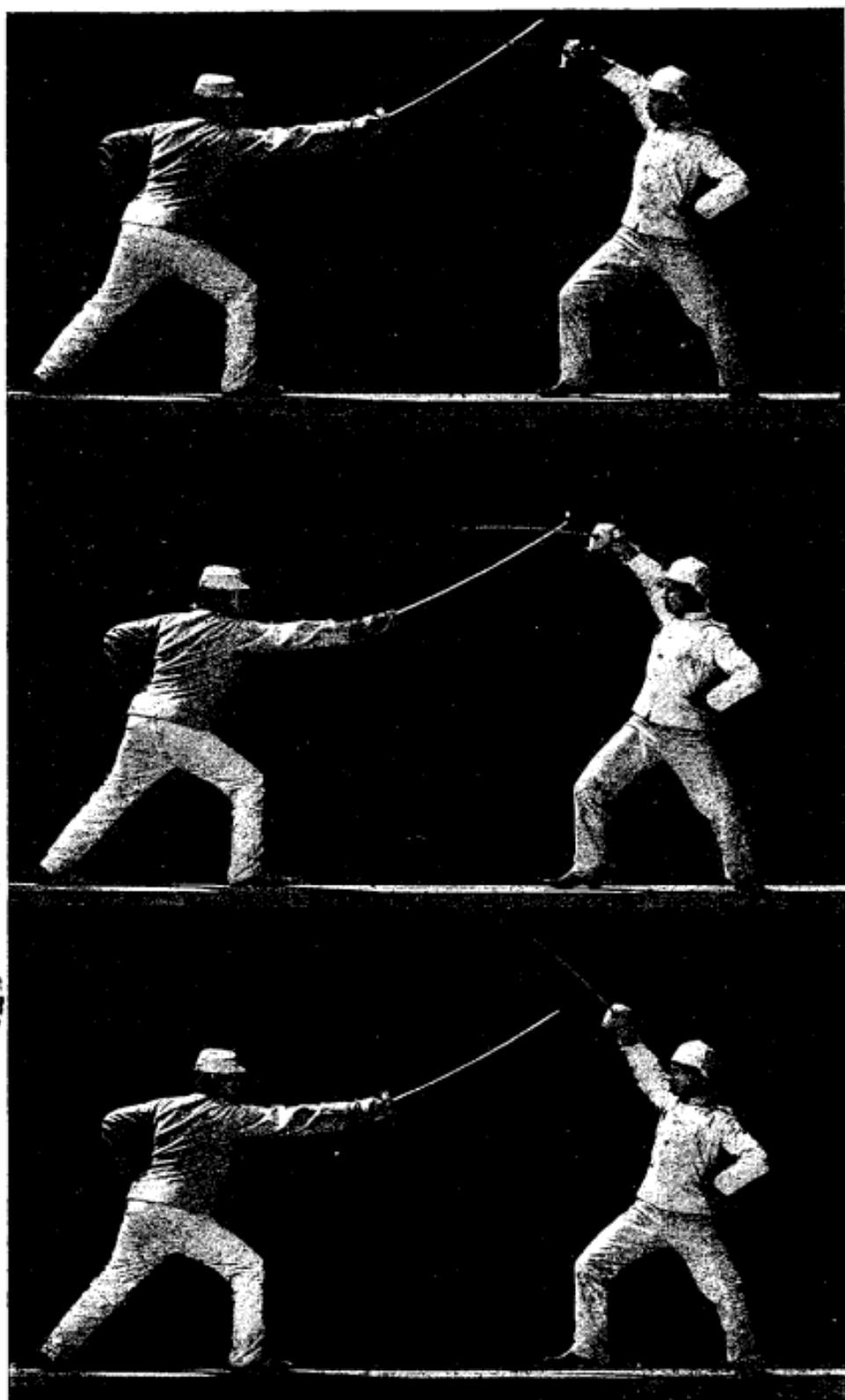


Fig. 90. — Escrime au sabre (la succession des images se lit de bas en haut).

de fractionner la prise des images jusqu'à épuisement de la pellicule dont la bobine était chargée.

Forme et dimensions des images. — Suivant la nature du sujet, la forme et les dimensions de l'image photographique doivent changer, afin d'utiliser le mieux possible la surface de pellicule employée. A cet effet, on règle suivant le besoin l'ouverture de la fenêtre d'admission et l'on change la position de l'appareil.

Ainsi, l'image d'un Homme debout exécutant des mouvements sur place peut être contenue sur une surface plus haute que large, tandis que deux Hommes faisant de l'escrime (fig. 90) exigeront au contraire une fenêtre plus large que haute. Il en est de même (pl. II) pour la succession des mouvements de rameurs. Ce réglage du champ de l'image se fait en resserrant plus ou moins l'ouverture de la fenêtre d'admission. Il faut en outre, quand les images ont leur plus grande dimension dans le sens transversal, coucher l'appareil sur le côté. La succession des attitudes se lit alors de bas en haut comme dans la figure 90.

Réglage du nombre et de la dimension des images. — La marche de la pellicule étant uniforme, et donnant par exemple dix grandes images par seconde, on peut, si cela est nécessaire avoir, dans le même temps, soit vingt images de largeur deux fois moindre, soit trente images de largeur trois fois moindre, etc. Il faut pour cela, d'abord réduire la largeur de la fenêtre d'admission à la moitié ou au tiers de sa largeur normale ; il faut en outre que les disques obturateurs produisent, dans le même temps, des éclairements deux fois ou trois fois plus nombreux. A cet effet, les fenêtres de ces disques portent des rideaux qui permettent de les ouvrir ou de les fermer à volonté (1).

(1) Dans la disposition que nous avions adoptée autrefois, il fallait aussi, par une manœuvre assez délicate, régler le nombre des arrêts de la pellicule. Cette manœuvre est supprimée dans la disposition nouvelle.

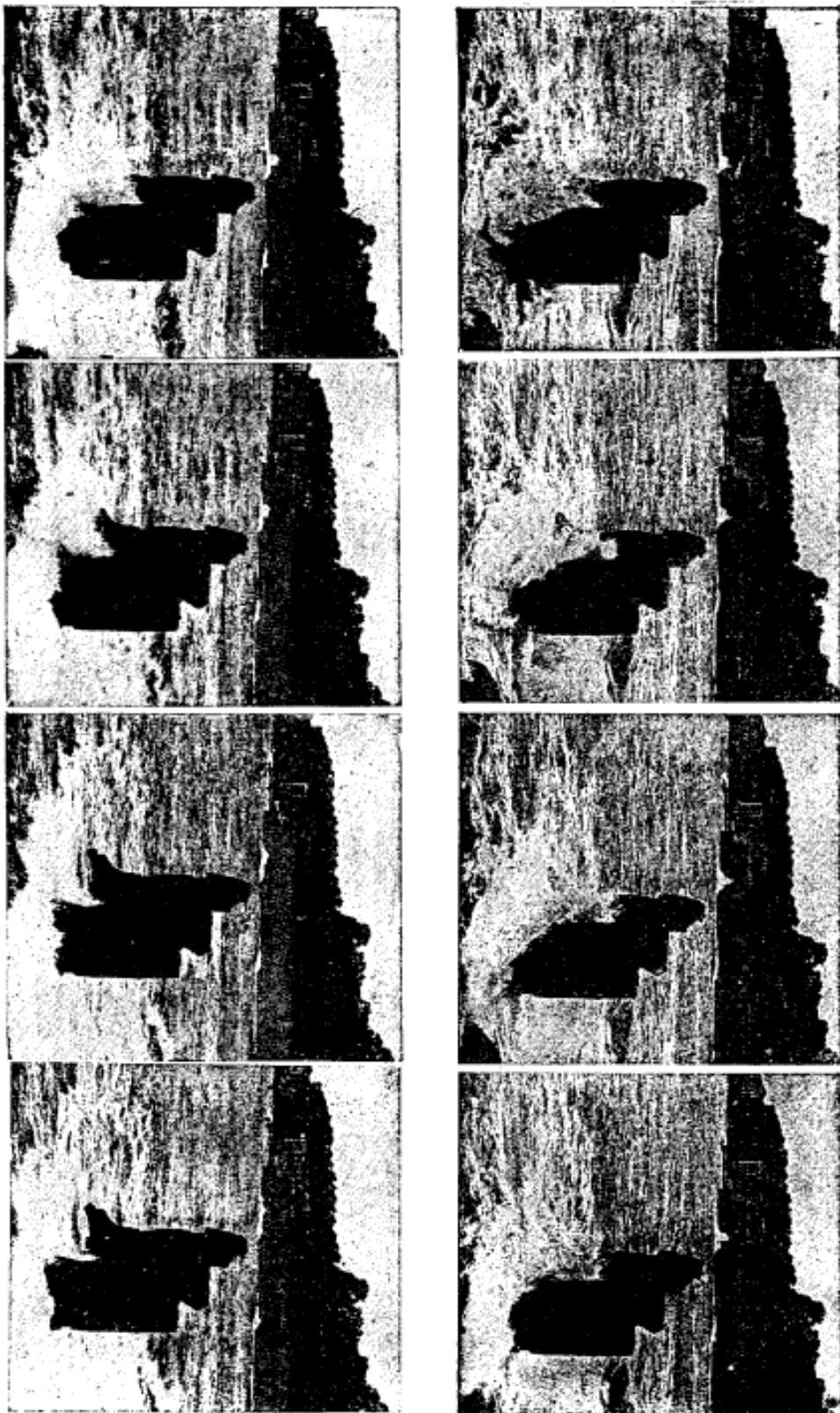


Fig. 91. — Série d'images montrant les phases successives du mouvement d'une vague. (Simili-gravure avec réduction des images au quart des dimensions qu'elles avaient sur le cliché original).

Reproduction, agrandissement et réduction des images.

— Les dimensions que nous avons données aux images du Chronophotographe, 9×9, sont, avons-nous dit, précisément celles qu'on a adoptées pour les clichés qui s'introduisent dans les lanternes à projections. Chaque image peut donc être projetée sur un écran pour les besoins d'une démonstration publique. La bande pelliculaire elle-même, ou du moins la série des images positives qu'on en obtient, par superposition, sur une autre bande pelliculaire semblable, peut donner lieu à une série de projections successives se succédant à intervalles de temps si courts, que le spectateur voit le mouvement se reproduire avec toutes ses phases. Cette représentation synthétique du mouvement sera décrite ultérieurement.

Pour une publication en typographie, les images se reproduisent au moyen du procédé qu'on nomme la *Simili-gravure*; c'est ainsi qu'ont été obtenues la plupart des figures intercalées dans notre texte. Mais comme la simili-gravure a besoin de grains ou de hachures pour donner le modelé des ombres, elle ne se prêterait pas à la reproduction d'images très fines, comme celles des objets microscopiques, ni de nuances très graduées, comme le modelé des reliefs musculaires. Nous avons recours, dans ces deux cas, à l'impression aux encres grasses (voir les planches).

Quand on doit reproduire une longue série d'images représentant les phases successives d'un phénomène, il faut adopter un format spécial, ou se contenter d'un petit nombre d'images; ainsi la planche I ne donne que trois images prises sur une longue série.

Si l'on réduit ces images pour en faire tenir un grand nombre dans la justification d'une page, elles perdent beaucoup de leurs qualités et de leur intérêt. C'est ce qui est arrivé pour la figure 91, où sont représentées huit images réduites, chacune, au quart de la surface qu'elle avait sur le cliché original.

CHAPITRE VIII

MOUVEMENTS DE L'HOMME

Au point de vue cinématique.

SOMMAIRE. — Des mouvements de l'Homme; leur étude par la Méthode graphique. — Vitesse des allures de l'Homme; rapports de la fréquence à la longueur des pas. — Durée des appuis et levés du pied dans la marche et dans la course. — Trajectoire d'un point du corps à une allure quelconque; son inscription mécanique. — Mouvements de l'Homme étudiés par la Chronophotographie sur plaque fixe; saut en longueur, saut à la perche; Chronophotographie du saut en longueur. — Mouvements professionnels; escrime, etc. — Sauts en profondeur. — Oscillations de la jambe dans la marche.

Des mouvements de l'Homme. — L'antiquité, qui professait pour les exercices du corps un véritable culte, ne connaissait pourtant les mouvements de l'Homme que d'une manière tout empirique: elle ignorait la fonction des muscles, mais elle savait former des courreurs et des athlètes par la pratique assidue de la course et de la lutte.

Plus tard, lorsque l'anatomie révéla la structure du squelette et de l'appareil musculaire, on crut que la forme des organes suffisait à en expliquer la fonction, et sur des théories imparfaites, on établit une réglementation des exercices du corps. Il eût mieux valu sans doute garder les traditions empiriques jusqu'à ce que la Science fût en état d'intervenir d'une manière utile.

C'est au XVII^e siècle seulement que Borelli (1) jeta quelque lumière sur le mécanisme de la locomotion des animaux.

(1) Borelli, *De Motu animalium*.

Le savant professeur de Naples, transportant aux êtres vivants les lois mécaniques récemment découvertes par Galilée, montra comment l'effet des forces musculaires se partage entre la masse du corps et une autre masse qu'on nomme *point d'appui*. Il réduisit à une grande simplicité la théorie générale de la locomotion. Mais pour introduire de la précision dans l'étude des mouvements de l'Homme, il fallait disposer d'instruments de mesure, afin d'évaluer l'étendue, la vitesse, l'ordre de succession et les phases des différents mouvements, pendant la marche, la course, le saut, etc. ; il fallait aussi mesurer la force dépensée dans ces différents actes ; ces instruments n'existaient pas encore.

Deux mathématiciens éminents, les frères Weber, comprirent la nécessité des mesures précises, mais ils ne disposaient que de ressources instrumentales encore insuffisantes : un terrain plat, de longueur connue, une montre à secondes et des mires constituaient presque tout leur outillage. Aussi ne purent-ils obtenir qu'un petit nombre de mesures, sur les rapports entre la fréquence et la longueur du pas, sur l'amplitude des oscillations verticales de la tête et sur les inclinaisons en sens divers du tronc. Encore ces mesures devaient-elles subir certaines corrections.

Avec les ressources de la Méthode graphique, nous avons entrepris à notre tour d'apporter quelque précision dans ces études, mais c'est surtout par la Chronophotographie qu'on peut arriver à établir d'une manière scientifique la théorie des mouvements du corps.

Toutefois, avant de présenter les résultats donnés par cette méthode et pour en faire ressortir l'importance, il est utile de rappeler sommairement les acquisitions faites par d'autres moyens. Cette revue est même d'autant plus nécessaire, que la Chronophotographie ne supplée pas aux autres méthodes, et que son rôle ne commence réellement qu'au moment où l'inscription mécanique des mouvements cesse d'être applicable.

Vitesse des allures de l'Homme; rapports de la fré-

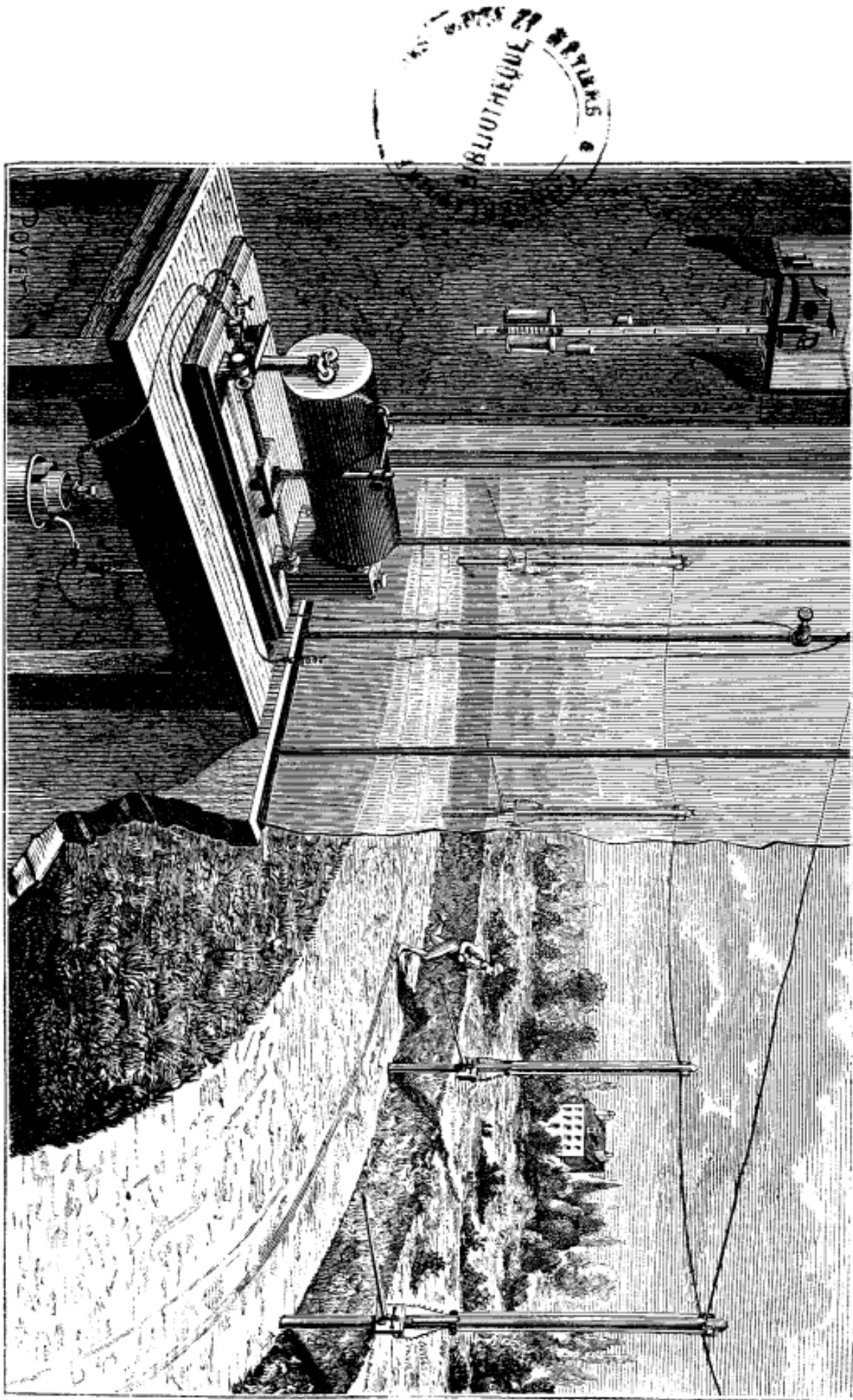


Fig. 92. — Disposition de l'Odographie fixe et de la piste, à la Station physiologique.

quence à la longueur du pas. — Un Homme qui marche ou qui court couvre, à chaque enjambée, une certaine longueur de terrain, de sorte que, plus il fait de pas en un temps donné, plus il parcourt de chemin. D'autre part, si le pas s'allonge, à nombre égal d'enjambées, le parcours sera plus étendu. Ainsi la vitesse est le produit de deux facteurs : le nombre et la longueur des pas effectués en un temps donné.

Or les frères Weber ont admis, d'après leurs expériences, que la longueur du pas augmentait avec sa fréquence, le pas lent (processionnel) étant plus court que le pas à cadence rapide. Si cette loi était absolue, il suffirait pour accélérer la marche d'un corps de troupes, de précipiter la cadence du tambour ou du clairon qui règle la fréquence du pas. Mais nos expériences ont montré que la loi des frères Weber n'est vraie que jusqu'à une limite à partir de laquelle l'accélération de la cadence amène le raccourcissement du pas, et bientôt la diminution de la vitesse de l'allure. Voici comment nos expériences ont été faites :

Persuadé de la nécessité d'opérer sur de longs parcours pour avoir une valeur exacte de la longueur moyenne du pas, nous avons établi à la Station physiologique une piste circulaire et parfaitement horizontale de 500 mètres de longueur. Tout le long de cette piste règne une ligne télégraphique dont les poteaux, espacés de 50 mètres les uns des autres, portent un petit appareil qui rompt un instant le circuit de la ligne quand le marcheur passe devant le poteau. A l'intérieur du laboratoire, un appareil inscripteur, l'*Odo-graphe fixe*, est en communication avec la ligne télégraphique.

Dans cet appareil (fig. 92), un style trace sur le papier qui recouvre un cylindre tournant, une ligne horizontale. Mais chaque fois que le marcheur, passant devant un des poteaux, rompt un instant le circuit, le style inscripteur se déplace un instant suivant la génératrice du cylindre, ce qui produit dans la courbe une inflexion à angle droit (1).

(1) Voir, pour le détail des expériences, *La Nature*, 1887.

Et comme ces inflexions se répètent chaque fois que le marcheur a parcouru 50 mètres et passe devant un des poteaux, il s'ensuit qu'au bout d'un certain temps, l'Odographe aura tracé une courbe en zigzag (*a*, fig. 93) sur laquelle se lira la vitesse de la marche.

En effet, sur la courbe sinueuse de l'Odographe, les temps se mesurent suivant les divisions horizontales de l'axe des abscisses de 0 à 16 minutes. Les espaces parcourus se comptent en mètres sur l'axe des ordonnées. De sorte que, pour chaque point de la courbe sinueuse, on estime, d'après les intersections des divisions verticales et horizontales, le

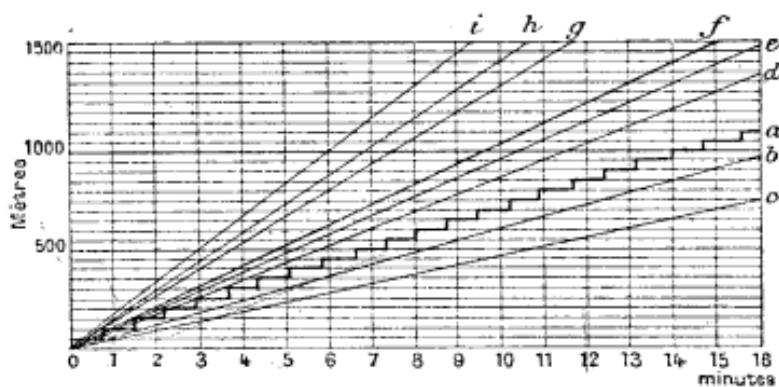


Fig. 93. — Tracés de l'Odographe fixe pour des allures de vitesses différentes.

temps écoulé et l'espace parcouru. Le rapport de ces deux valeurs exprime la vitesse (1).

Au lieu de la ligne sinuose *a* tracée par l'Odographe, il est mieux de tirer une droite tangente à tous les sommets des angles d'un côté. Ces lignes *o*, *b*, *d*...*i*, traduisent par leur pente la vitesse de différentes allure; elles expriment une vitesse uniforme quand elles sont rectilignes, une vitesse variable si elles sont infléchies.

Jusqu'ici nous ne connaissons que la vitesse de l'allure, avec ses deux facteurs, les temps écoulés et les chemins parcourus à chaque point de la courbe; il importe pour notre problème de connaître le nombre des pas. A cet effet

(1) Voir *C.R. de l'Académie des Sciences*, 3 nov. 1884.

nous avons disposé au centre de la piste un timbre qui sonne, d'une cadence régulière, et sur lequel le marcheur règle son pas. Cette sonnerie, commandée par un pendule à longueur variable situé dans le laboratoire, peut prendre toutes les fréquences possibles depuis 40 jusqu'à 120 coups à la minute.

Étant connue la cadence à laquelle marchait un Homme, on peut, dans la courbe de l'Odographe, substituer à la valeur du temps écoulé, le nombre des pas effectués, et en divisant

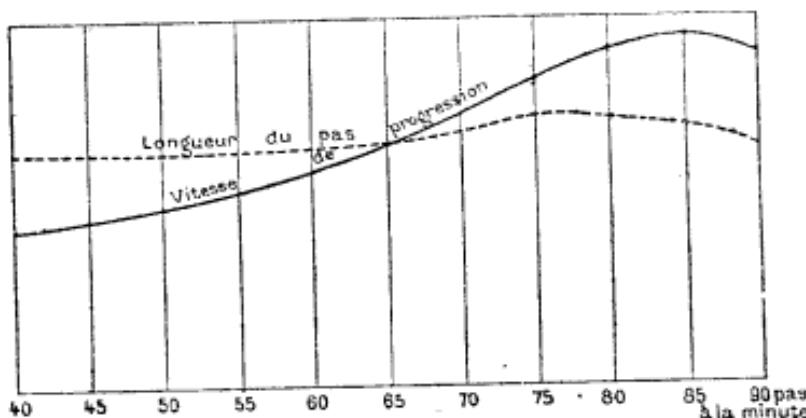


Fig. 94. — Courbes de la vitesse et de la longueur du pas à différentes cadences.

par ce nombre l'espace parcouru, avoir la longueur moyenne du pas.

C'est d'après ces données qu'a été dressé le tableau (fig. 94), où l'on voit que, suivant la remarque des frères Weber, la longueur du pas augmente avec l'accélération de la cadence, de 40 à 75 pas à la minute; mais, pour des cadences plus rapides, la longueur du pas décroît, et enfin la vitesse elle-même diminue à partir de 85 pas à la minute. Cela veut dire que le raccourcissement des pas est devenu tel, que malgré l'augmentation de leur nombre, l'espace parcouru en un temps donné a diminué. Ces expériences qui avaient leur application à la marche des troupes ont été répétées sur un grand nombre d'Hommes, de taille différente, libres ou portant des charges variables, entraînés de longue date aux exercices du corps ou récemment entrés au régiment.

On a étudié d'autre part l'influence de la nature et de la pente du terrain (1) sur la longueur du pas moyen; celle de la forme de la chaussure : longueur de la semelle et hauteur du talon (2). Enfin toutes ces expériences ont été faites, pour la marche et pour la course, sur l'Homme chargé ou non chargé. Elles ont donné des résultats précis sans le secours de la Photographie; bien plus, cette dernière, tout en donnant avec la plus grande précision la longueur d'un pas considéré isolément, n'eût pu fournir les moyennes que nous cherchions.

Inscription mécanique des mouvements de la marche.

— On a vu au chapitre I comment on peut inscrire mécaniquement la durée et la succession des appuis et levés des pieds dans la marche. Cette notation chronographique était faite en transmettant, par des tubes à air, la pression des pieds sur le sol aux tambours qui l'enregistraient. Nous avons exposé les résultats de ces études; ils se résument en ceci.

Dans la marche libre, en terrain plat, un pied quitte le sol au moment où l'autre s'y pose. Pour l'Homme chargé d'un fardeau, pour celui qui marche en terrain montant ou qui gravit un escalier, le pied à l'appui ne quitte le sol que lorsque l'autre s'y est déjà posé depuis un certain temps; il existe alors une période de double appui plus ou moins

(1) Les expériences sur différentes sortes de terrain ont été faites en dehors de la Station physiologique, par une méthode un peu différente. Une route mesurée, un compteur automatique du nombre des pas et une montre à secondes fournissaient les indications nécessaires.

(2) La longueur d'un pas ne résulte point seulement de l'écartement qui existe entre les deux jambes; ce serait vrai si, à la façon des branches d'un compas, elles ne touchaient le sol que par deux pointes, mais la longueur du pied intervient dans la mesure d'un pas, car le pied, se posant sur le sol par son talon et le quittant par sa pointe, se déroule tout entier sur le terrain et ajoute sa propre longueur à celle de l'enjambée pour former la longueur totale du pas. Il s'ensuit qu'à égale longueur des jambes, un pied court produit un pas plus court, de même une chaussure trop courte raccourcira le pas. Enfin un talon élevé, diminuant la longueur du contact du pied sur le sol, rendra aussi le pas plus court.

longue (1). Enfin, dans la course, le corps reste un instant suspendu en l'air entre deux appuis successifs, et cette suspension a une durée relative d'autant plus grande que la course est plus rapide.

Trajectoire d'un point du corps à une allure quelconque. — L'étendue des mouvements, dans la marche et surtout dans la course, rend très difficile l'inscription mécanique de ces mouvements qui, presque tous, s'effectuant suivant les trois dimensions de l'espace, exigent l'inscription simultanée de trois courbes.

Toutefois notre élève et ami regretté, Carlet, (2) a obtenu



Fig. 95. — Trajectoire du pubis de l'Homme dans la marche, d'après Carlet. Un fil de métal tordu en divers sens exprime les inflexions de cette courbe suivant les trois dimensions.

par la combinaison géométrique de trois courbes simultanément inscrites, la trajectoire d'un point du corps dans l'espace pendant la marche. Un mouvement de ce genre ne peut être représenté que par une figure solide ; Carlet se servit à cet effet d'un fil de fer tordu en divers sens. Une figure plane, même avec le secours des ombres et des lumières (fig. 95), ne donne qu'une expression très imparfaite d'un mouvement de ce genre ; les images stéréoscopiques sont seules capables de l'exprimer clairement.

Or, on a vu au chapitre II avec quelle facilité on obtient

(1) En remplaçant les signaux à air par des signaux électriques, M. Demeny a cru voir que, même dans la marche libre, il existe une courte période de double appui du pied, mais que cette période s'allonge en raison de la fatigue du marcheur. Ces résultats seraient d'autant plus importants, qu'ils donneraient pour ainsi dire un moyen de mesurer la fatigue.

(2) Carlet, *Essai expérimental sur la Locomotion de l'Homme* (Annales des Sciences naturelles, 1872).

ces sortes d'images; la figure 43 montre même une trajectoire fort analogue à celle que Carlet a si laborieusement obtenue.

Enfin, quand il s'agit d'inscrire, dans leur ensemble, tous les mouvements d'un Homme, d'exprimer les changements de position et d'attitudes du corps et des membres, l'inscription mécanique est inefficace. C'est là qu'intervient nécessairement la Chronophotographie.

Chronophotographie sur plaque fixe appliquée à l'étude des mouvements de l'Homme. — Nous avons indiqué au chapitre II la manière d'obtenir sur une plaque immobile la série des attitudes correspondant aux phases successives d'un mouvement, et nous avons donné comme exemples les Chronophotogrammes de la marche et de la course. La figure 96 représente un saut en longueur.

Ces images révèlent des attitudes que l'œil n'est pas habitué à voir; elles expriment, mieux que le langage, la manière dont le mouvement s'exécute et permettent d'en suivre toutes les phases. Elles rectifient, sur certains points, les idées qu'on avait sur le mécanisme du saut. Ainsi, en vertu d'une idée théorique, les gymnastes recommandaient aux sauteurs de retomber sur la pointe des pieds pour amortir le choc contre le sol. Nos figures ont montré au contraire que, dans le saut en longueur, on retombe toujours sur les talons et que c'est par la flexion des jambes et des cuisses que le choc est amorti.

En somme, la Chronophotographie permet de surprendre les caractères réels des mouvements et, à ce titre, prête un concours précieux à l'enseignement des exercices physiques. En se guidant sur de pareilles images, il est facile d'imiter la manière de marcher et de courir du sujet qui a servi de modèle, de reproduire sa façon d'étendre ou de flétrir les jambes, de balancer les bras, de poser les pieds sur le sol ou de les en détacher. Il serait bien plus difficile d'imiter ces mêmes actes en cherchant à les saisir sur le modèle lui-même, car, surtout aux allures vives, les mou-

vements sont trop rapides et échappent à l'observation.

Sur la figure 96 le nombre des images n'est que de cinq par seconde; cela suffit cependant pour définir la série des actes qui doivent s'accomplir dans un saut de ce genre.

En suivant ces images dans leur ordre de succession, on voit que le sauteur acquiert par une course préalable la vitesse qui lui fera franchir un long espace pendant sa période de suspension.

Au moment du saut, la jambe à l'appui s'étend vigoureusement et imprime au corps une impulsion verticale; en même temps les bras s'élèvent, ce qui donne un surcroît d'énergie à l'effort impulsif. Les images successives montrent le sauteur détaché du sol, les bras levés d'abord et les jambes écartées; plus tard les bras

9*

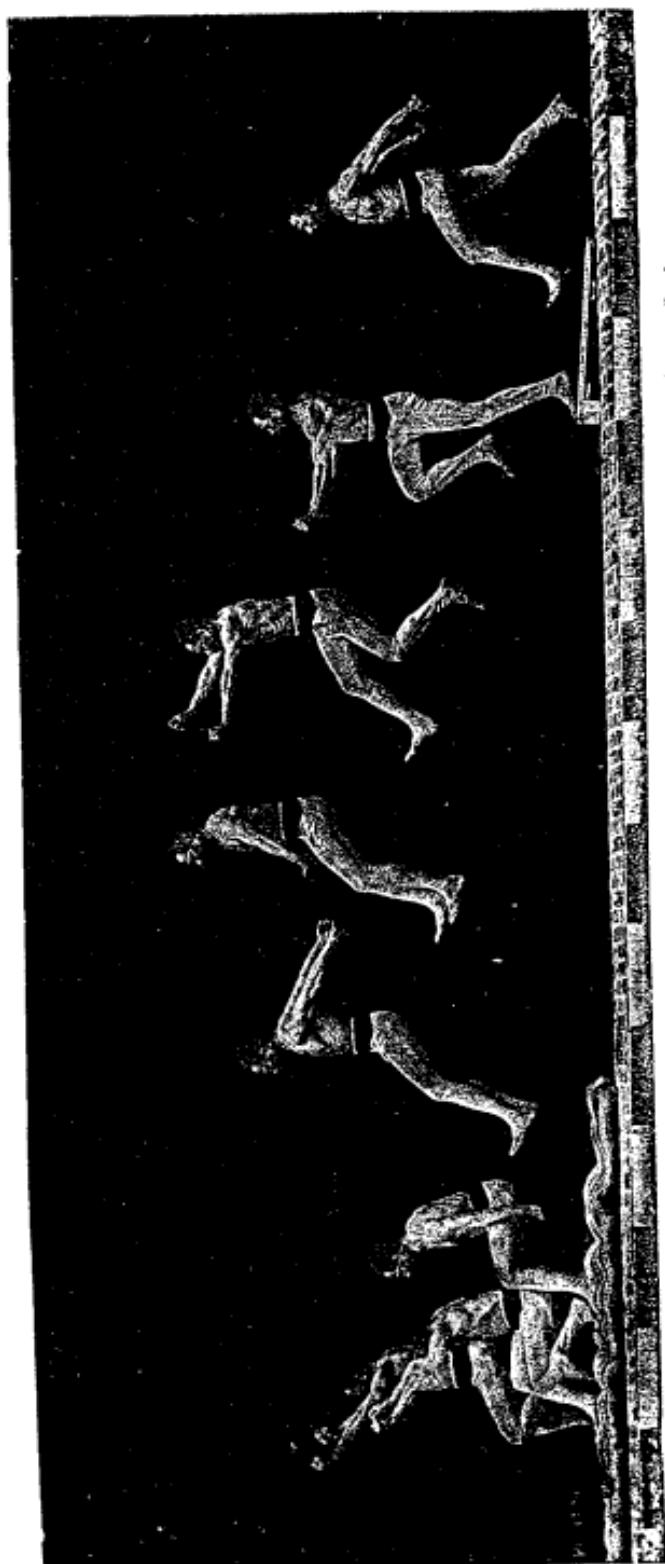


Fig. 96. — Phases successives d'un saut en longueur (Chronophotographie sur plaque fixe).

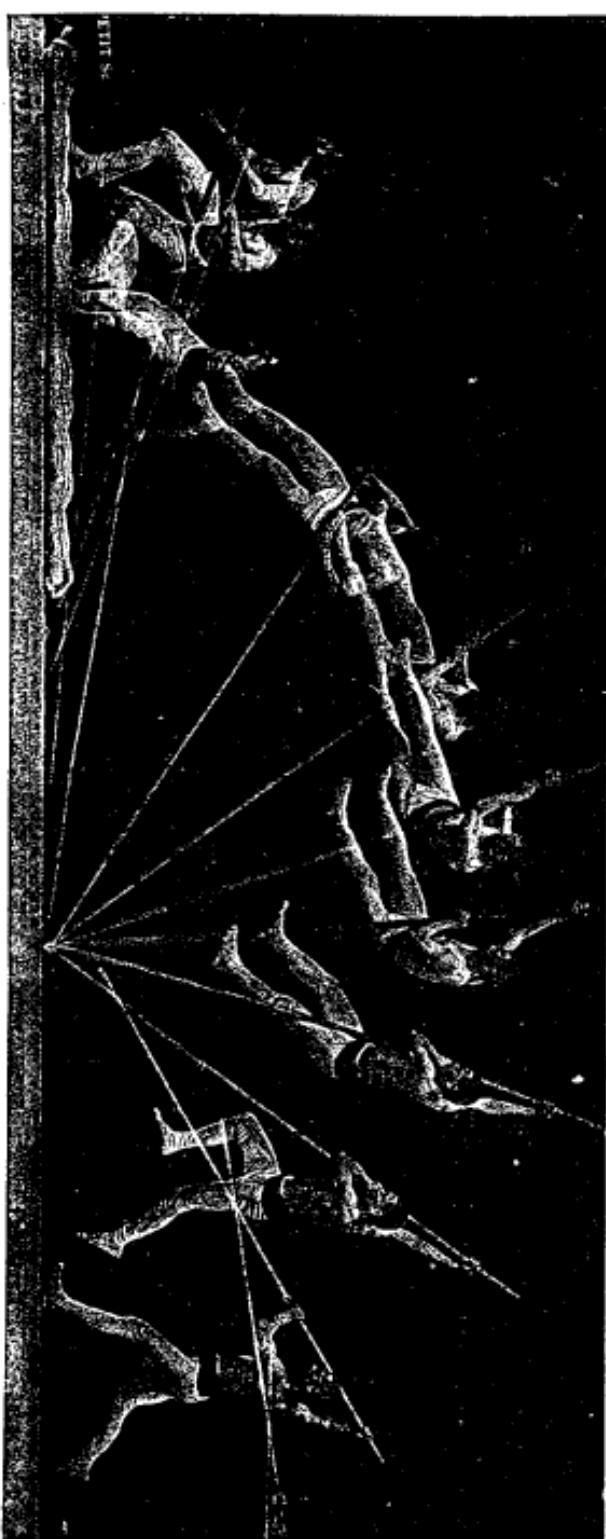


Fig. 97. — Phases successives d'un saut à la perche (Chronophotographie sur plaque fixe).

s'abaissent et les jambes se rassemblent en se portant de plus en plus en avant, de sorte que les pieds rencontrent le sol par les talons, en avant du centre de gravité du corps, afin de prévenir une chute sur la face. Enfin, au moment de la chute, les jambes se fléchissent, en résistant pour amortir la force vive dont le corps est animé.

Suivant que cette série d'actes est plus ou moins bien exécutée, l'espace franchi est plus ou moins étendu, et le sauteur retombe plus ou moins bien sur le sol. S'il a mal calculé sa vitesse et s'il n'a pas assez porté les pieds en avant au moment de la chute, il ne pourra rester sur place, mais devra courir pendant quelques pas, jusqu'à ce que cette vitesse soit éteinte.

Pour le saut à la perche (fig. 97), il n'est pas moins facile d'en

suivre les phases successives. Le coureur file en terre

l'extrémité de sa perche, en même temps qu'il s'enlève du sol par une vigoureuse extension de la jambe. L'action combinée de cette impulsion verticale et de la vitesse horizontale fait que le corps décrit un arc de cercle dont la perche est le rayon. En continuant à suivre cette courbe, le corps retomberait au delà de son point d'appui, à une distance égale à celle d'où il est parti ; mais un artifice intervient qui permet à un bon sauteur d'augmenter beaucoup l'espace qu'il franchit. Il consiste d'abord à allonger le rayon du cercle parcouru, en grimpant vers le haut de la perche au moment où elle passe par la verticale, puis, à incliner le corps dans une direction presque horizontale, c'est-à-dire normale au rayon du cercle parcouru. On retombe ainsi naturellement sur les pieds, à une distance beaucoup plus grande du point de départ.

Ainsi, dans le saut à la perche, l'impulsion initiale n'est pas, comme dans le saut en longueur, la force unique d'où dépend l'étendue du saut, mais cette distance peut être accrue par les actes que le sauteur exécute avec les bras, en prenant son point d'appui sur la perche, pendant qu'il est en l'air.

Pour une étude plus détaillée des mouvements exécutés dans un exercice corporel, il faudrait recourir à ces Photogrammes partiels ou géométriques dont nous avons déjà donné un exemple à propos de la marche de l'Homme. Ainsi, un Homme revêtu de velours noir et portant sur les bras et les jambes des lignes brillantes, donne la figure 98, pour un saut en longueur précédé d'une course. Ici toutes les phases du mouvement s'échelonnent, sans transition brusque, à cause du grand nombre d'images (25 par seconde) prises pendant la durée du saut.

Afin de rendre plus instructifs les Chronophotogrammes du mouvement, il faudrait que ces images fussent prises sur les sujets les plus forts et les plus habiles, sur les lauréats des concours de gymnastique par exemple. Ces sujets d'élite livreraient ainsi le secret de leur habileté inconsciemment

acquise et qu'ils seraient sans doute incapables de définir eux-

ÉPURE CHRONOPHOTOGRAPHIQUE D'UN SAUT EN LONGUEUR PRÉCÉDÉ D'UNE COURSE,



Fig. 98. — Des images partielles, lignes brillantes sur un vêtement sombre, sont recueillies sur plaque fixe (25 images par seconde).

mêmes. La même méthode se prêterait également bien à

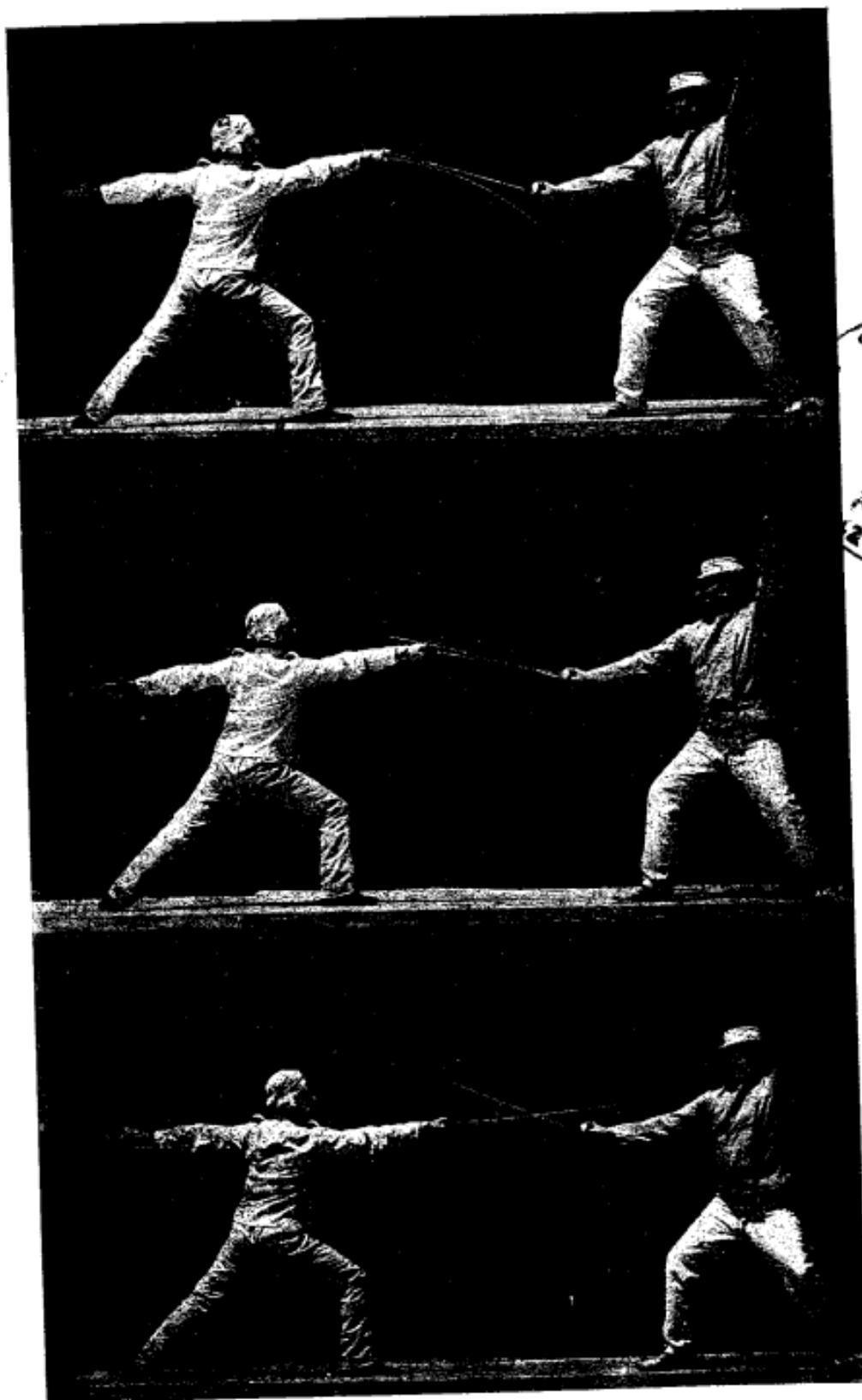


Fig. 99. — Eserime à l'épée (la succession des images se lit de bas en haut).

l'enseignement des mouvements qu'on doit exécuter dans les différents travaux professionnels. Elle ferait voir en quoi le coup de marteau d'un forgeron habile diffère de celui d'un apprenti. Il en serait ainsi pour tous les actes manuels,

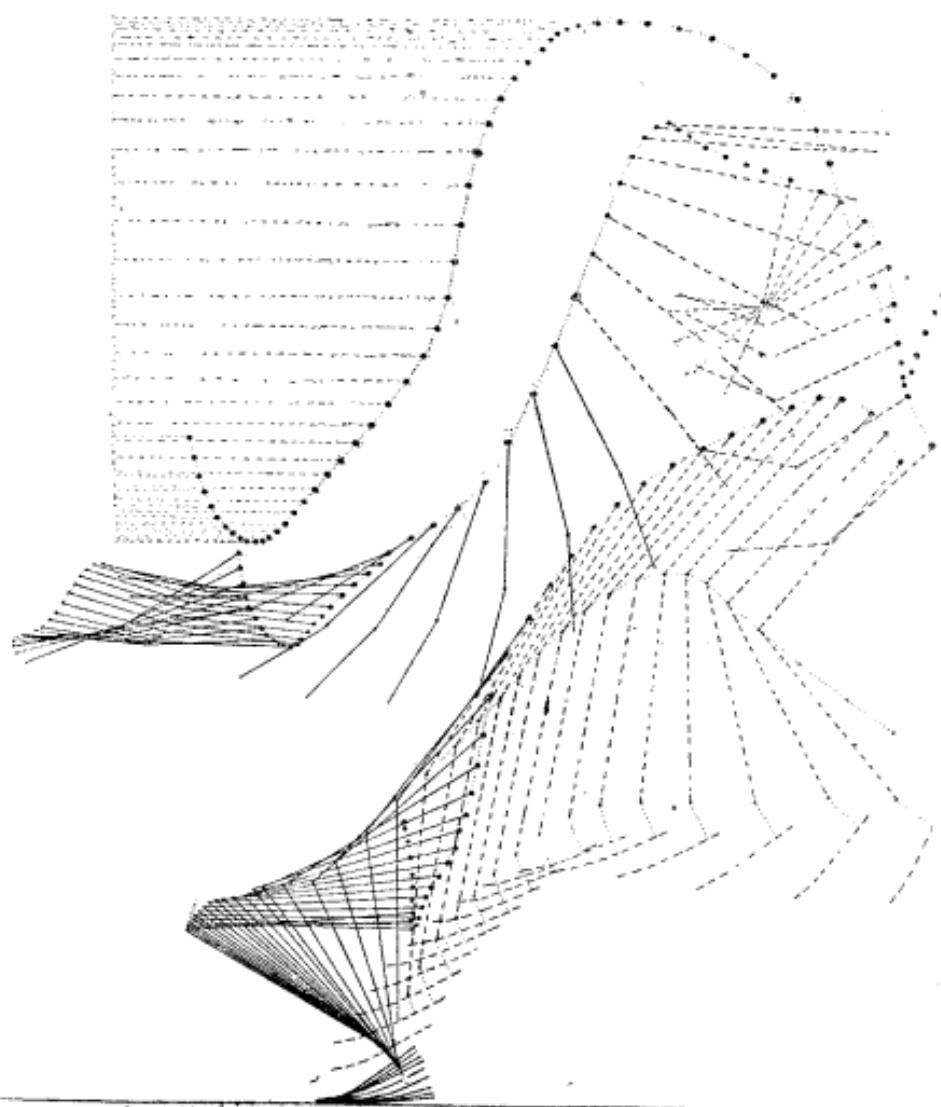


Fig. 100. — Saut en profondeur avec flexion des jambes pour amortir la chute.

pour tous les genres de sport. Ainsi, sur des séries de figures de ce genre nous avons très bien pu suivre les actes successifs d'un Homme qui monte sur un bicyclette ou qui en descend. L'examen de ces figures serait une préparation excellente pour qui voudrait aborder ce genre d'exercice.

Dans tous les genres de lutte et d'escrime il y a certains actes rapides que l'œil ne peut suivre et que le langage ne saurait expliquer clairement. Veut-on enseigner la ma-

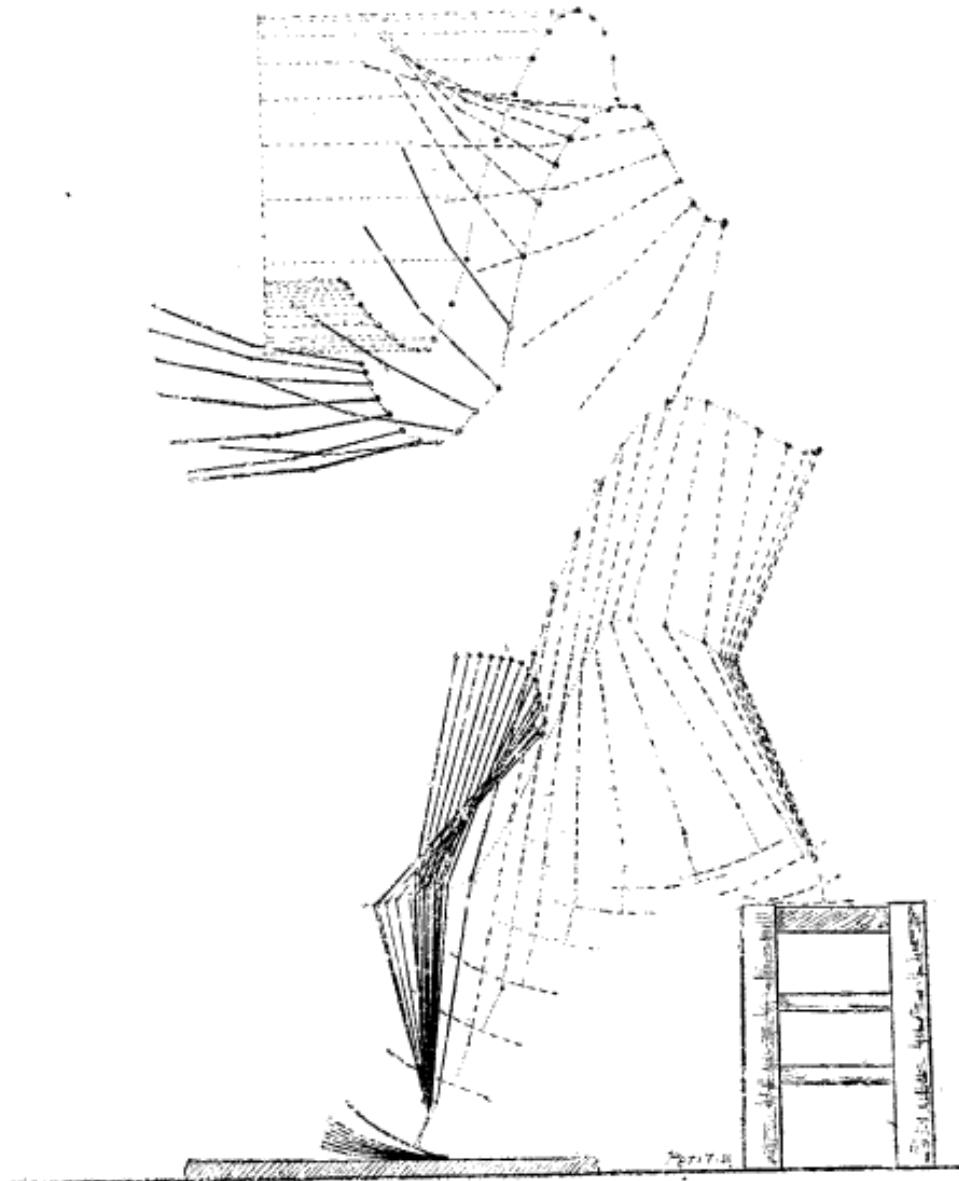


Fig. 401. — Saut en profondeur, jambes raides.

nière de les produire en les exécutant avec lenteur, on les dénature complètement. Ici encore une série d'images, à raison de 10 à 20 par seconde, fait assister à tous les détails du mouvement. On saisit une phase d'escrime

entière avec tous ses détails. Nous ne pouvons malheureusement, dans le format de ce livre, représenter une série de ce genre et n'en pouvons donner que de courts fragments.

Déjà, figure 90, on a représenté trois instants successifs de l'escrime au sabre; la figure 99 en montre également trois pour l'escrime à l'épée. Les tireurs représentés appartiennent à l'école italienne.

Les Photogrammes géométriques traduisent parfois des mouvements d'une complication extrême. Ainsi, dans un

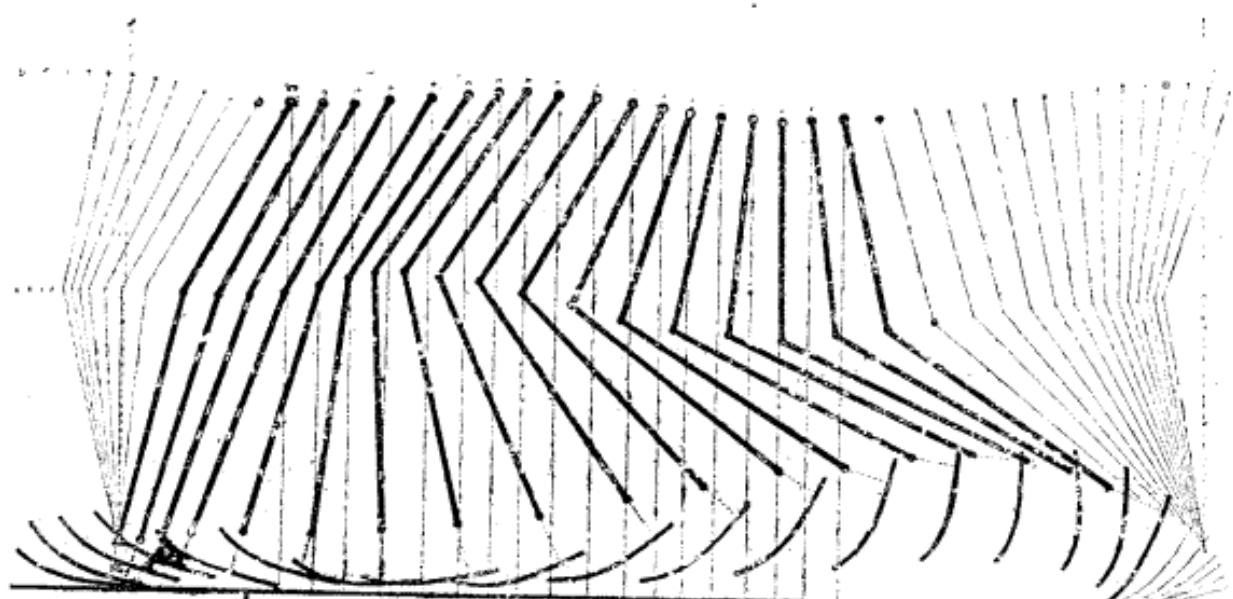


Fig. 102. — Oscillations de la jambe dans la course (Chronophotographie géométrique).

saut en profondeur (fig. 100), les lieux géométriques de chaque point du corps aux diverses phases du mouvement sont exprimés par des courbes presque continues; les rayons osseux engendrent des surfaces plus ou moins compliquées, révélant des mouvements dont l'observation seule n'eût pas fait soupçonner l'existence.

La différence du saut en profondeur dans lequel on retombe avec souplesse et sans choc et de celui qui se fait avec les jambes raidies, ressort clairement de la comparaison de la figure 100 avec la figure 101. Cette dernière cor-

respond à la chute raidie, c'est-à-dire sans amortissement du choc par la flexion des jambes.

Enfin, dans les actes compliqués, on peut recueillir l'épure d'un mouvement partiel. Ainsi, dans la course de l'Homme, si l'on veut étudier isolément la phase d'oscillation du membre au levé, on limite l'épure aux mouvements que l'on veut connaître. La figure 402 montre l'oscillation de la jambe d'un coureur; des lignes ponctuées permettent d'apprecier, pour chaque segment du membre, l'angle qu'il forme à tout instant avec la verticale et, pour chaque articulation, la trajectoire qu'elle suit.

Dans ces Photogrammes géométriques, grâce à l'extrême fréquence des images, la discontinuité des indications disparaît presque entièrement, et l'on peut considérer chaque point du corps comme se mouvant sur une trajectoire continue. Ces indications vont être très précieuses pour l'étude des mouvements au point de vue dynamique; elles permettent en effet de mesurer les vitesses et les accélérations de la masse du corps.

CHAPITRE IX

MOUVEMENTS DE L'HOMME

Au point de vue dynamique.

SOMMAIRE. — Objet de la Dynamique. — Mesure des forces qui agissent dans la locomotion de l'Homme. — Dynamographe de traction. — Dynamographe exprimant les valeurs de la pression des pieds sur le sol. — Combinaison de l'emploi du Dynamographe avec l'inscription mécanique des mouvements. Les lois de la balistique se retrouvent dans le mécanisme du saut. — Combinaison de l'emploi du Dynamographe avec la Chronophotographie. — Mesure du travail accompli dans le saut, d'après les Chronophotogrammes géométriques. — Du travail mécanique effectué dans la locomotion de l'Homme : travail suivant la verticale ; travail suivant l'horizontale ; travail dépensé pour le déplacement de chacun des membres inférieurs pendant sa suspension. — Valeurs relatives du travail dépensé à diverses allures. — Applications pratiques.

Le mouvement d'une masse et la force qui le produit sont liés entre eux par des rapports nécessaires, de sorte que la connaissance du mouvement implique celle de la force et réciproquement. Toutefois, dans la pratique, il est en général plus simple de mesurer les forces directement, au moyen des Dynamomètres.

Or, dans la locomotion de l'Homme, les forces qui interviennent sont incessamment variables ; pour en saisir toutes les phases, il faut employer des appareils inscripteurs à indications continues, les *Dynamographes*. Ces instruments traduisent par des courbes les valeurs que présente à chaque instant la force qui agit sur eux ; on leur a donné différentes formes suivant les besoins auxquels ils doivent répondre,

mais tous sont basés sur la déformation variable qu'éprouve un corps élastique soumis à une force variable elle-même.

Nous avons cherché à uniformiser la construction des Dynamographes dans nos études sur les moteurs animés, et nous avons recouru à l'emploi d'un tube de caoutchouc qui s'écrase plus ou moins sous l'action d'une pression extérieure et chasse une plus ou moins grande quantité de l'air qu'il renferme, dans un tambour à levier inscripteur.

La figure 103 montre la disposition de ce tube; il est fermé à l'une de ses extrémités et roulé en une spirale plate que l'on colle sur un disque de carton. Le bout libre du tube est mis en rapport avec le tambour à levier inscripteur. C'est ce que nous appelons la *Spirale dynamographique*. Comme elle est formée d'un tube à parois très épaisses et d'un calibre étroit, cette spirale peut subir des compressions très fortes sans s'aplatir; en outre, sa déformation est très régulière, de sorte que le soulèvement du levier inscripteur est sensiblement proportionnel à l'effort (1).

Cette spirale permet de construire un *Dynamographe de traction* (fig. 104). Cet appareil nous a servi à mesurer le travail dépensé par des Chevaux dans les différentes conditions d'attelage : l'une des extrémités était solidement reliée à la voiture, l'autre au palonnier ; la traction tendait à rapprocher deux disques entre lesquels la spirale était plus ou moins fortement comprimée (2). L'air expulsé de la

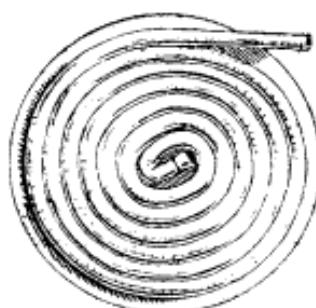


Fig. 103. — Spirale dynamographique.

(1) On peut, du reste, pour plus de précision, graduer expérimentalement l'instrument et construire une échelle dont les divisions correspondent aux divers soulèvements du levier quand on fait agir sur la spirale des poids régulièrement croissants.

(2) Nous avons montré dans ces expériences que, si la traction s'exerce par l'intermédiaire de traits élastiques, l'amortissement des chocs qui se produit alors réalise une économie dans le travail de traction. Cette économie pouvait aller jusqu'à 26 p. 100 du travail moteur (Marey,

spirale se rendait, par un tube, au tambour inscripteur.

Dans la plupart des actes de la locomotion de l'Homme, les forces musculaires se traduisent par des efforts de pression. En effet, l'action des muscles agit en redressant les jambes préalablement fléchies; celles-ci, appuyées par les pieds sur le sol, tendent, lorsqu'elles s'allongent, à repous-

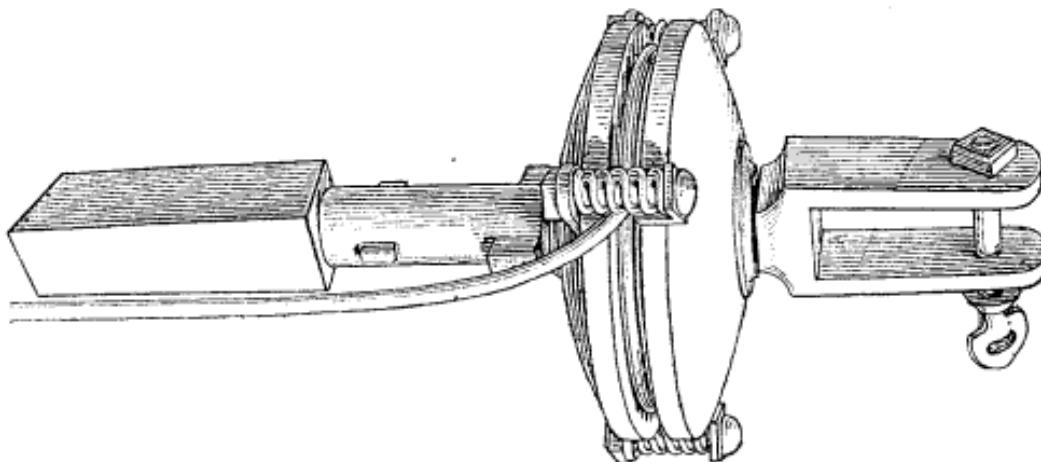


Fig. 104. — Dynamographe de traction.

ser la masse du corps. Dans la marche ou dans la course, le pied presse le terrain avec une force égale à celle qui agit pour déplacer le corps; de sorte que mesurer à chaque instant la pression des pieds sur le sol, c'est mesurer les forces qui interviennent dans la locomotion. Notre Spirale dynamographique se prête à ce genre de mesure.

Plate-forme dynamographique traduisant l'intensité de la pression des pieds sur le sol. — Une série de 9 spirales pareilles à celle de la figure 104 sont disposées sur une plate-forme en chêne (fig. 105). L'une de ces spirales est représentée découverte, pour montrer le tube dont elle est formée; les autres sont placées entre des disques de carton. Tous les tubes émanant de ces spirales sont réunis dans un collecteur commun qui va se rendre à un tambour à levier ins-

Trav. du Laboratoire, 1875). — Wüst a trouvé, dans des expériences semblables, 22 à 33 p. 100 d'économie de travail. — Ringelmann a vu l'économie du travail dépasser quelquefois 50 p. 100.

cripteur. Une planche maintenue par des guides de métal recouvre exactement toutes ces spirales. Tel est, dans son ensemble, la plate-forme dynamographique (1). Quand un

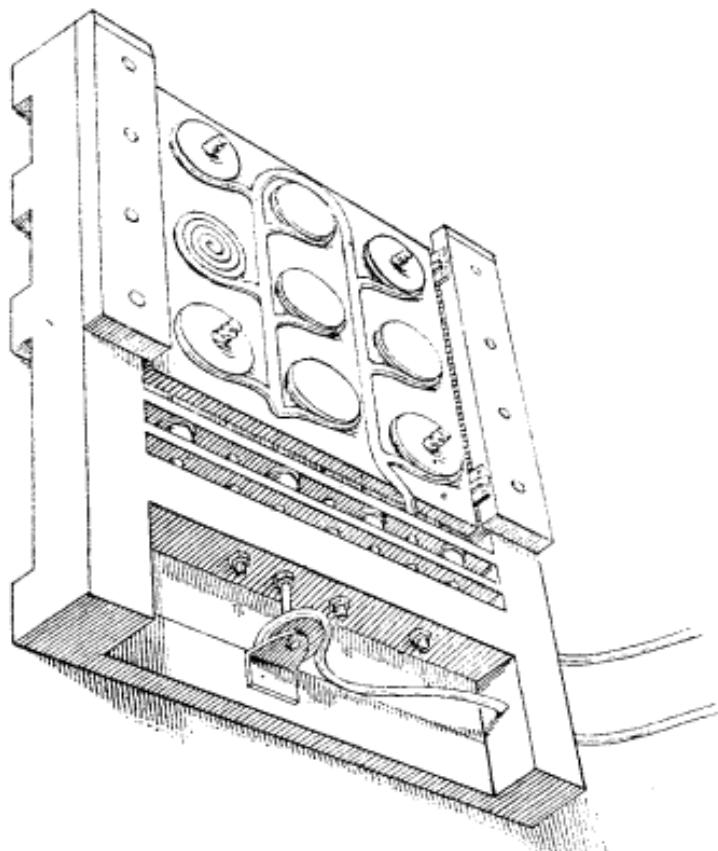


Fig. 105. — Plate-forme dynamographique donnant la courbe de la pression des pieds sur le sol.

Homme monte sur cette plate-forme (fig. 106), le levier inscripteur s'élève à une hauteur variable et s'y tient immobile si l'Homme n'exécute aucun mouvement : cette hauteur exprime le poids de son corps; mais, pour peu que l'Homme s'agite sur place, la pression verticale (2) de ses pieds sur la

(1) *C. R. de l'Académie des Sciences*, 8 oct. 1892.

(2) Dans la figure 105 est représentée une disposition introduite par M. Demeny et qui permet à l'appareil d'exprimer les efforts tangentiels imprimés à la plate-forme. Cette plate-forme tout entière glisse sur des galets, soit en avant, soit en arrière; ces mouvements, comprimant en sens divers des ressorts en caoutchouc, sont transmis, par un tube à air, à un tambour enregistreur spécial.

plate-forme change de valeur, ce que le levier traduit par les inflexions de la courbe tracée. Voici la loi qui préside aux variations de la pression :

Tout acte musculaire qui a pour effet d'élever le centre de gravité du corps augmente la pression des pieds sur le sol.

Tout acte qui tend à abaisser le centre de gravité diminue la pression des pieds (1).

Le Dynamographe, qui donne la mesure des forces, peut être employé concurremment avec un appareil capable de traduire le mouvement produit. On voit alors que les actes mécaniques accomplis par les êtres vivants obéissent aux lois générales, à celles de la balistique par exemple. Or, pour déterminer les phases d'un mouvement, on peut recourir à deux méthodes, soit à l'inscription mécanique, soit à la Chronophotographie géométrique.

Inscription mécanique du mouvement. — Les mouvements auxquels nous aurons affaire sont en général trop étendus pour qu'on puisse les appliquer directement au style inscripteur. Dans un saut, par exemple, la hauteur de notre tête se déplace de 40 ou 50 centimètres dans le sens vertical; il faut réduire ce mouvement dans un rapport tel, qu'il puisse s'inscrire sur la surface du cylindre tournant. On peut recourir pour cela au mode de réduction par un fil de caoutchouc, décrit au chapitre III (fig. 29).

La figure 406 représente un Homme monté sur la plate-forme dynamographique; sa tête est coiffée d'une calotte qui lui est bien adhérente et est reliée à l'extrémité inférieure du fil de caoutchouc dont le bout supérieur est fixé par une pince à un appui solide. En un point voisin de son attache supérieure, ce fil est rattaché au levier d'un tambour à air. Enfin deux tambours à levier inscripteurs tracent sur un cylindre tournant la courbe de la pression des pieds et celle des changements de hauteur de la tête.

(1) A ces effets, qui se produisent pendant que le mouvement s'exécute, succèdent des actions de sens inverse quand le mouvement se termine.

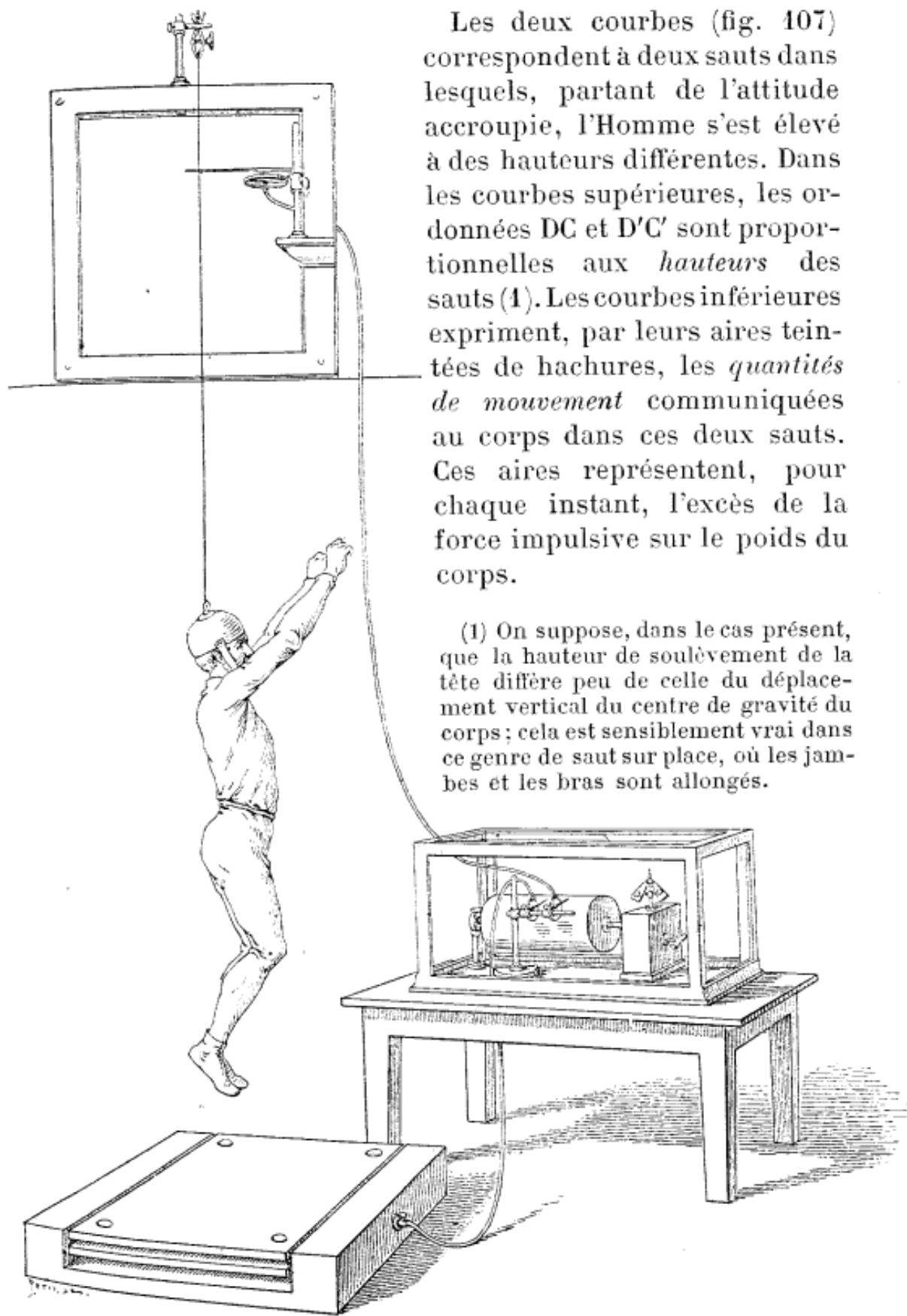


Fig. 106. — Inscription simultanée de la pression des pieds sur le sol et des changements de hauteur du corps dans un saut.

Agrandies à une échelle convenable par la lanterne à projection, ces courbes permettent de mesurer les aires d'impulsion d'une manière précise. Les expériences sur le saut de l'Homme ont montré que tout s'y passe conformément aux lois de la balistique.

Quand les aires d'impulsion sont inégales, leurs surfaces

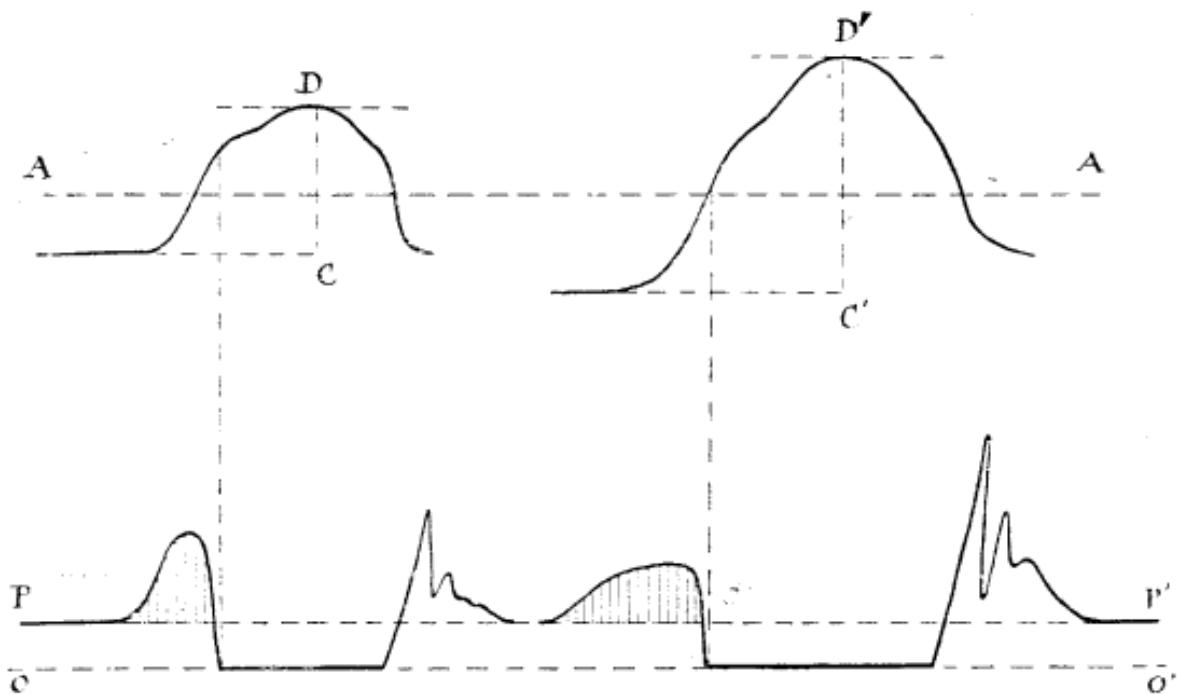


Fig. 107. — Courbes supérieures; changement de hauteur de la tête dans le saut. — Courbes inférieures; pression des pieds sur le sol.

sont proportionnelles à la racine carrée de la hauteur des sauts.

Deux aires égales entre elles, quelle qu'en soit la forme, correspondent à des sauts de même hauteur.

Si deux Hommes de poids différents exécutent des sauts de même hauteur, les aires sont proportionnelles aux poids soulevés.

La comparaison des deux séries de courbes de la figure 107 montre que ce n'est pas l'intensité *absolue* de l'effort qui influe sur la hauteur du saut, mais la *quantité de mouvement*, c'est-à-dire le produit des efforts par leur durée, produit qui correspond à l'aire de la courbe. En effet, dans ces

courbes, c'est au plus petit saut que correspond l'effort le plus intense, mais aussi le plus bref; de sorte que, pour des aires d'impulsion égales et correspondant à des sauts de même hauteur, il peut y avoir une infinité de formes diverses de la courbe dynamographique : un effort intense et bref pouvant toujours équivaloir à un effort plus faible mais de plus longue durée.

Combinaison de l'inscription du Dynamographe avec la

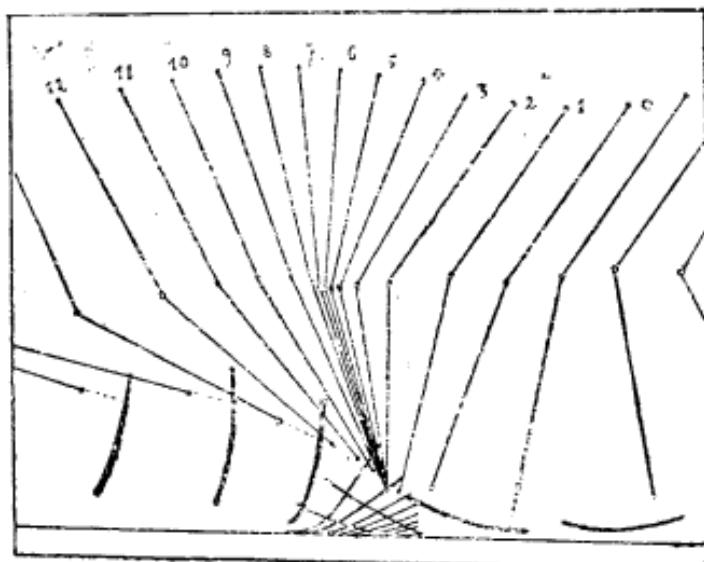


Fig. 108. — Chronophotographie géométrique des mouvements du membre à l'appui dans la marche de l'Homme.

Chronophotographie. — L'inscription mécanique des mouve-

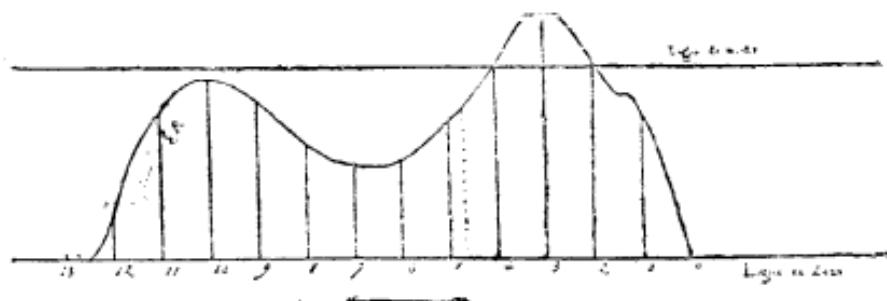


Fig. 109. — Tracé du Dynamographe exprimant les phases de la pression du pied sur le sol dans la marche.

ments n'est pas toujours possible : sur un Homme qui marche il est difficile d'inscrire le mouvement des différents segments

du membre. La Chronophotographie intervient alors, et cette méthode peut se combiner avec l'emploi du Dynamographe.

Supposons qu'on veuille connaître la force avec laquelle le pied presse le sol aux différentes phases de la flexion et de l'extension de la jambe pendant la période d'appui du pied; on recueillera simultanément les Chronophotogrammes géométriques des mouvements de la jambe pendant un demi-pas (fig. 108), et d'autre part le tracé du Dynamographe qui exprimera les phases de la pression du pied pendant ce demi-pas (fig. 109).

Il s'agit maintenant d'établir les coïncidences entre les diverses images chronophotographiques et les éléments correspondants de la courbe du Dynamographe. A cet effet, comptons sur la figure 108 combien d'images correspondent à la période d'appui du pied; nous en trouvons 42. Il est clair que le tracé dynamographique, pris dans toute sa longueur, correspond à la durée des douze attitudes de la jambe à l'appui; si donc nous divisons l'abscisse de cette courbe en douze parties égales et si nous traçons les ordonnées correspondant à ces douze divisions, chacune d'elles exprimera l'effort vertical exercé contre le sol pendant l'attitude correspondante de la jambe. Des numéros d'ordre tracés sur chacune des deux figures en facilitent la comparaison.

On peut à la rigueur se passer du Dynamographe et mesurer le travail effectué d'après les seules indications fournies par la Chronophotographie géométrique. En effet, quand on connaît la masse d'un corps, la position de son centre de gravité et les mouvements de ce point, on en déduit le travail dépensé dans ce mouvement.

Mesure du travail accompli dans un saut, d'après la Chronophotographie géométrique. — La figure 110 est l'épure géométrique d'un saut de *pied ferme* en longueur; elle exprime les positions successives des jambes, des bras et de l'épaule (on a retranché de cette figure les images qui précèdent et celles qui suivent le saut proprement dit). Des lignes ponctuées ont été tracées pour éclairer cette figure :

l'une montre la direction de l'impulsion au moment où le corps quitte le sol ; l'autre, inversement inclinée, correspond à la direction dernière de la chute ; la bissectrice de l'angle formé

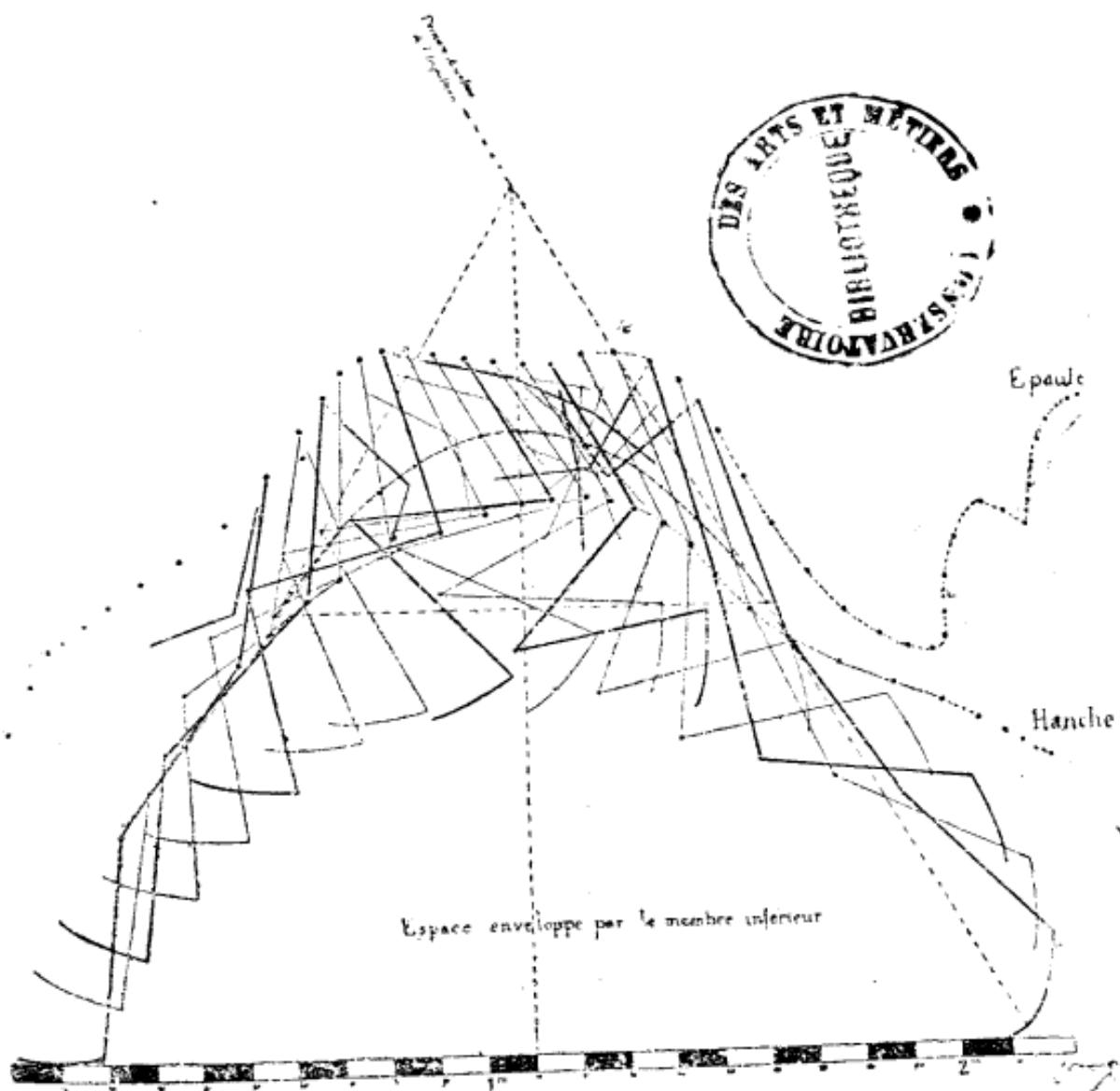


Fig. 110. — Épure géométrique des mouvements dans un saut en hauteur.

par ces deux lignes est verticale et représente l'axe de la parabole sur laquelle se meut le centre de gravité.

Mais puisque le centre de gravité se déplace dans le corps à chaque changement d'attitude, il a fallu déterminer la position de ce centre pour un certain nombre des attitudes

représentées sur l'épure, afin de construire la parabole décrite, et même pour déterminer les lignes de construction dont on vient de parler (1).

Ces données géométriques suffisent, étant donné le poids du corps, pour déterminer le *travail* dans le saut, puisque la construction de la parabole indique la hauteur à laquelle ce poids a été élevé (2).

De la Chronophotographie on pourrait déduire aussi la *quantité de mouvement* imprimée à la masse du corps au moment où elle a quitté le sol (3).

Du travail mécanique effectué dans la marche de l'Homme. — On entrevoit, d'après l'étude qui vient d'être faite pour le saut, la possibilité d'évaluer, sur les Chronophotogrammes géométriques des différentes allures normales, le travail effectué dans chacune d'elles.

Jusqu'ici, les mécaniciens n'ont évalué le travail de l'Homme que dans le cas où, marchant sur un sol incliné, il élève ou abaisse le poids de son corps d'une certaine hauteur. Dans le premier cas, il fait du travail positif, dans le second du travail négatif. La mesure de ces travaux de sens divers est le produit du poids du corps par le change-

(1) A cet effet M. Demeny, perfectionnant une méthode imaginée par Borelli, a mesuré la quantité dont le centre de gravité se déplace suivant l'axe du corps dans les diverses attitudes des bras et des jambes ; c'est d'après cette détermination qu'on a pu vérifier que le centre de gravité du corps décrit réellement une parabole. Mais un point du corps, considéré isolément, ne se déplace pas suivant cette courbe ; on voit en effet que la partie supérieure du corps s'abaisse si les jambes se relèvent ; c'est même la condition nécessaire du maintien du centre de gravité sur sa trajectoire parabolique.

(2) Le travail, dans un saut oblique, serait la somme des travaux exécutés suivant la verticale et suivant l'horizontale. Nous n'avons considéré ici que le premier genre de travail.

(3) D'après d'autres images, retranchées de la présente figure, on a construit la courbe de l'accélération verticale du centre de gravité avant l'instant où le corps a quitté le sol ; on obtint de cette manière la loi de variation de la force impulsive suivant la verticale. La courbe qui représente cette dernière variation est semblable à celle que donnerait le Dynamographe ; son aire est proportionnelle à la quantité de mouvement acquise par le corps suivant la verticale.

ment de hauteur, ce qui s'évalue en kilogrammètres.
A ce compte, la progression sur un terrain horizontal ne

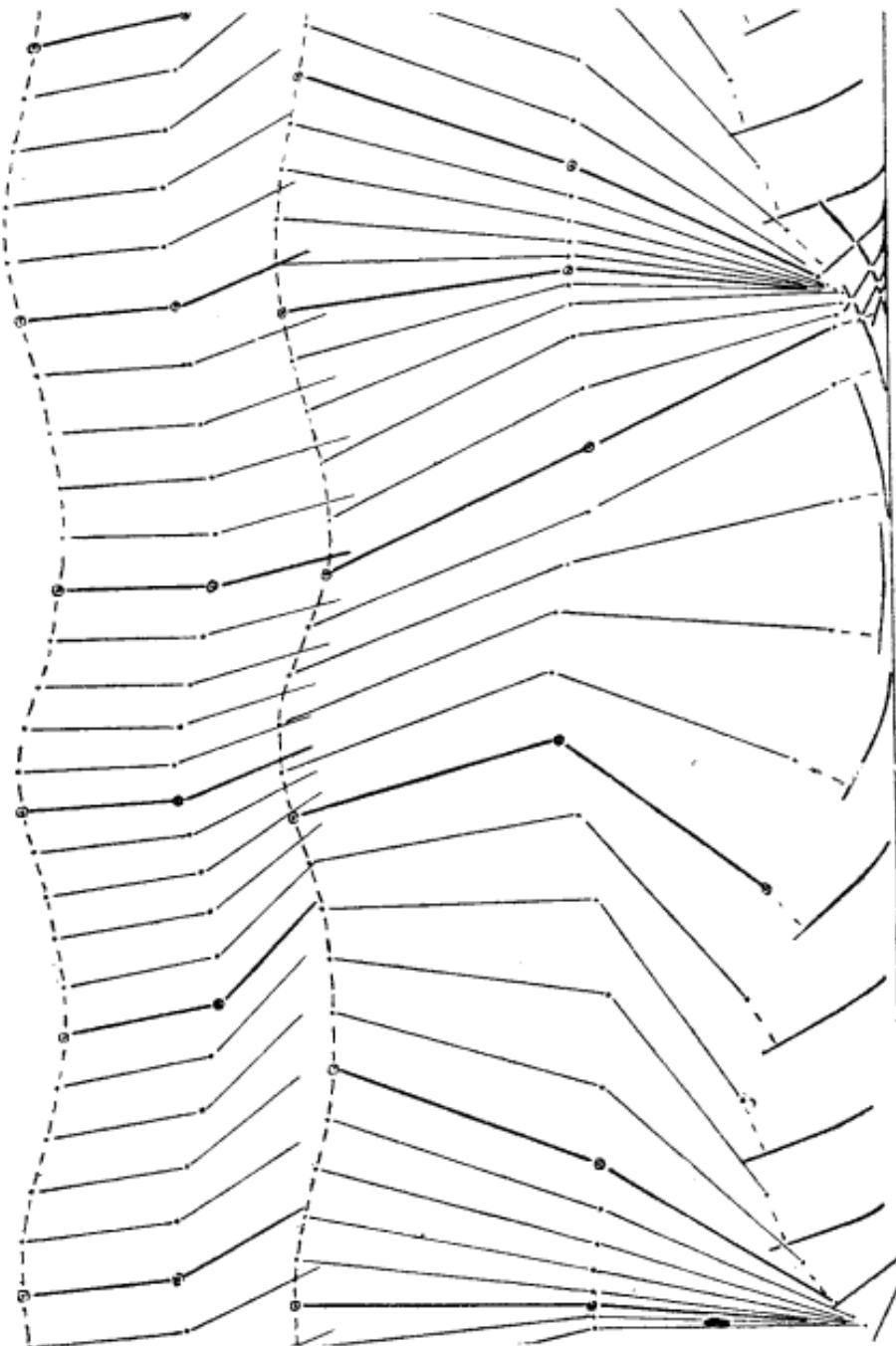


Fig. 111. — Épure géométrique des mouvements dans la marche de l'Homme. La succession des images se lit de gauche à droite.

donnerait lieu à aucun travail apparent, et pourtant elle s'accompagne d'actes musculaires amenant la fatigue.

Il nous a semblé possible d'évaluer approximativement le

travail mécanique dépensé dans la marche ou dans la course, en terrain horizontal, d'après les mouvements imprimés en divers sens à la masse du corps par les actions musculaires. En effet, si l'on pouvait suivre dans l'espace les mouvements du centre de gravité du corps, on verrait qu'il exécute une série d'oscillations verticales dont chacune correspond à l'appui d'un des pieds, et qu'en même temps la translation de ce point passe par des vitesses variables, s'accélérant puis se ralentissant pendant chaque oscillation (1).

Enfin, une autre dépense de travail musculaire réside dans les mouvements imprimés tour à tour à chacune des jambes, mouvements que la pesanteur suffirait à produire s'ils étaient, comme l'ont cru les frères Weber, assimilables aux oscillations du pendule, mais qui, en réalité, exigent en général l'intervention des muscles.

C'est par la Chronophotographie géométrique que nous avons obtenu (fig. 411) la mesure des différents mouvements que présentent le corps et les membres dans la marche de l'Homme.

Trois éléments principaux concourent à la production du travail dans la marche horizontale :

- A. Le travail suivant la verticale ;
- B. Le travail suivant l'horizontale ;
- C. Le travail nécessaire pour faire osciller le membre inférieur pendant sa suspension.

A. Travail musculaire dépensé suivant la verticale. — On peut admettre que les mouvements de la tête sont sensiblement semblables à ceux du centre de gravité. Or, la trajectoire des mouvements de la tête est une courbe sinuuse (fig. 412) qui passe périodiquement par les mêmes maxima au milieu de l'appui du pied, et les mêmes minima au milieu du levé (2). Les droites parallèles ponctuées, tangentes aux inflexions supérieures et inférieures de cette

(1) Nous négligeons, comme trop peu importants, les déplacements du centre de gravité en dehors du plan vertical de la marche.

(2) Dans la course, au contraire, les maxima correspondent aux instants où le corps est suspendu, les minima aux appuis des pieds.

courbe, mesurent par leur écartement la hauteur des oscillations verticales du corps.

Pour obtenir la valeur réelle de ces déplacements, on a projeté sur un écran l'image de la figure 111 en l'agrandissant avec les instruments d'optique jusqu'à ses dimensions réelles, de telle sorte que la longueur d'une oscillation verticale correspondait à la longueur d'un demi-pas mesuré sur le terrain.

Le travail produit, à chaque élévation et à chaque abais-

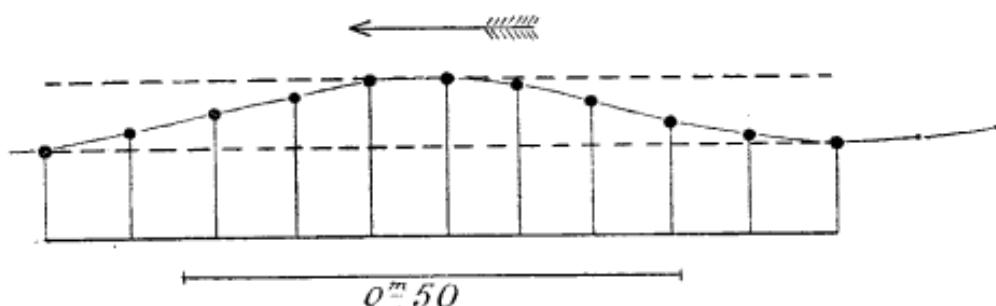


Fig. 112. — Oscillations verticales de la tête d'un Homme qui marche.

sement du corps, se mesure par le poids du marcheur multiplié par la hauteur verticale qui sépare les droites parallèles ponctuées dans la figure agrandie. De sorte que si le poids du marcheur est de 73 kilogrammes et l'amplitude des oscillations de 0^m,04, chaque élévation du corps représentera un travail positif de 3 kilogrammètres, chaque abaissement un travail négatif de semblable valeur. Enfin, comme il y a deux oscillations doubles de ce genre dans un pas complet, le travail musculaire correspondant aux oscillations verticales sera de 12 kilogrammètres à chaque pas (1).

B. Travail musculaire dépensé suivant l'horizontale dans la marche. — La vitesse de translation du corps suivant l'horizontale est périodiquement variée, d'où résultent des

(1) Ce produit du poids du corps par le double de la hauteur de l'oscillation verticale est une valeur limite que n'atteint pas réellement la dépense de travail musculaire. En effet, une partie du travail résistant paraît s'emmagerer dans les muscles pendant chaque phase de descente, et être restituée dans la phase d'ascension qui suit.

variations périodiques de la force vive, mesurant le travail, moteur ou résistant, dépensé aux différentes phases de l'appui des pieds. Ces variations de vitesse se déduisent de l'écartement des points de la trajectoire, puisque ces points sont photographiés à des intervalles de temps égaux entre eux; soit $1/50$ de seconde. La projection horizontale de ces intervalles permet de construire la courbe des vitesses de la translation horizontale, en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles à l'écartement des points, c'est-à-dire à la vitesse. Des vitesses maxima et minima de la masse du corps on déduit les deux valeurs correspondantes de la force vive que cette masse a possédée.

Le travail moteur et le travail résistant effectués par les muscles égalent, chacun, la moitié de cette variation de la force vive, de sorte que la somme de ces deux travaux a pour valeur limite supérieure la variation de la force vive tout entière. Elle serait dans le cas présent de $2^{k\text{gm},5}$.

C. Travail musculaire dépensé pour le déplacement de chacun des membres inférieurs pendant sa suspension.

— Le transport du membre inférieur est le mouvement très complexe de deux pendules articulés bout à bout, éloignés de leur position d'équilibre et livrés à l'action de la pesanteur combinée à celle des muscles, pendant que le point de suspension lui-même se meut d'un mouvement varié sur sa trajectoire curviligne.

La méthode employée pour mesurer le travail correspondant à cette oscillation consiste à mesurer le moment d'inertie du membre inférieur par rapport à son axe de rotation, et à mesurer sur les épures géométriques la vitesse angulaire maximum qu'il atteint. La valeur trouvée ainsi est très faible, $0^{k\text{gm},3}$ à chaque pas. Ainsi, la détermination la plus incertaine dans ces mesures correspond à une valeur presque négligeable, et influence très peu la valeur totale du travail effectué dans un pas (1).

(1) L'importance pratique d'une exacte détermination du travail est très grande; aussi est-il à désirer que tous les documents que nous

D'après les mesures ci-dessus indiquées, la valeur totale du travail effectué dans un pas de marche serait de 9 kilogrammètres. Du reste, l'estimation rigoureuse du travail dépensé à une allure quelconque a bien moins d'intérêt que la recherche des variations de ce travail à mesure que l'allure s'accélère. En effet, si l'on calcule la dépense de travail qui correspond à la course la plus rapide, on trouve des valeurs bien différentes de celles que donnait le pas lent. Voici ces valeurs pour la course :

Translation du membre inférieur.....	3 Kgr, 4
Oscillations verticales du corps.....	2 " 3
Accélérations et ralentissements dans le sens horizontal.....	18 " 4
Total.....	<u>24 kgr, 1</u>

Ainsi, la dépense de travail dans un demi-pas, en terrain plat, varie suivant l'allure de 9 à 24 kilogrammètres. Si l'on tient compte du nombre des pas effectués en *une minute* à ces allures extrêmes, on trouve que la dépense de travail serait, dans la marche lente de 720 kilogrammètres, et dans la course rapide de 6748 kilogrammètres, soit *à la seconde* 12 kilogrammètres dans le premier cas, 112 kilogrammètres dans le second (1).

possédons à ce sujet à la Station physiologique soient étudiés à nouveau par les méthodes les plus parfaites. Ce sujet mériterait de tenter les plus grands mathématiciens.

(1) Nous admettons que la marche en terrain horizontal représente une dépense de travail que nous avons essayé de mesurer. Mais cela n'implique aucune contradiction entre la Mécanique et la Physiologie. En effet, si les mécaniciens ne considèrent le travail produit dans la marche que si elle se fait sur une route inclinée, c'est que, dans ce cas seulement, le travail leur apparaît avec sa mesure précise : le poids du corps élevé ou abaissé d'un certain nombre de mètres.

Mais Coulomb sentait bien que, dans la marche ou dans le transport des fardeaux, les muscles agissent et dépensent. Ne pouvant ramener cette dépense à l'expression habituelle PH, il l'a désignée sous le nom d'*effet utile*, PE c'est-à-dire le poids transporté multiplié par le chemin parcouru. C'est qu'en effet la mesure du travail, dans la marche ou la course, en terrain plat, exige la connaissance des mouvements imprimés à la masse du corps et à celle des membres au levé.

Valeurs relatives du travail dépensé à diverses allures.

— Si l'on compare entre elles les valeurs des différents

C'était aux physiologistes qu'il appartenait de déterminer ces mouvements, et nous avons vu que la Chronophotographie les fait connaître avec précision.

En donnant ci-dessus des mesures du travail dépensé dans la marche, nous avons dit qu'elles correspondaient probablement à un maximum et que la valeur réelle était peut-être inférieure à ces mesures. Cela tient à ce que, dans les mouvements alternatifs de sens contraire, il peut y avoir un certain *emmagasinement* du travail dans les organes qui éteignent la force vive et une certaine restitution de ce travail dans l'acte suivant.

Pour faire comprendre notre pensée, prenons l'exemple d'une balle élastique du poids de 100 grammes qui tombe, sur un sol dur, de la hauteur d'un mètre. Au moment où la balle touchera le sol, la pesanteur aura fait un travail dont la valeur sera de 100 grammètres. Mais laissons le phénomène s'achever : la balle s'aplatira sur le sol, puis rebondira à une certaine hauteur, 0^m,60 par exemple. Quand la balle est arrivée à cette hauteur, la partie dépensée du travail de la pesanteur n'est que de 40 grammètres, car en la laissant retomber, nous retrouverions encore 60 grammètres de travail disponible. Ces 60 grammètres ont donc été restitués par la force élastique de la balle qui les avait emmagasinés.

Y a-t-il quelque chose d'analogue lorsque, à la fin d'un mouvement, les muscles antagonistes se tendent pour l'arrêter ? Et ces muscles antagonistes restitueront-ils quelque chose dans le mouvement de sens contraire qui se produira tout à l'heure ? Voici des faits qui peuvent faire croire à cette restitution.

Lorsqu'on s'efforce, en sautant, d'atteindre un objet élevé, si on ne réussit pas du premier coup, on l'atteint parfois du second ; la Chronophotographie montre en effet que le second saut est toujours plus haut que le premier. Que s'est-il passé dans ces actes successifs ?

Dans le premier saut, tout l'effort des muscles extenseurs des jambes et des cuisses a projeté le corps à une certaine hauteur. En retombant sur le sol, nous avons contracté ces mêmes muscles pour amortir la chute, c'est-à-dire pour éteindre la force vive dont notre masse était animée, puis nous avons continué à contracter ces muscles pour nous projeter de nouveau en hauteur.

Or, comme la hauteur est plus grande dans le deuxième saut, on peut admettre que la force élastique des muscles tendus pour l'amortissement s'est ajoutée à l'action musculaire intentionnellement produite pour le second saut.

Mais cette force élastique de rebondissement est-elle l'effet d'une propriété physique du muscle, et n'implique-t-elle aucune nouvelle dépense de travail ?

Weber a démontré qu'un muscle, au moment où il agit, acquiert, par les actes intimes qui se passent dans ses fibres, une force élastique

éléments du travail dépensé dans un pas, on trouve qu'ils ne sont pas influencés de la même manière par la rapidité

plus grande et que c'est cette force qui produit le mouvement. Les choses se passent donc dans l'organisme vivant comme dans un moteur à vapeur où la force élastique d'un gaz se transforme en travail.

Ainsi, au point de vue physiologique, dans le saut il n'y aurait pas restitution gratuite d'un travail emmagasiné, mais cette restitution serait l'effet des actes intimes qui accompagnent toute contraction musculaire. Si le corps est lancé plus haut dans le second saut, c'est qu'alors le travail musculaire a été plus grand.

Et pourtant nous avons dit que, dans le premier saut, nous avons donné toute l'intensité possible à nos actions musculaires. Cela est vrai, aussi n'est-ce point par un effort *plus énergique*, mais par un effort *plus prolongé*, que nous avons donné au second saut une hauteur plus grande.

On se souvient que, dans les expériences faites avec le Dynamographe, la racine carrée de la hauteur du saut est proportionnelle à l'*aire d'impulsion* c'est-à-dire à la *quantité de mouvement* communiquée au corps; qu'elle ne dépend donc pas de la simple hauteur de la courbe qui exprime l'intensité de l'effort à un instant donné, et qu'il faut encore tenir compte de la durée de cet effort. Ainsi, dans les exemples représentés figure 107, le saut le plus élevé correspond précisément aux ordonnées les moins hautes.

Il s'agit donc de savoir si l'action impulsive des muscles n'a pas duré plus longtemps dans le second saut que dans le premier.

Dans tout muscle qui exécute une contraction, la force élastique part de zéro pour atteindre son maximum au bout d'un certain temps. Cela résulte de la manière dont la contraction se produit, par addition d'une série de raccourcissements successifs. Or, si nous partons de la position accroupie pour faire un *premier saut*, nous contractons graduellement nos muscles extenseurs, et l'effort de ces muscles n'atteindra son maximum qu'à une phase plus ou moins avancée de l'extension des membres.

Pour le *second saut*, au contraire, quand, en résistant à la chute, nous sommes revenus à la position accroupie, nos muscles extenseurs sont déjà arrivés à leur maximum de force contractile, et c'est cette force maximum qui continuera d'agir pour nous éléver de nouveau, jusqu'à ce que nous ayons quitté le sol. La masse du corps aura donc reçu *pendant plus longtemps* l'effort de nos muscles; elle aura reçu une plus grande *quantité de mouvements*.

Un exemple familier fera mieux comprendre la différence qui existe, pour l'intensité des effets, entre une force qui se développe graduellement pendant la durée d'un mouvement, et une autre qui agit avec son intensité complète pendant toute la durée de ce mouvement.

Quand nous voulons imprimer par l'extension du doigt une forte impulsion à un objet, nous lui donnons une *chiquenaude*. C'est-à-dire que, retenant avec le pouce la dernière phalange du médius, nous con-

de l'allure (fig. 413). Ainsi, dans la marche lente, le travail dépensé dans les oscillations verticales est plus grand que

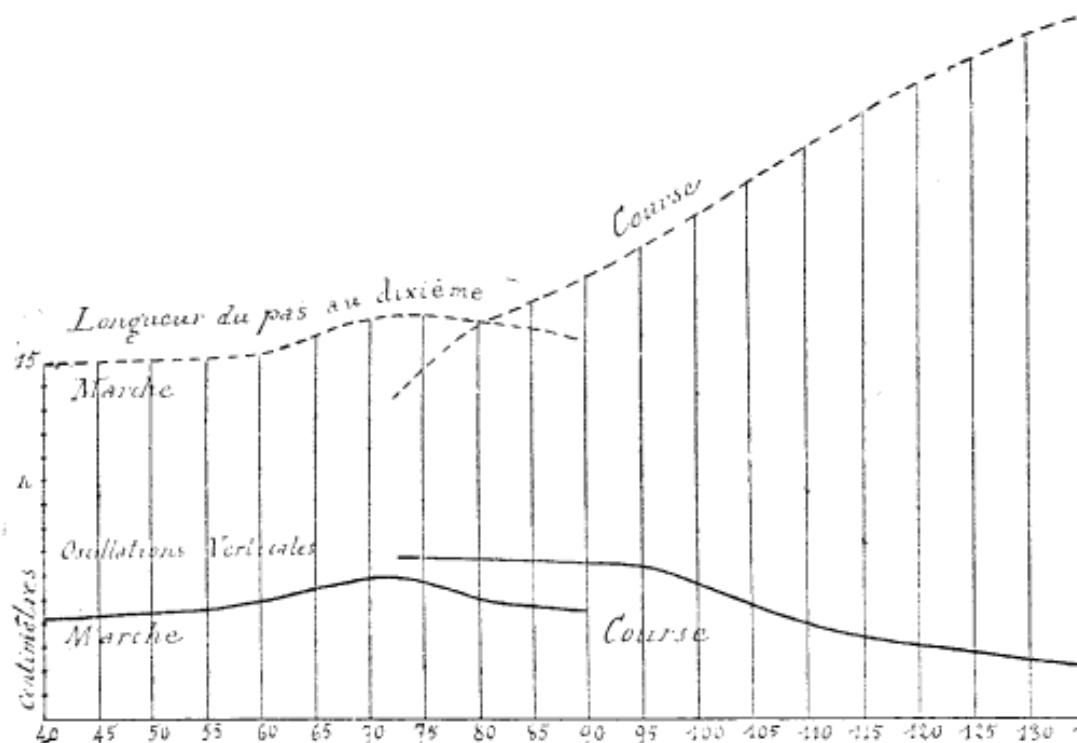


Fig. 413. — Variations des oscillations verticales du corps dans la marche et dans la course, à des cadences variant de 40 à 130 pas à la minute; comparaison de la courbe des oscillations à elle de la longueur du pas.

celui qui correspond aux différences de vitesse de la translation horizontale ; dans la course rapide, c'est l'inverse qui se produit.

tractons fortement les extenseurs de ce doigt. Au moment où cette force d'extension a atteint son maximum, nous laissons le médius, partir comme un ressort qui se détend, et l'objet est lancé au loin avec une grande violence. Assurément, l'impulsion eût été bien vive si, le médius étant préalablement fléchi, nous avions essayé de l'étendre vivement pour repousser l'objet placé devant lui.

Dans tout mouvement alternatif les muscles ont une action plus forte que dans un mouvement simple : l'acte de *brandir* l'instrument dont on veut frapper un grand coup n'a pas d'autre raison d'être.

Or, comme le travail résistant des muscles est de même nature que le travail impulsif, nous nous sommes cru autorisé, jusqu'à preuve du contraire, à doubler dans l'évaluation du travail de la marche la valeur

Il était donc nécessaire de suivre à travers toutes leurs phases les variations que chacun des éléments du travail

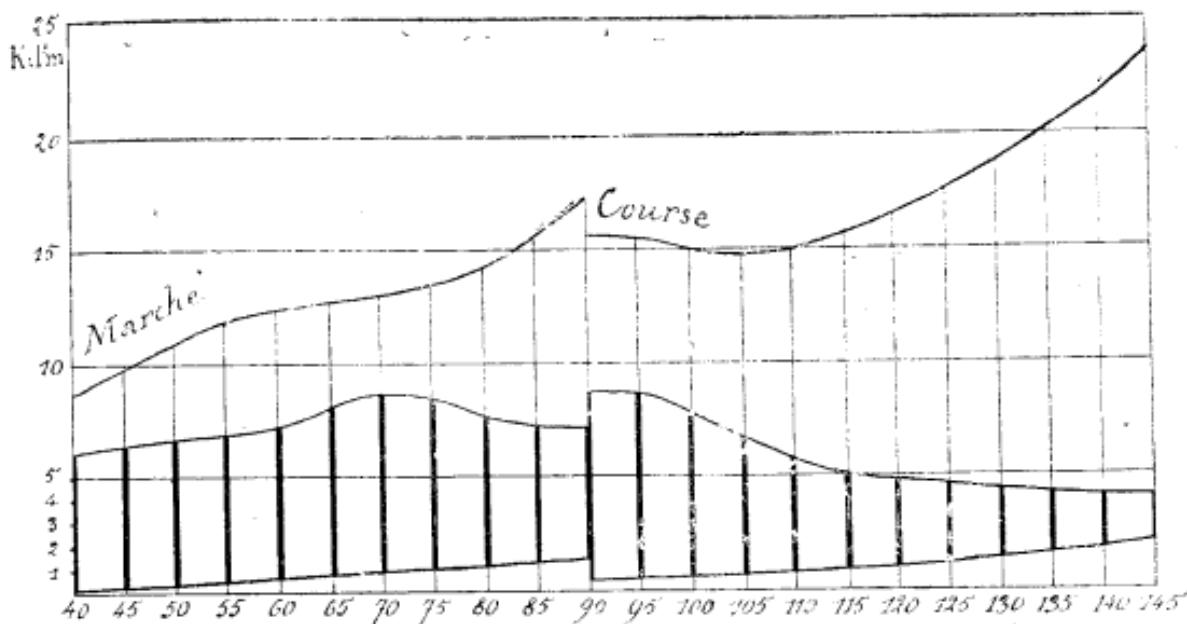


Fig. 114. — Courbes des différents éléments du travail dans la marche et dans la course à des cadences diverses de 40 à 145 pas à la minute. L'échelle placée à gauche de la figure exprime le nombre de kilogrammètres dépensés à chaque pas. Chacune des ordonnées est formée de trois tronçons superposés, représentant la valeur de chacun des éléments du travail total : le tronçon inférieur correspond au travail dépensé dans l'oscillation de la jambe ; le moyen, formé d'un trait épais exprime le travail dépensé dans l'oscillation verticale du corps ; le supérieur correspond aux accélérations et ralentissements de la masse du corps.

éprouve sous l'influence d'une accélération graduelle de la cadence des allures. Pour rendre ces variations plus saisissantes

de chacun des travaux élémentaires dépensés pour les oscillations du corps et des membres. Et si nous avons dit que la valeur ainsi obtenue représentait probablement un maximum, c'est que la force vive imprimée à notre corps dans le sens horizontal, et celle qui est imprimée à nos jambes à chacune de leurs oscillations, ne sont pas totalement amorties par des actions musculaires (une partie s'éteint dans le sol par des chocs et des frottements).

Ces forces vives sont peut-être en partie emmagasinées dans des organes réellement élastiques : nous voulons parler des tendons. Les vétérinaires ont soigneusement étudié l'amortissement du choc des pieds du Cheval sur le sol dans les allures vives ; ils ont constaté que le fléchisseur du doigt unique qui forme le pied de l'animal est formé en grande partie de *tissu élastique* : il jouit donc d'une propriété physique grâce à laquelle une partie plus ou moins importante de la

MAREY. — Le Mouvement.

sables, on les a ramenés (fig. 114) à la forme graphique.

Dans la construction de ces courbes on a pris pour abscisses les nombres de pas effectués à la minute. Pour les ordonnées, on a ajouté bout à bout des longueurs proportionnelles à chacun des éléments du travail total.

Pour toutes les cadences, ces valeurs sont disposées de bas en haut, suivant le même ordre : 1^o la valeur du travail, dépensé dans la translation du membre inférieur ; 2^o celle qui correspond aux oscillations verticales du corps ; 3^o celle qui est liée aux accélérations ou ralentissements de la translation horizontale.

Sur les courbes de la figure 114 les différents éléments du travail total varient de façons qui semblent bizarres ; mais ces variations s'expliquent aisément par certaines considérations cinématiques ou dynamiques propres aux différentes allures (1).

force vive amortie dans la chute sur les pieds est restituée gratuitement sous forme de travail. Ce sujet appelle de nouvelles études ; il sera curieux de chercher si les tendons de l'Homme présentent d'une manière notable cette élasticité précieuse et s'ils la gardent à tous les âges.

(1) Voici à cet égard un passage de la Note que nous avons présentée à l'Académie des Sciences, avec M. Demeny, le 9 novembre 1885 :

A. Variations du travail dépensé dans la translation du membre inférieur. — Le travail dépensé dans cet acte croît d'une manière sensiblement proportionnelle à l'accélération de la cadence ; mais un fait qui étonne au premier abord, c'est que, pour une même cadence, la course coûte moins de travail que la marche. Ainsi, à 90 pas à la minute, la marche dépenserait 1^{kgm}, 4 pour la translation du membre inférieur, tandis que la course n'en dépense que 0,5, et pourtant la vitesse absolue du membre dans la course est plus grande.

Cette différence de travail tient à ce que la vitesse du membre, par rapport au tronc, doit seule être considérée dans ces évaluations ; or, cette vitesse est plus grande dans la marche que dans la course.

En effet, à égale cadence du pas, la durée d'oscillation du membre inférieur est d'autant plus grande que celle de l'appui du pied est moindre. Cet appui, dans la marche, excède la moitié de la durée du pas complet ; dans la course, au contraire, la durée de l'appui est toujours inférieure à la moitié de celle du pas. Et comme le déplacement angulaire du membre inférieur est à peu près le même aux deux allures, la vitesse du membre sera moindre dans la course où la période d'oscillation aura plus de durée.

Une conséquence physiologique de cette inégalité de la durée d'oscil-

Applications pratiques. — De ces mesures on peut tirer des applications pratiques à la meilleure utilisation des forces musculaires dans la marche ou dans la course, suivant

l'attribution du membre aux différentes allures, c'est la tendance instinctive qu'on éprouve à courir aussitôt qu'on impose à l'allure une cadence trop rapide. C'est une des nombreuses manifestations de notre tendance naturelle à rechercher le moindre effort dans les actes musculaires.

B. *Variations du travail dépensé dans les oscillations verticales du corps.* — La figure 114 montre que cet élément du travail ne croît pas régulièrement avec la rapidité de la cadence. Dans la marche, ce travail augmente rapidement entre 55 et 70 pas à la minute, puis va en décroissant. Dans la course, il est très grand pour les cadences les plus lentes et diminue à mesure que l'allure devient plus rapide. Les deux facteurs de cet élément du travail étant le poids du corps et l'amplitude de ses oscillations verticales, c'est aux variations de cette amplitude que se rapportent les inégalités du travail dépensé aux diverses allures.

La Photographie et l'inscription directe des oscillations verticales montrent que, dans la marche, il y a une relation entre la longueur du pas et l'amplitude des oscillations verticales du corps ; et, comme nous avons établi que la longueur du pas augmente avec la rapidité de la cadence jusque vers 70 pas, puis diminue rapidement à mesure que la cadence s'accélère, il est naturel que le travail correspondant à ces différentes cadences éprouve des variations semblables. Ces rapports se trouvent représentés sur nos courbes.

Dans la course, le travail est plus grand pour les cadences lentes, et décroît ensuite indéfiniment. Les oscillations verticales suivent, dans cette allure, une variation semblable. Le corps, suspendu en l'air pendant une partie de la durée du pas de course, n'est plus constamment soumis aux changements de direction des membres ; dès lors, c'est la durée imposée aux oscillations verticales qui en règle l'amplitude. Aux cadences lentes, il faut que le corps ait été élevé très haut pour ne retomber que tardivement sur le membre à l'appui ; aux cadences rapides, une faible étendue est imposée à l'oscillation par la courte durée qui lui est assignée.

Ainsi, dans la marche, l'amplitude des oscillations verticales du corps est liée à la longueur du pas ; elle en est indépendante dans la course, où l'on observe même, à cet égard, une relation inverse : cette relation est clairement exprimée dans la figure 114.

C. *Variations du travail dépensé dans les accélérations et les ralentissements de la translation horizontale du corps.* — Cet élément du travail s'accroît assez régulièrement avec la vitesse de l'allure et avec la longueur du pas. Dans la course, il prend une valeur très grande, quoique les variations absolues de la vitesse soient faibles ; cela tient à ce que les variations de la force vive acquise ou perdue par la masse du corps sont proportionnelles à la différence des carrés des vitesses maxima et minima de translation.

le but qu'on se propose, et qui sera, tantôt de faire le plus long parcours possible avec la moindre dépense de force, tantôt de franchir une certaine distance dans le minimum de temps. On devra non seulement recourir à des allures différentes, mais régler chacune d'elles sur la cadence la plus favorable.

La figure 114 montrait déjà que, pour la marche, dans les cadences rapides, à partir de 70 doubles pas à la minute, la dépense de travail croît rapidement; que pour la course, le travail total, assez grand aux cadences les plus lentes, diminue d'abord quand la fréquence des pas s'accroît, puis augmente de nouveau. *Il y a donc, pour chaque allure, une cadence optimum: celle où la vitesse croît plus vite que la dépense du travail.*

D'autres considérations doivent intervenir encore pour motiver le choix d'une allure: il ne faut pas que la dépense de travail se fasse en un temps trop court, sans quoi la réparation des forces musculaires n'arriverait plus à compenser la fatigue. On peut impunément soutenir une marche de longue durée au bout de laquelle on aura dépensé un grand travail, tandis qu'une course rapide épouserait en très peu de temps la force musculaire, avec une dépense totale de travail beaucoup moindre.

Comme les études qui viennent d'être exposées n'ont été faites que sur un petit nombre de sujets, doués en général d'aptitudes physiques assez développées, on n'en pouvait rigoureusement appliquer les résultats à l'Homme moyen, au soldat par exemple. Des officiers supérieurs de notre armée ont pris intérêt à ces recherches et nous ont fourni le moyen de les répéter sur un assez grand nombre de soldats. Il s'agissait de reconnaître l'influence de la taille, du poids du sujet, de son équipement et de la charge qu'il portait.

Avec le concours de M. Demeny et du lieutenant A... nous avons repris ces recherches; les premiers résultats que nous avons obtenus ont fait l'objet d'un rapport au Ministre de la Guerre.

CHAPITRE X

LOCOMOTION DE L'HOMME

au point de vue artistique

SOMMAIRE. — Influence de la Photographie sur l'Art. — Caractères différents des œuvres anciennes et des œuvres modernes. — La Photographie saisit la vérité des attitudes. — Importance de la correction des reliefs musculaires dans la représentation des différents actes. — Images prises de différents points de vue : Photogrammes pris d'en haut. — Recherche des attitudes les plus visibles dans un mouvement. — Importance des séries d'images pour choisir les attitudes les plus expressives de l'acte qu'on veut représenter. — Analyse des expressions du visage. — Choix du meilleur procédé pour recueillir des documents artistiques.

Dans les Arts, le document photographique a déjà rendu des services réels : certains maîtres l'acceptent ouvertement ; beaucoup d'artistes l'utilisent, ainsi qu'on peut s'en assurer en comparant les œuvres les plus récentes à celles qui datent de quelques années à peine. C'est la Photographie instantanée surtout qui a exercé une influence sensible sur les Arts, en permettant de fixer, en une image authentique, des phénomènes de peu de durée, comme le mouvement des vagues de la mer, ou bien les attitudes de l'Homme et des animaux dans leurs mouvements les plus rapides.

Nous ne sommes pas qualifié pour parler ici d'esthétique, encore moins pour discuter la question de savoir si l'Art a le droit de représenter les actions violentes, ou s'il doit se restreindre aux attitudes paisibles dont les caractères et les expressions sont plus faciles à saisir sur le modèle vivant

Mais si l'on s'en tient aux faits, il est incontestable que, dans l'antiquité aussi bien que de nos jours, les artistes ont maintes fois représenté le mouvement, même dans ses actions les plus rapides, telles que la course et le combat. Or, si l'on compare les œuvres les plus anciennes à celles d'époques plus récentes, on est frappé de cette différence, que chez les modernes les attitudes sont plus calmes, plus

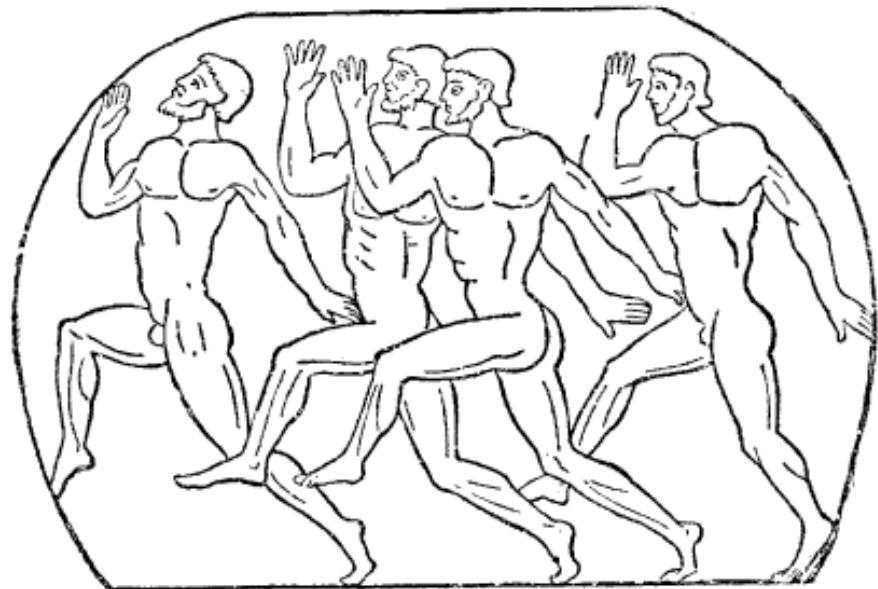


Fig. 115. — Odydromes ou coureurs de vitesse : décoration d'un vase panathénaïque.

équilibrées, pour ainsi dire, tandis que dans l'Art antique, les figures sont parfois franchement hors d'aplomb. La figure 115, empruntée à l'Art grec, présente nettement ce caractère.

Chacun a gardé le souvenir de quelque œuvre moderne représentant un sujet analogue. En sculpture surtout, les coureurs sont tout autrement représentés de nos jours : la jambe à l'appui s'y voit d'ordinaire verticalement étendue au-dessous du centre de gravité du corps, tandis que le membre au levé est fortement lancé en arrière.

Entre ces deux manières d'exprimer le même acte, la course, il ne saurait être interdit de prendre pour arbitre la Nature elle-même, et de demander à la Photographie instantanée de montrer les vraies attitudes d'un coureur.

La réponse n'est pas douteuse : la figure 116, par exemple, montre qu'un Homme qui court offre, à certains moments.

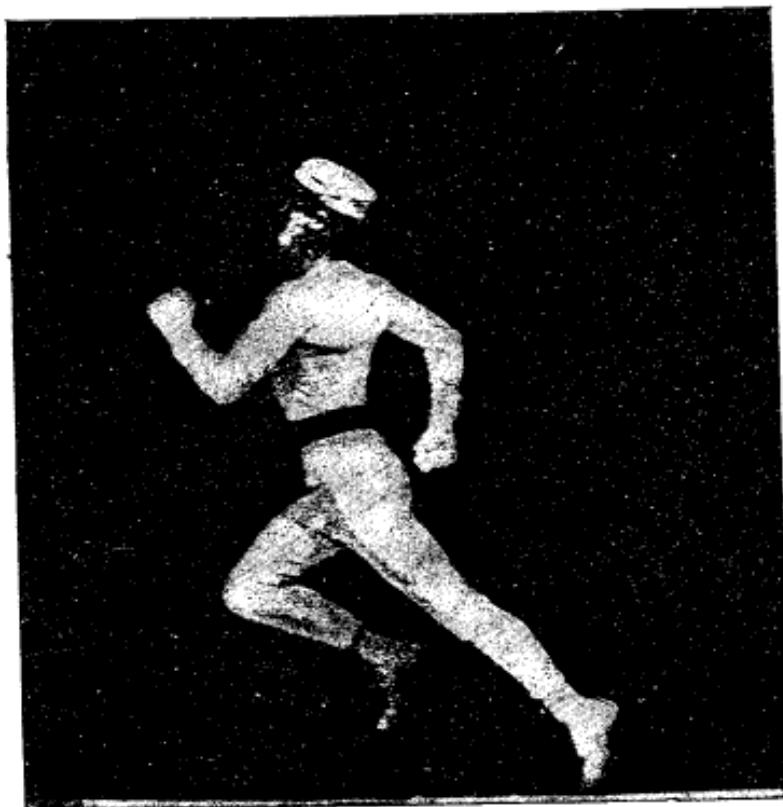


Fig. 116. — Photogramme instantané d'un coureur; la position des jambes est la même que sur la dernière image à gauche de la figure précédente.

l'aspect représenté dans les plus anciennes peintures (1).

On pourrait démontrer que le coureur ne se présente

(1) Le groupe représenté sur le vase grec présente toutefois quelque chose de fort singulier dans les allures des coureurs. On sait que, dans toutes ses allures, l'Homme déplace en sens inverse le bras et la jambe du même côté ; les mouvements du bras et de la jambe correspondants sont, comme on dit, associés diagonalement. Or, sur le vase dont nous reproduisons les dessins, on voit partout que le bras et la jambe du même côté se meuvent dans le même sens. Cette allure, qui rappelle celle de l'amble des quadrupèdes, était-elle vraiment pratiquée dans les courses du stade ? Est-elle due à une erreur de l'artisan qui a décoré le vase ? Nous ne saurions trancher cette question. Cette manière de courir s'éloigne entièrement de nos habitudes modernes ; elle ne semble toutefois pas impossible au point de vue physiologique. Le sujet mérite d'être étudié.

jamais dans la position adoptée par certains artistes modernes qui semblent avoir oublié que le caractère de la course, et celui de la marche elle-même, est une perpétuelle instabilité.

Nous ne nous arrêterons pas à ces réflexions. En critiquant sur des points de détail des œuvres qui, d'ailleurs, ont une valeur réelle, nous craindrions l'avertissement : *Ne, sutor, ultra crepidam.*

Faisons remarquer seulement que, dans l'infinie variété

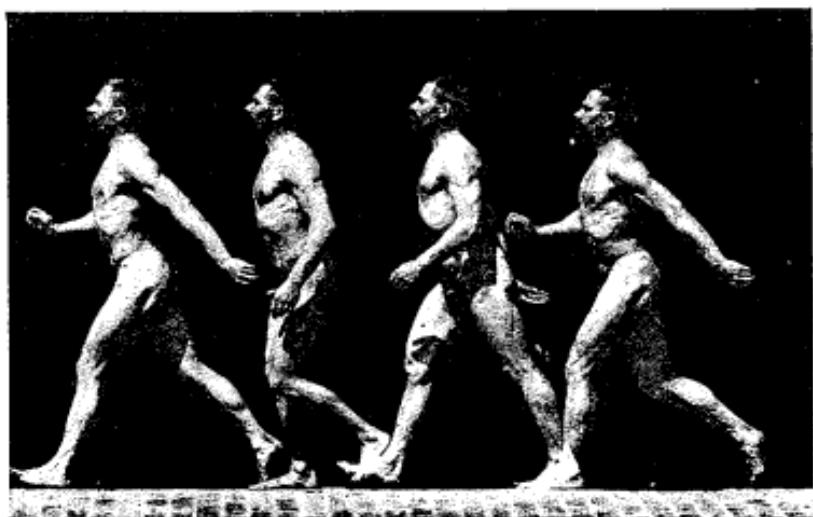


Fig. 117. — Un Homme qui marche : attitudes successives données par la Chronophotographie sur plaque fixe.

des attitudes que montre la Chronophotographie suivant les phases d'un mouvement, il en est certainement plusieurs que les artistes pourraient accepter sans enfreindre les lois de l'esthétique; cela donnerait à la représentation de ces mouvements une variété intéressante. Ainsi la figure 117, où l'on voit un marcheur nu, montre une série d'attitudes parmi lesquelles plusieurs pourraient être admises dans une œuvre d'art; il en est de même de la figure 118, qui représente une course de vitesse. Sur ces documents les artistes trouveraient aussi l'expression fidèle de l'action des muscles dont les reliefs variables, visibles sous la peau, traduisent l'état de contraction ou de relâchement. Or, ces deux états-

opposés des muscles sont liés par des rapports nécessaires avec chaque phase du mouvement qu'ils produisent.

Les reliefs des muscles en action ont pour ainsi dire une physionomie propre, une expression pareille à celle que nous savons reconnaître sur les muscles d'un visage. Et si les données les plus subtiles de la Physiologie pouvaient trouver leurs applications à l'Art, on pourrait dire que le

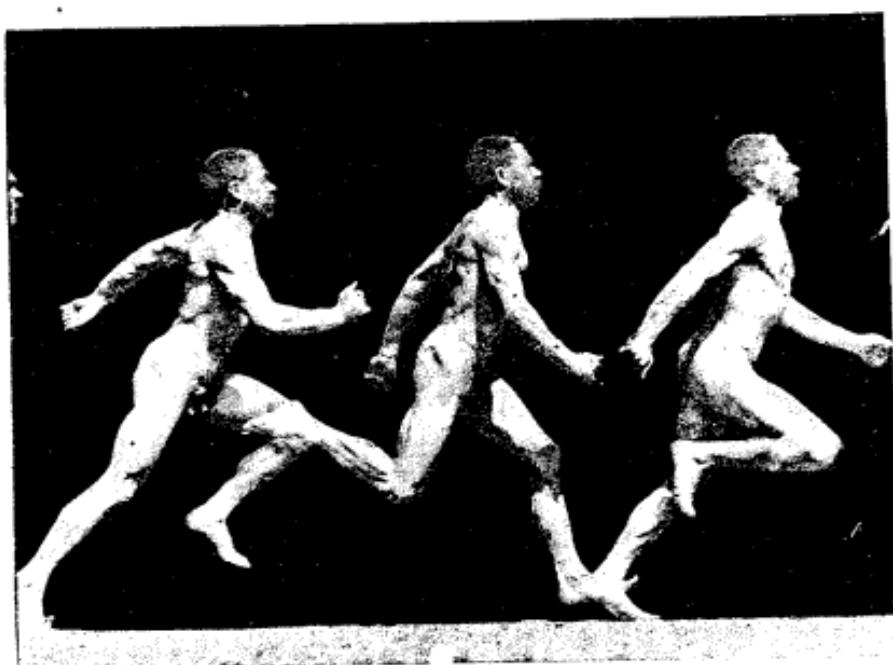


Fig. 118. — Exemple du modelé obtenu sur une épreuve chronophotographique.

modelé d'un membre ne traduit pas seulement l'acte qui s'exécute, mais permet, jusqu'à un certain point, de prévoir les actes qui vont suivre. D'intéressantes expériences de M. Demeny montrent que l'extension d'un bras qui frappe, si elle doit s'achever complètement, s'accompagne du relâchement complet des muscles fléchisseurs ; ces muscles au contraire entrent en jeu pendant l'extension, même si ce mouvement doit être borné : si, par exemple, l'Homme qui frappe porte le coup avec l'intention de le retenir.

Sur les quatre figures suivantes, l'expression des reliefs

musculaires pour une même attitude est différente suivant la nature de l'acte qui l'a produite.

Ainsi les figures 119 et 120 représentent toutes deux un bras demi-fléchi, mais sur la première le relief du biceps (muscle



Fig. 119. — Bras qui se fléchit.



Fig. 120. — Bras qui s'étend.

fléchisseur) montre que c'est la flexion qui est en train de s'opérer. Sur la seconde c'est le triceps (extenseur) qui a le plus de relief, tandis que le biceps est affaissé : l'attitude



Fig. 121. — Mouvements alternatifs de flexion et d'extension.

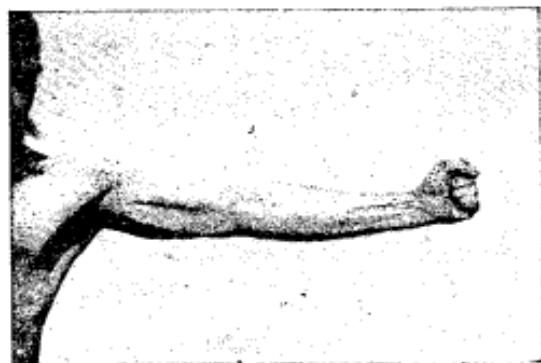


Fig. 122. — Mouvement unique d'extension brusque (coup de poing).

représentée correspond donc à une phase de l'extension du membre.

Dans un mouvement alternatif, les muscles antagonistes sont tous deux en action : si l'extension du bras va être suivie de flexion (fig. 121), en même temps que le triceps agit, le biceps

est déjà contracté pour entrer en action tout à l'heure et pour arrêter la vitesse du bras qui s'étend.

Si le coup est frappé l'une façon définitive, comme dans un coup de poing lancé à fond (fig. 422), aussitôt le membre étendu, les muscles n'ont plus rien à faire et tombent en relâchement.

Pour les besoins de la statuaire, le modèle doit être vu sous des aspects différents. En prenant d'un lieu élevé les

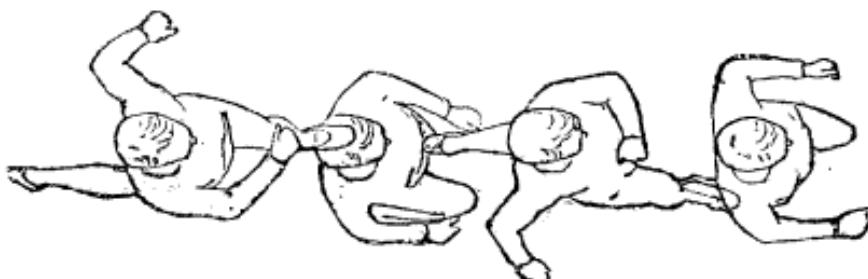


Fig. 423. — Coureur chronophotographié d'un lieu élevé, en projection horizontale.

images chronophotographiques d'un Homme en mouvement (fig. 423), on a la projection, sur un plan horizontal, de tous les contours de son corps. Ce document, de même que ceux qui fourniraient des images analogues prises sous différents angles, serait sans doute fort utile aux sculpteurs (1).

En dehors de toute prétention artistique on a souvent besoin du modelage pour représenter, sous les trois dimensions, les attitudes d'un Homme ou d'un animal en mouvement. Nous avons, par exemple, souvent recouru à cette méthode pour nous rendre compte, d'après plusieurs photogrammes

(1) Il y a longtemps déjà qu'on a proposé sous le nom de Photosculpture un procédé pour reproduire mécaniquement les formes générales d'un individu. On place le sujet au centre d'un cercle sur la circonference duquel une série d'appareils photographiques sont disposés. Chacun de ces appareils prend, au même moment, une image du sujet qui se trouve ainsi représenté sous des angles différents. Chacune de ces images, agrandie à l'échelle convenable et appliquée sur une lame de métal, est ensuite transformée en une sorte de gabarit. En faisant passer la matière plastique, successivement par chacun de ces gabarits présenté sous l'angle qui lui correspond, on obtient une maquette extrêmement précise au point de vue de l'attitude, et à laquelle le sculpteur donnera le modelé définitif.

simultanés des attitudes des ailes et du corps d'un Oiseau à

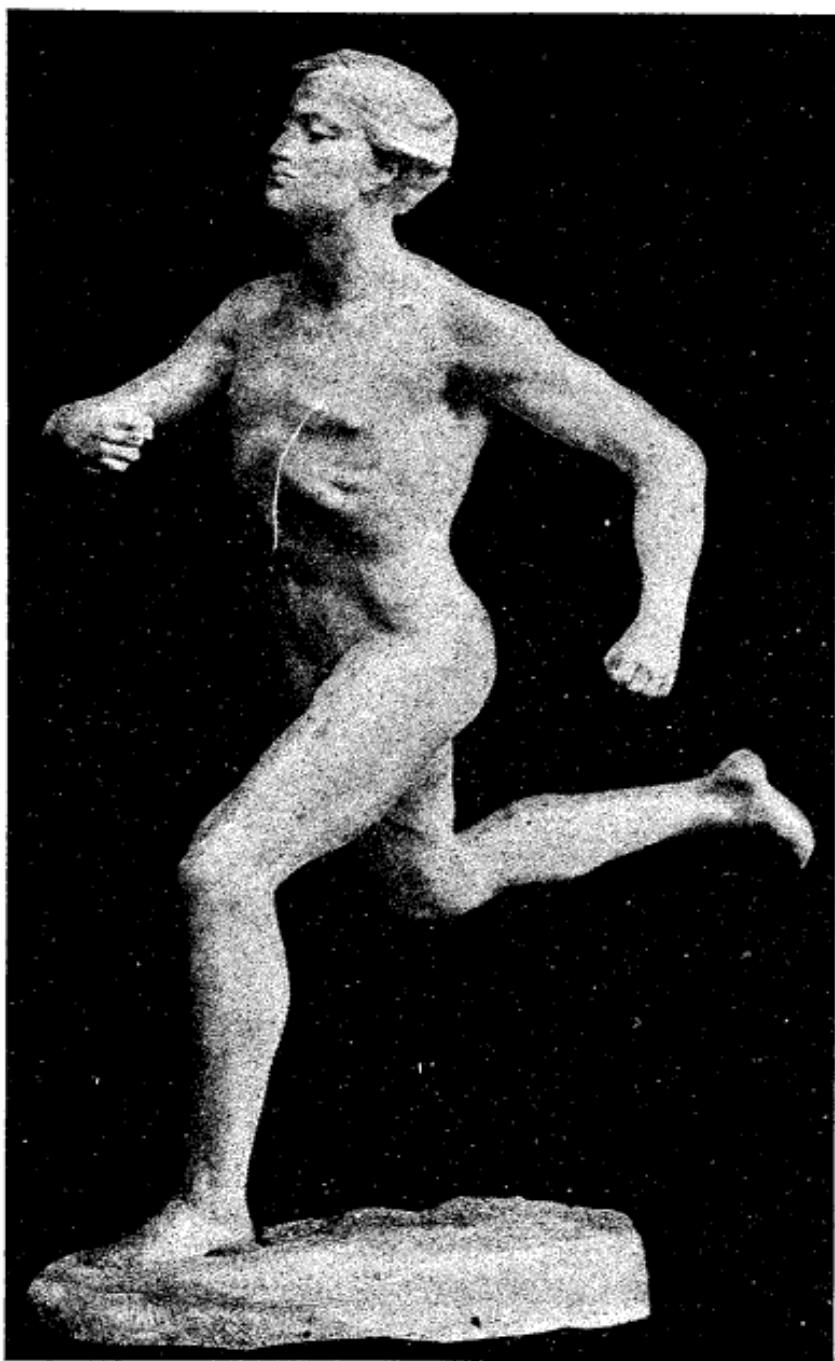


Fig. 124. — Statuelle faite d'après des épreuves chronophotographiques.

certains instants de son vol. Et nous désirions vivement qu'un artiste voulût bien consacrer son talent à représenter

avec des documents de ce genre, un coureur par exemple au moment où l'un de ses pieds vient toucher le sol.

M. Engrand a bien voulu se conformer à ces conditions et a fait la statuette dont la figure 124 est la représentation par la *simili gravure*. L'attitude est très différente de celle que l'Art a coutume de représenter : le pied qui touche le sol est fort en avant du centre de gravité, de sorte que le choix de cette attitude créerait peut-être une difficulté matérielle d'exécution en sculpture, à cause du défaut d'équilibre qui en résulterait pour la statue. Mais alors, pour concilier cette exigence avec l'exactitude physiologique, il faudrait choisir l'attitude correspondant à la deuxième image de la figure 118 où le centre de gravité passe exactement au-dessus de la base de sustentation. A ce moment, la jambe au levé n'est jamais portée en arrière, mais croise la direction de celle qui soutient le poids du corps.

On observe cette attitude dans toutes les allures de l'Homme, aussi bien dans la marche que dans la course, avec cette différence, que, dans la marche, les articulations sont beaucoup moins fléchies.

Recherche des attitudes les plus visibles dans un mouvement. — Dans la représentation du mouvement, l'artiste se préoccupe avec raison de montrer ce que l'œil est capable de voir sur l'Homme en action. C'est, en général, la phase préparatoire et la fin du mouvement qui s'aperçoivent le mieux.

De même qu'une machine en marche ne laisse voir certains de ses organes qu'aux *points morts*, c'est-à-dire à ces courts instants où le mouvement s'achève dans un sens, et va recommencer en sens contraire, de même dans certains actes de l'Homme, il y a des attitudes qui durent plus longtemps que d'autres. Or, la Chronophotographie sur plaque fixe pourrait servir à les déterminer. Ces attitudes se reconnaissent, dans les images, à ce qu'elles laissent sur la plaque sensible une trace plus intense, ayant impressionné la plaque pendant plus longtemps.

Ainsi, dans la figure 125, représentant un Homme qui donne un coup d'épée, la plupart des images sont vagues et confuses, tandis que deux d'entre elles se dégagent nettement : l'une, quand l'Homme se prépare à porter le coup, et l'autre lorsque, fendu à fond, il a allongé le bras jusqu'à la dernière limite.

Un boxeur a donné également deux images particulièrement nettes qui ont servi à dessiner la figure 42 (1).

Dans tous les actes possibles, tels que tirer sur une corde, soulever un fardeau, tourner une roue, pousser une voiture, etc., il y a pour l'Homme (2) de ces attitudes plus durables que les autres et qu'on pourrait appeler les instants visibles. La Chronophotographie sur plaque fixe les déterminera avec la plus grande précision.

Importance des séries d'images successives pour y choisir les attitudes qui expriment le mieux l'acte qu'on veut représenter. — Si la représentation d'un mouvement devait toujours se faire d'après la phase la plus lente, l'Art serait réduit à une grande pauvreté d'expressions. Une sorte de *canon* des attitudes viendrait s'ajouter à celui des proportions du corps. Gêné par ces entraves, l'artiste perdrait toute originalité; il doit au contraire, tout en imitant la Nature, faire, entre les objets qu'elle lui offre, son choix personnel.

Parmi les nombreuses images que nous avons obtenues, quelques-unes nous ont paru particulièrement expressives, il nous semble qu'un artiste les eût choisies entre toutes les autres. Ainsi les figures supérieures de la planche I prises sur une longue série représentent à nos yeux, avec toute l'énergie qu'il comporte, l'acte d'asséner un grand coup de bâton. Par son énergie même, l'acte représenté entraîne la

(1) Ces deux figures sont empruntées à un article de M. Demeny sur les exercices physiques étudiés par la Chronophotographie. Journal *La Nature* 11 oct. 1890.

(2) Nous montrerons à propos de la locomotion des quadrupèdes que, sur le Cheval par exemple, ces phases de moindre vitesse n'existent jamais pour tous les membres à la fois.

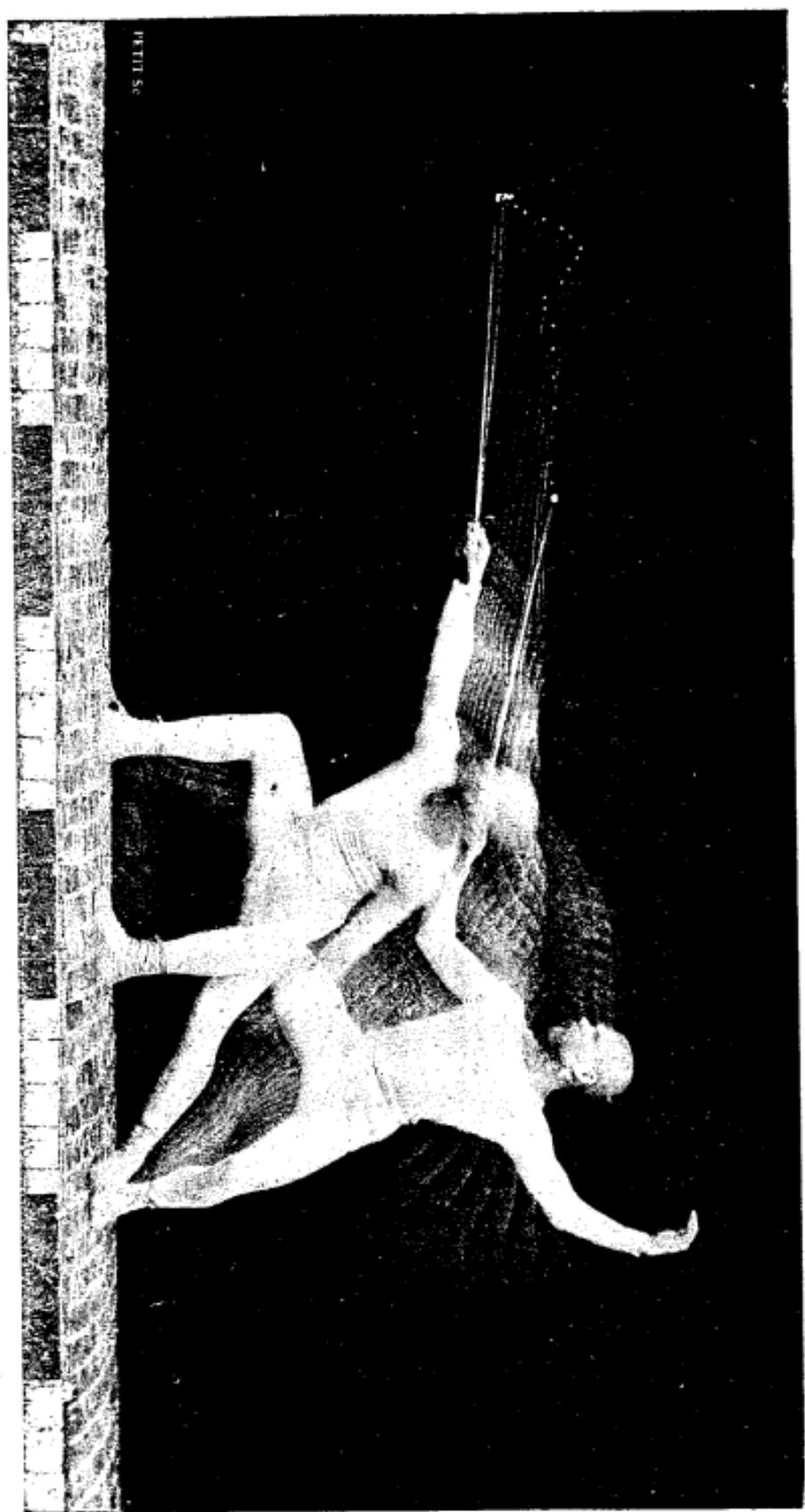


Fig. 125. — Un coup d'épée. (Chronophotographie sur plaque fixe).*

contraction d'un grand nombre de muscles. On peut même dire que tous, à ce moment, sont en contraction, par un effort synergique. Il n'en serait pas de même dans un acte plus calme, dans un mouvement plus limité.

Dans un acte lent comme celui d'un Homme qui s'assied sur le sol, puis s'y étend pour se reposer, la Chronophotographie livre encore au choix de l'artiste une série d'attitudes dont quelques-unes ont été représentées en bas de la planche I. Les figures de cette planche ont été reproduites à l'encre grasse qui donne plus de finesse dans le rendu, et n'ajoute pas au modelé des ombres ces hachures qui les altèrent plus ou moins, mais qui sont nécessaires pour le tirage typographique.

Chronophotographie des expressions du visage. — Avec notre appareil, qui n'a qu'un seul objectif, on peut photographier un sujet de près, sans qu'il y ait changement de perspective pour les différentes images successives. Il est donc le seul, jusqu'ici, qui permette de recueillir des séries d'images représentant, avec tous leurs détails, les expressions changeantes du visage, les mouvements de la main dans différents actes, les déroulements du pied sur le sol dans la marche, etc.

Il sera sans doute intéressant de suivre ainsi toutes les transitions entre un sourire à peine perceptible et le rire le plus franc, de saisir les caractères de la physionomie qui expriment l'étonnement, la colère et les différentes émotions.

La grande difficulté est de rencontrer un modèle capable de rendre avec naturel ces expressions variées ; sur la plupart des sujets on n'obtient qu'un rictus ou une grimace. Des acteurs de talent rendraient sans doute plus fidèlement les différentes émotions que doit traduire le visage ; peut-être même trouveraient-ils profit à contrôler par cette méthode leurs jeux de physionomie.

Mais ce que la Chronophotographie donne parfaitement, ce sont les mouvements qui accompagnent l'articulation de la parole. M. Demeny s'est attaché d'une manière spéciale

à ces applications de notre méthode ; il a obtenu un véritable succès. Avec une lumière intense et convenablement dirigée, il a montré jusqu'aux mouvements de la langue dans l'articulation des différentes consonnes. Son étude au point de vue phonétique est précieuse, et même, au point de vue pratique, elle semble devoir servir pour l'éducation des sourds-muets.

On sait qu'une ingénieuse méthode d'éducation des sourds-muets consiste à leur apprendre à lire sur les lèvres des personnes qui parlent et à suivre ainsi toute une conversation. Il était curieux de savoir si des sourds-muets saisiraient sur une série d'images la suite des mots articulés par le modèle qu'on avait photographié. L'expérience a donné des résultats très satisfaisants, des sourds-muets ont lu sur les Chronophotogrammes les paroles qui avaient été prononcées (1). Inutile de dire que, sans une éducation spéciale, on ne saurait déchiffrer ce nouveau genre d'écriture.

Et maintenant que peut-on espérer, au point de vue artistique, de la représentation des mouvements de la parole ? Les peintres jusqu'ici ne paraissent pas s'en être préoccupés ; dans les scènes les plus animées, c'est par l'expression générale des traits qu'ils font comprendre ce que leurs personnages doivent dire. La statuaire procède de même en général ; toutefois Rude a essayé deux fois au moins de représenter, sinon la parole, du moins le cri d'imprécaction ou de commandement.

Nous avons eu la curiosité de voir quelles expressions prendraient les traits d'un Homme poussant à pleine voix une interjection. Le gardien de la Station physiologique fut le sujet de l'expérience : placé devant l'objectif, il nous appela d'une voix forte plusieurs fois de suite. La série des images qu'on obtint montrait en effet la répétition périodique des mêmes aspects du visage, mais si étrangement contracté, que cela semblait une suite de grimaces fort laides. Et

(1) *C. R. de l'Académie des Sciences*, t. CXIII, p. 216, 1891.

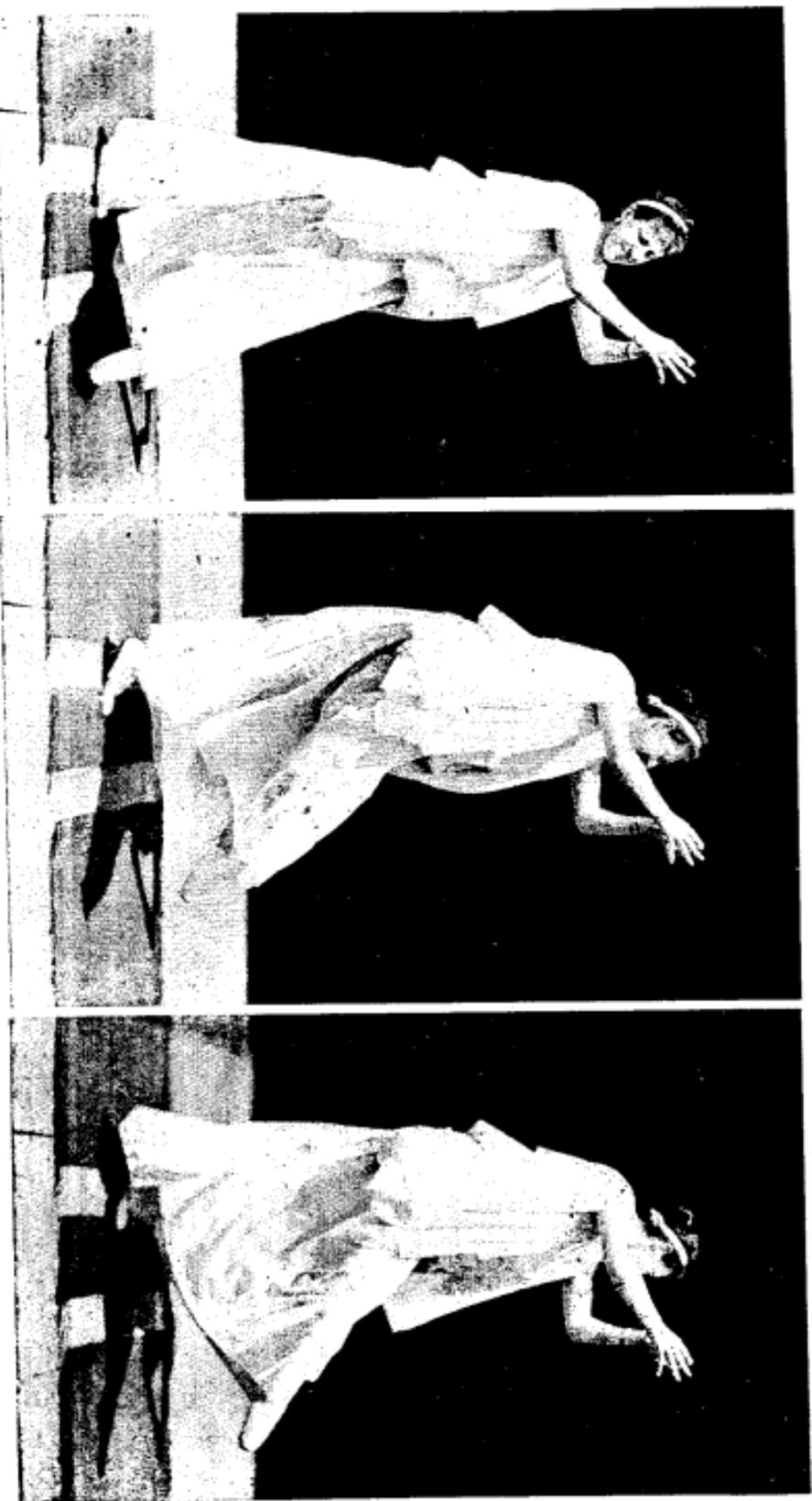


Fig. 126. — Attitudes successives d'une danse grecque et mouvements imprimés aux draperies (Similigravure).

pourtant, à le voir parler, cet Homme n'avait rien d'extraordinaire dans son expression.

L'étrangeté des images tient donc à ce qu'elles ont fixé des états extrêmement passagers du visage, des mouvements qui, sur la Nature, se fondent par des transitions graduelles et dont aucun ne nous apparaît isolément. Et en effet, plaçons ces mêmes images dans un Zootrope et regardons-les passer devant notre œil pendant que l'instrument tourne avec une vitesse convenable; toute l'étrangeté disparaît, et nous ne voyons plus qu'un Homme qui parle de l'air le plus naturel.

Qu'est-ce à dire? Le laid ne serait-il que l'inconnu, et la vérité blesserait-elle nos regards quand nous la voyons pour la première fois?

Nous nous sommes bien souvent posé cette question en examinant les photogrammes instantanés de Chevaux à des allures rapides. Ces poses, révélées par Muybridge, ont d'abord paru invraisemblables, et les peintres qui, les premiers, ont osé les représenter ont étonné le public plus qu'ils ne l'ont charmé. Mais peu à peu il s'est familiarisé avec ces images qui circulaient dans toutes les mains; elles ont appris à trouver sur la Nature des attitudes qu'on ne savait pas voir; on est déjà presque froissé d'une incorrection légère dans la représentation du Cheval en mouvement.

Jusqu'où ira cette éducation de l'œil? Quelle influence aura-t-elle sur l'Art? L'avenir seul le montrera.

Mouvements des draperies. — La disposition des draperies avait une grande importance dans l'Art antique. Dans les chefs-d'œuvre de la peinture et de la sculpture qui nous sont parvenus, les plis des étoffes sont représentés avec tant de conscience qu'ils ont permis de reconstituer la forme des différentes pièces du vêtement chez les Grecs et chez les Romains. Notre confrère Heuzey a poussé fort loin cette étude et inauguré à l'École des Beaux-Arts un enseignement spécial, grâce auquel nos jeunes artistes apprennent à draper leur modèle avec correction et élégance.

La figure 126 montre une femme vêtue à la grecque et reproduisant les balancements du corps d'une danse antique ; la figure 127 montre la même femme roulée dans son pallium et tournoyant dans une sorte de valse.

M. Maurice Emmanuel, qui prépare un important travail sur la danse dans l'antiquité, nous a prié de fixer par la



Fig. 127. — Attitudes imitées de danses grecques et modelés des draperies.

Photographie instantanée certaines attitudes qu'il a relevées, soit sur des bas-reliefs, soit sur des vases grecs. Sur ces images photographiques on saisit, dans son ensemble, l'harmonie des plis du costume avec l'expression particulière que leur donne le mouvement de la danse.

La succession même d'une phrase de Chorégraphie se peut suivre dans une série d'images chronophotographiques, mais l'exiguïté du format de ce livre ne permet de représenter qu'un petit nombre d'images, figure 126. On conçoit aisément quelle variété d'attitudes pourraient être fixées sur

une longue bande pelliculaire, sur laquelle on suivrait toutes les phases du mouvement du modèle et qui offrirait au choix de l'artiste des poses plus ou moins expressives et gracieuses.

Des procédés à choisir pour recueillir des documents artistiques. — Les deux formes de la Chronophotographie se prêtant à la prise des images artistiques; les figures 117 et 118 recueillies sur plaque fixe offrent leur intérêt, car elles expriment clairement les rapports de succession d'une attitude à une autre. Les images sur plaque mobile peuvent être plus fréquentes pour les raisons exposées au chapitre vii, elles donnent donc une plus grande variété dans les attitudes représentées. En outre elles permettent d'opérer devant un fond quelconque; et si nous avons le plus souvent adopté le fond noir, c'est que les figures nous semblaient ressortir avec plus de vigueur. Devant un champ clair certains contours de la figure se détachent mal du fond (Pl. I, images inférieures).

Mais devant le champ obscur il faut avoir bien soin que la lumière ne soit pas trop exclusivement concentrée sur une face du modèle, sans quoi les parties qui se trouvent dans l'ombre se confondraient avec le fond noir.

D'autre part, en opérant devant un champ de couleur claire, si le modèle est au soleil, il projettera sur ce champ des ombres violentes et parfois bizarres qu'il est bon d'éviter. On y arrive en plaçant le champ assez loin du modèle pour que son ombre n'y arrive pas et se perde sur le sol. Les photographes habiles connaissent à fond toutes les conditions d'éclairages capables de mettre en valeur le modelé des sujets qu'ils reproduisent (1).

(1) Il n'est pas jusqu'à la matière sur laquelle sont obtenues les épreuves qui n'influe sur leurs qualités artistiques. Le miroitement des photogrammes ordinaires les rend mal visibles sous certains éclairages. Quant aux reproductions sur papier, les différents modes d'impression sont d'inégales valeurs.

Pour la typographie, la similigravure est un de ceux qui donnent les meilleures épreuves, mais il n'atteint pas la perfection des tirages aux encres grasses. Les planches qu'on trouvera à la fin de ce livre et qui

sont dues à MM. Berthaud nous semblent avoir toutes les qualités désirables. Aussi nous sommes-nous adressé à ces habiles artistes pour le tirage d'un album dont nous avons commencé la publication avec M. Demeny et qui est destiné à donner aux peintres et aux sculpteurs un choix d'attitudes pour les divers mouvements de l'Homme et de quelques animaux.

Déjà Muybridge et Anschütz ont publié des figures de ce genre ; nous espérons que les nôtres auront des qualités particulières tenant à la façon dont elles ont été obtenues. (*Physiologie artistique*. Paris, Société des éditions scientifiques, 1892.)

CHAPITRE XI

LOCOMOTION DES QUADRUPÈDES

SOMMAIRE. — La Chronographie montre la succession des appuis et levés des pieds du Cheval aux différentes allures. — Transition ou passage d'une allure à une autre. — Représentation des attitudes du Cheval à toutes les allures, d'après la Chronographie et les pistes. — Comparaison des figures dessinées d'après ces documents avec celles que donne la Photographie instantanée. — Application de la Chronophotographie à la représentation du Cheval en mouvement. — Représentation artistique du Cheval dans l'antiquité. — Locomotion du Cheval au point de vue de la Physiologie des mouvements. — Chronophotographie géométrique des mouvements d'ensemble ; mouvements partiels du pied et du boulet.

De tous les animaux quadrupèdes, c'est le Cheval qui est le mieux connu au point de vue de la locomotion. Depuis longtemps des hommes spéciaux se sont appliqués à étudier ses allures, franches ou défectueuses, et à définir les caractères de chacune d'elles d'après l'ordre dans lequel chacun des pieds frappe le sol. Mais, ainsi que nous l'avons déjà dit, si précis que soit le coup d'œil d'un homme exercé, il est encore insuffisant : nous n'en voulons pour preuve que les incertitudes et les divergences d'opinion des différents auteurs relativement au caractère et au mécanisme de certaines allures du Cheval. Aussi, croyons-nous que la Méthode graphique a rendu un service en précisant plus exactement chaque allure et en montrant comment se fait la transition de l'une à l'autre.

Ce qui rend si difficile l'observation des allures, c'est qu'il faut suivre à la fois les mouvements des quatre membres. Toutefois, la question se simplifie beaucoup si

l'on considère un quadrupède comme formé de deux êtres bipèdes marchant l'un derrière l'autre et alternant de diverses manières la cadence de leurs pas. Que deux Hommes se placent ainsi, le premier reproduira les mouvements de l'avant-main d'un Cheval, le second ceux de l'arrière-main ; qu'ils fassent tous deux, en un temps donné, le même nombre de pas, mais qu'ils alternent de diverses façons les mouvements de leurs membres, ils pourront imiter toutes les allures d'un quadrupède.

Nous avons donné au chapitre 1^{er} un exemple du genre de notation qui représente la succession des appuis et levés des membres d'avant et d'arrière d'un Cheval, à l'amble, au pas, au trot et au galop ; la figure 428 montre le tableau complet de toutes les allures marchées et fait voir comment elles dérivent les unes des autres. De l'allure de l'*amble* on peut arriver à celle du *trot* en passant par toutes les autres.

Dans l'ordre où ces notations se suivent (de haut en bas dans la figure 428), chacune diffère de celle qui la précède par une légère anticipation du mouvement des pieds d'arrière sur ceux d'avant. La légende qui accompagne ces notations suffit, à elle seule, pour montrer quel désaccord régnait entre les divers auteurs relativement à la définition de chacune des allures.

Nous ne citons que brièvement ces études de Chronographie, voulant seulement en montrer le principe (1). Pour en faire ressortir l'utilité, nous dirons que ces expériences ont mis un terme à la plupart des discussions qui régnait sur les allures du Cheval, et nos résultats croyons-nous, sont admis par tous les auteurs.

Transition ou passage d'une allure à une autre. — C'est une grande difficulté, pour un observateur, de saisir comment se fait le passage d'une allure à une autre. La Chronographie traduit ces passages d'une façon très claire ;

(1) Voir, pour l'analyse des allures, *La Machine animale*, p. 140-186.

c'est un des avantages pratiques les plus appréciables de

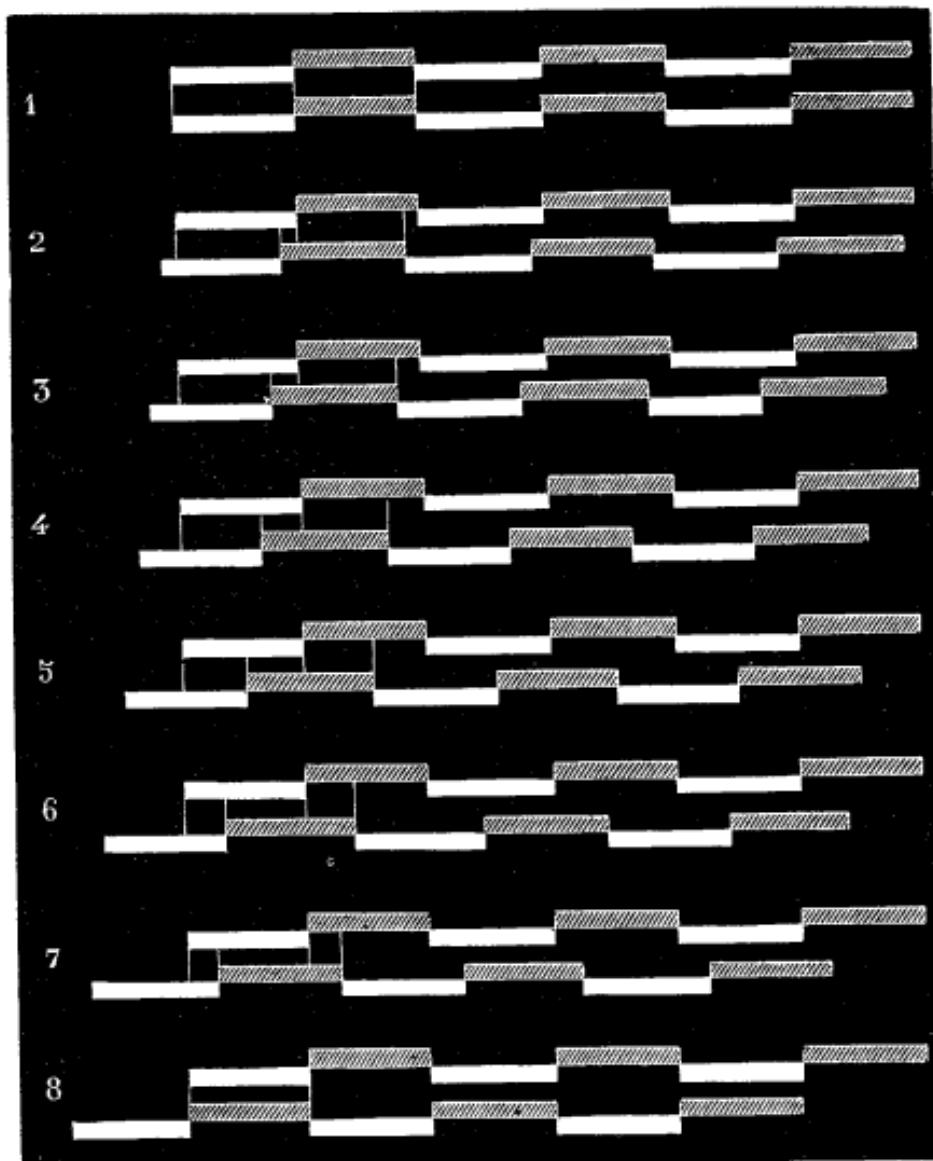


Fig. 128. — Notations synoptiques des allures du Cheval d'après les auteurs.

- | | | |
|-------------------|--|--|
| N ^o 1. | Aamble pour tous les auteurs. | cent et Goiffon, Solleysel, Colin. |
| N ^o 2. | Amble rompu, d'après Merche.
Pas relevé, d'après Bouley. | N ^o 6. Pas normal, d'après Raabe. |
| N ^o 3. | Pas ordinaire du <i>Cheval d'allure</i> ,
d'après Mazure.
Amble rompu, d'après Bouley.
Traquenard, d'après Lecoq. | N ^o 7. Trot décousu. |
| N ^o 4. | Pas normal, d'après Lecoq. | N ^o 8. Trot ordinaire. (Dans la figure, on suppose que l'animal trotte sans quitter jamais le sol, ce qui n'arrive que rarement. La notation ne rend compte que du rythme des battues.) |
| N ^o 5. | Pas normal, d'après Bouley, Vin- | |

cette méthode. Revenons à la comparaison des deux mar-

cheurs qui se suivent; leurs pas alternent ou concordent d'une certaine façon, et l'ensemble de leurs mouvements reproduit l'allure d'un quadrupède. Si, maintenant, l'un



Fig. 129. — Transition du pas au trot; notation chronographique, se lisant de gauche à droite.

des marcheurs précipite ou ralentit un instant sa cadence pour la reprendre l'instant d'après, le rapport sera



Fig. 130. — Transition du trot au pas.

changé, et le groupe des deux marcheurs aura passé d'une allure à une autre. C'est de cette façon qu'un soldat dont



Fig. 131. — Transition du trot au galop à 3 temps.

le pas est en désaccord avec celui de ses camarades exécute un petit sautilement pour reprendre la cadence commune.



Fig. 132. — Transition du galop à 3 temps au trot.

Nous avons noté par la Chronographie quelques-unes de ces transitions. Ainsi la figure 129 représente celle *du pas au trot*. Indépendamment de l'accélération générale de la

cadence, cette transition est produite par une anticipation du mouvement des pieds d'arrière. Ainsi, la battue postérieure gauche PG, qui, pendant le *pas*, s'effectuait sensiblement au milieu de l'appui du membre antérieur droit AD, arrive graduellement à une période de moins en moins avancée de cet appui, jusqu'à ce que ces deux battues viennent à coïncider: le *trot* est alors établi. Pour rendre plus facile à saisir sur la figure le changement graduel de succession de ces deux appuis diagonaux, on en a réuni les notations l'une à l'autre par des lignes qui marquent le commencement de chaque battue. Ces lignes, d'abord très écartées dans le *pas*, se rapprochent peu à peu et finissent par se confondre en un synchronisme parfait des battues diagonales, ce qui caractérise le *trot* (1).

Positions successives des pieds indiquées par leurs empreintes sur le sol. — Si la Chronographie est parfaite pour exprimer les successions de temps dans les appuis des pieds du Cheval, elle ne renseigne pas sur le lieu où chaque pied

(1) On a noté de la même manière les autres transitions :

La *transition du trot au pas* s'effectue par un mécanisme inverse de celui qui vient d'être décrit: elle se fait par anticipation graduelle des mouvements du pied d'arrière, avec ralentissement de la cadence générale (fig. 130). Une ligne ponctuée, qui réunit les battues diagonales gauches, est verticale d'abord et exprime que, dans le *trot*, ces battues se confondent; cette ligne devient de plus en plus inclinée pendant la transition, montrant ainsi comment le synchronisme fait place à un retard de l'arrière-main sur l'avant-main.

La *transition du trot au galop* est très curieuse: on voit, au début de la figure 131, que le *trot* est déjà un peu décousu; la ligne ponctuée qui réunit les battues diagonales AG-PD est déjà un peu oblique et accuse un léger retard du pied postérieur. Cette obliquité va toujours en augmentant, mais pour le bipède diagonal gauche seulement; le bipède droit, AD-PG, reste synchrone, avant comme après l'établissement du *galop*. Cette transition ne se fait pas seulement par le retard du pied postérieur, mais par l'avance du pied antérieur, de sorte que les deux battues diagonales, qui dans le *trot* étaient synchrones, laissent entre elles un intervalle égal à la durée d'un pas de *galop* tout entier. Cette durée correspond au *grand silence* dans le *galop* ordinaire.

La *transition du galop au trot* se fait par un mécanisme inverse (fig. 132).

La *transition du galop à quatre temps au galop à trois temps* se fait par une anticipation graduelle des battues de l'arrière-main.

s'est posé. Les *pistes*, ou *empreintes* que le Cheval laisse sur le sol, donnent cette connaissance d'une manière parfaite.

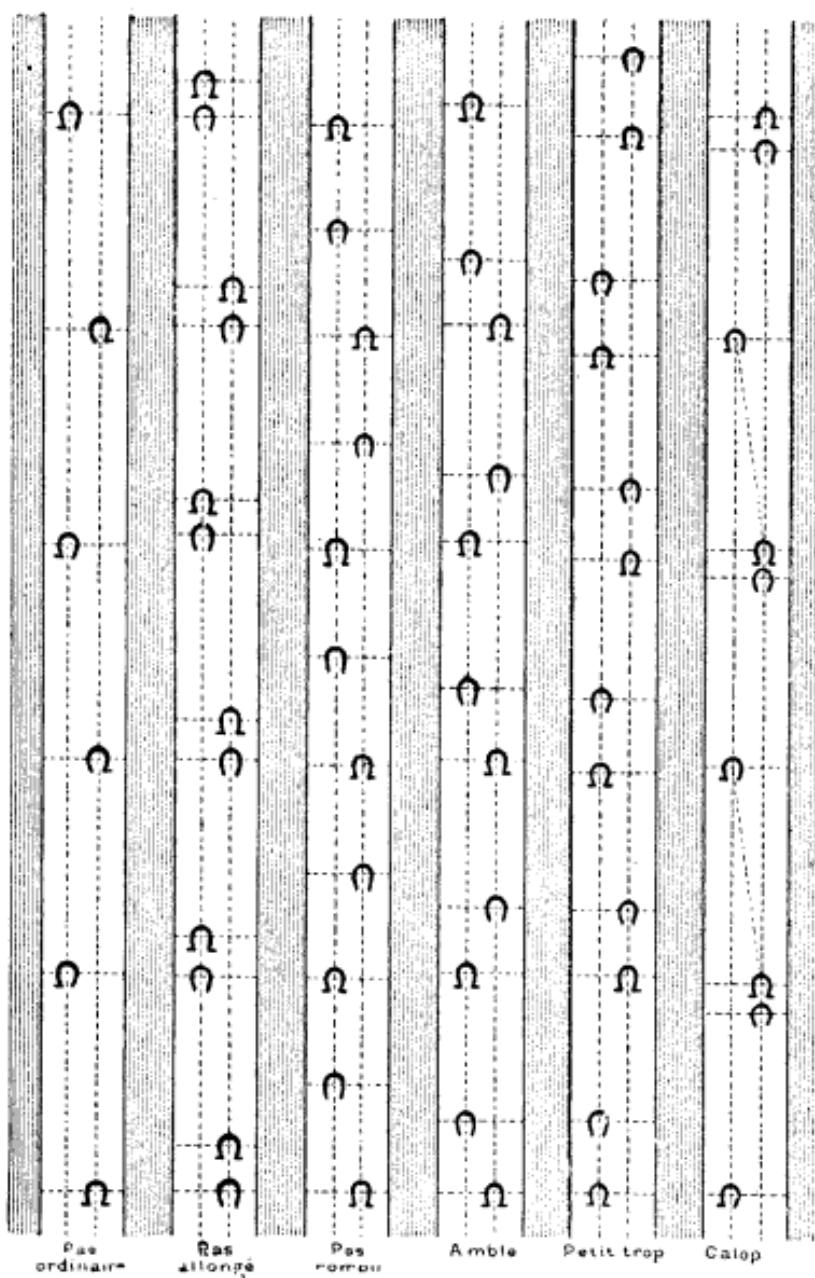


Fig. 133. — Tableau des pistes du Cheval à différentes allures.

Ces pistes ont été soigneusement étudiées en équitation. On a muni les pieds d'un Cheval de fers ayant des formes différentes, de façon que chacun des pieds laissait sur le sol

une empreinte capable de le faire reconnaître. La figure 133, construite d'après des documents empruntés à différents auteurs, montre les pistes qui correspondent aux principales allures du Cheval (1).

Dans la piste du pas, les pieds d'arrière viennent se placer dans les empreintes de ceux d'avant; les empreintes des pieds de droite alternent parfaitement avec celles des pieds de gauche; la distance des empreintes du même côté est sensiblement égale à la taille du Cheval mesurée au garrot (2). Les empreintes ne se recouvrent exactement, au pas, qu'en terrain plat et à une certaine vitesse de l'allure. Dans une montée, les empreintes des pieds postérieurs restent ordinairement en arrière de celles des pieds de devant, elles peuvent les dépasser au contraire dans les descentes, ce qui donnerait à la piste du pas une certaine ressemblance avec celle de l'amble.

Dans la piste de l'*amble*, en effet, les empreintes des pieds de même côté ne se superposent pas : le postérieur se pose fort en avant de l'empreinte de l'antérieur.

La piste du *trot* ressemble à celle du pas, sauf un plus grand intervalle entre les foulées ; toutefois, dans le *petit trot* les empreintes ne se superposent point, et le pied d'arrière n'arrive pas jusqu'à l'empreinte de celui d'avant (3).

(1) Sur ce tableau, les empreintes des pieds droits et gauches se reconnaissent d'après leur position sur une des deux lignes ponctuées parallèles droite ou gauche. L'empreinte d'un pied d'avant a la forme d'un pied de Cheval; celle d'un pied d'arrière porte au talon deux crochets. Enfin l'empreinte double d'un pied d'avant à laquelle se superpose un pied d'arrière, participe de ces deux caractères et ne porte qu'un seul crochet.

(2) Raabe admettait une égalité constante et absolue entre la taille du Cheval et l'écartement des empreintes ; la plupart des écuyers contestent l'exactitude de cette relation. Elle ne saurait du reste exister que pour certaines allures calmes ; le Cheval, de même que l'Homme, allonge le pas aux allures accélérées (Voir chap. VIII, p. 129).

(3) Ces pistes sont représentées d'après le traité de Vincent et Goiffon ; celles du galop sont empruntées à de Curnieu. On a réduit ces dernières à une plus petite échelle, pour faire tenir dans une ligne trois pas de l'allure du grand galop. Enfin, pour rendre intelligible la succession des appuis, on a réuni par une ligne ponctuée les empreintes du bipède diagonal dont les battues sont simultanées.

Représentation des attitudes du Cheval à toute allure, d'après la Chronographie et les pistes. — Il semble qu'il serait possible, en combinant les notions de temps et d'espace que nous possédons déjà, de représenter fidèlement l'attitude d'un Cheval à un moment donné d'une de ses allures. Vincent et Goiffon le croyaient aussi : leur remarquable

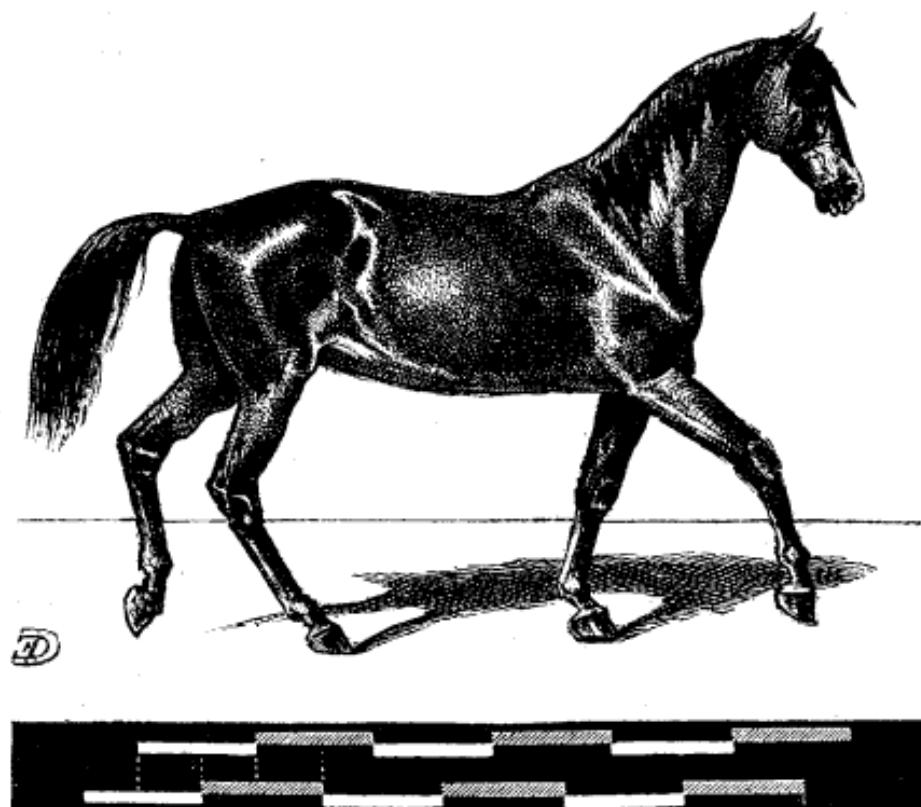


Fig. 134. — Cheval au pas dessiné d'après la notation chronographique et les pistes.

ouvrage était destiné aux artistes autant qu'aux écuyers. Avec les documents précis de la Chronographie qui fait savoir à quelle phase de son appui ou de son levé se trouve chacun des pieds du Cheval, et possédant en outre, d'après les pistes de l'animal, la position des pieds à l'appui sur le sol, on a déjà certains éléments pour faire un dessin correct. Ainsi la figure 134 représente un Cheval au pas, à l'instant marqué par un point blanc dans la notation de cette allure, c'est-à-dire un peu avant le posé du pied droit.

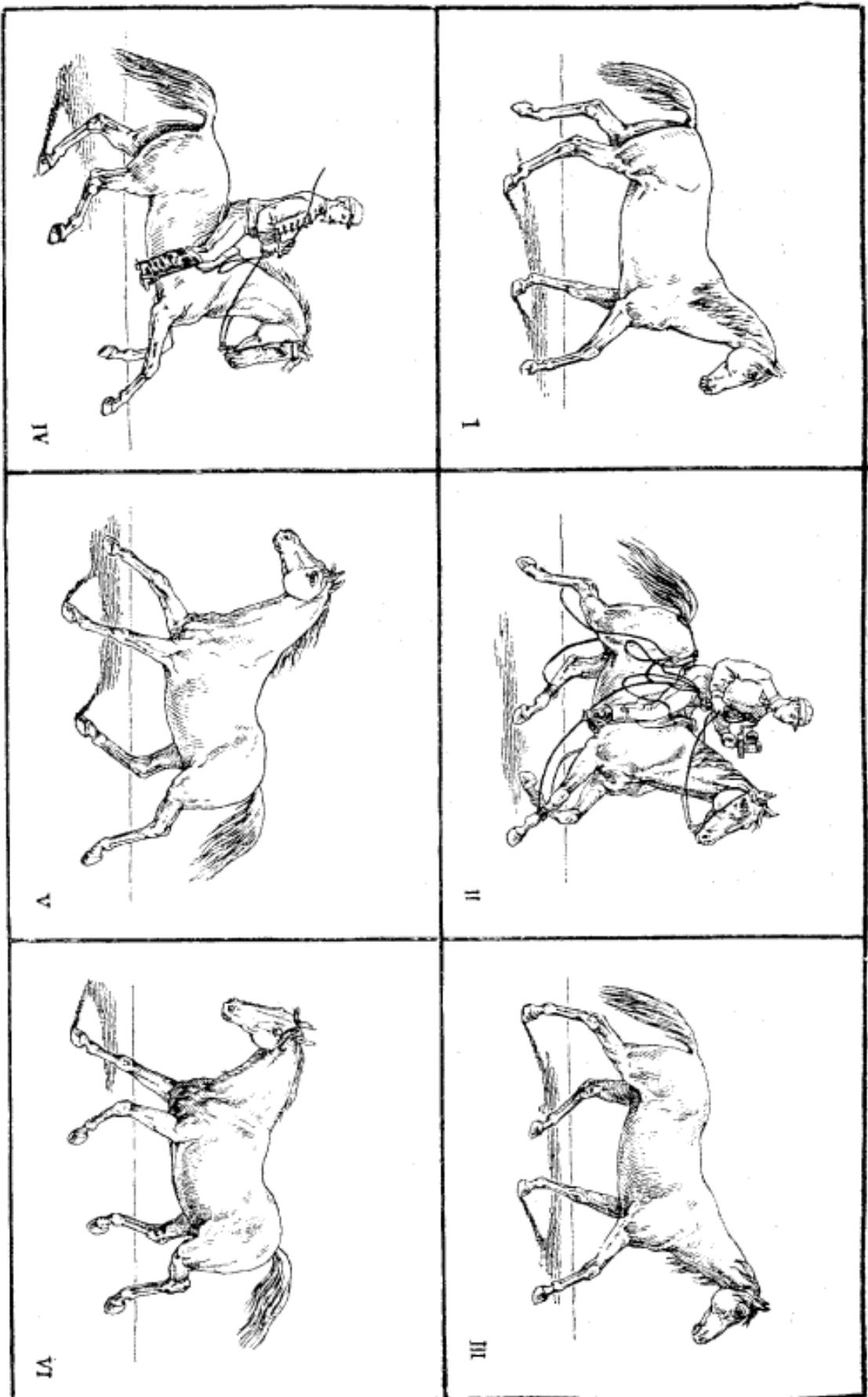
Un artiste familier avec les allures du Cheval pourra bien, comme l'a fait notre ami le colonel Duhousset pour la figure 134, donner à l'animal une attitude assez correcte, mais bien souvent la représentation s'écartera de la réalité. C'est ce qu'a démontré à l'évidence l'intervention de la Photographie instantanée dans l'étude des allures.

Pour bien prouver que la Chronographie combinée avec la mesure des pistes ne suffit pas à déterminer les véritables attitudes du Cheval, nous rapprocherons, sous la forme de deux tableaux, d'une part (fig. 135) les attitudes dessinées d'après l'analyse graphique (1), d'autre part (fig. 137) les mêmes attitudes empruntées aux photographies de Muybridge. Cette comparaison n'est certes pas à l'avantage de nos premières figures, où l'on trouve, dans les membres au levé, des positions parfois très différentes de ce qui existe dans la Nature. Ces différences portent presque exclusivement sur l'allure du galop, où les figures dessinées d'après la Chronographie seule sont particulièrement choquantes.

Applications de la Chronophotographie à la représentation du Cheval en mouvement. — Tout le monde connaît les beaux photogrammes de Muybridge auxquels nous avons déjà fait allusion ; ils ont définitivement complété la connaissance des mouvements du Cheval. Le spécimen qui a été donné (fig. 77) date des premiers essais de Muybridge et a été bien surpassé, au point de vue artistique, par les dernières publications de cet auteur. Un autre photographe, Anschütz (de Lissa), a obtenu de belles séries d'attitudes du Cheval par la même méthode, c'est-à-dire au moyen d'appareils multiples, fonctionnant l'un après l'autre, à de courts intervalles de temps. Enfin, depuis l'énorme diffusion de la Photographie instantanée, il existe des quantités considérables d'épreuves magnifiques dont les artistes s'inspirent avec avantage. Mais les images en série sont assurément les plus instructives pour faire saisir la succession des mouvements.

(1) Ces figures sont extraites de *La Machine animale*, Paris, G. Baillière, 1873.

FIG. 135. — Tableau des attitudes du Cheval dessinées par le M. colonel Duhoussot d'après les notations chronographiques.



Notre Chronophotographe appliqué à ces études présente certains avantages. Plus portatif que les autres appareils, il se transporte aisément sur toutes sortes de champs d'expériences; il donne des temps de pose plus courts et par conséquent des images plus nettes. Nous avons obtenu, sur pellicule mobile, des séries fort longues d'images que le format restreint de ce livre ne permet pas de représenter en entier.

La figure 136 montre l'allure du *pas*, le fragment auquel elle est réduite ne porte que cinq images successives sur les douze qui correspondaient au pas complet, c'est-à-dire mesuré d'un posé du pied antérieur gauche au posé suivant de ce même pied.

Ces images agrandies (fig. 138 et 139), sont encore fort nettes, bien qu'elles aient perdu une partie de leur modelé. C'est un inconvénient du procédé de reproduction exigé pour la typogra-

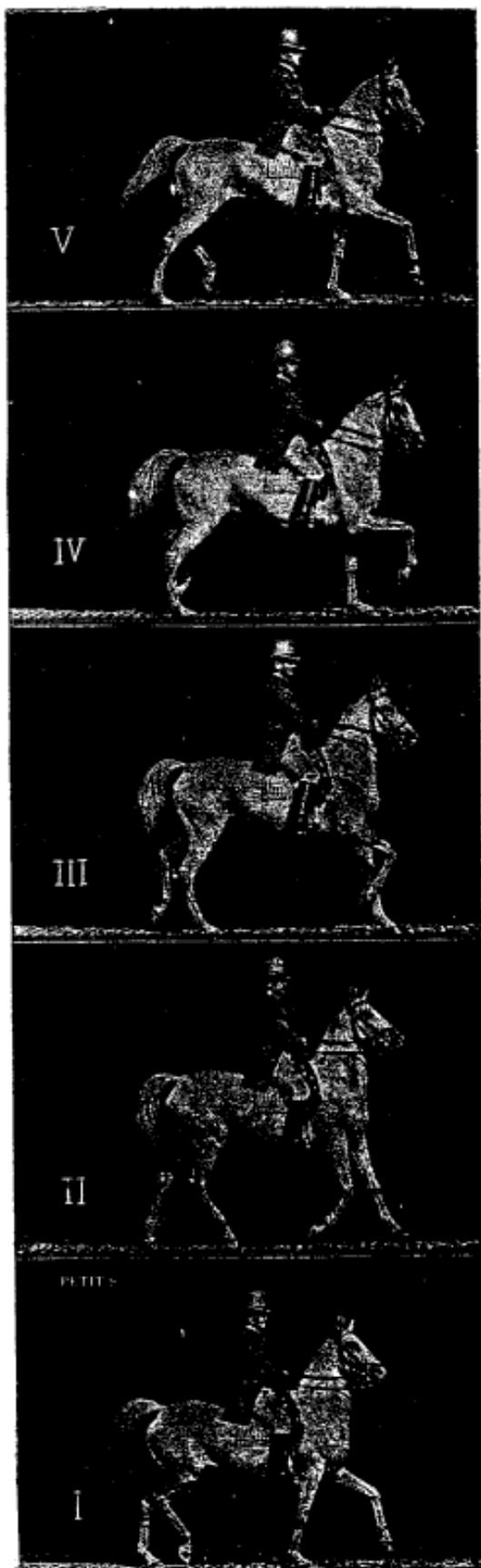


Fig. 136. — Cheval au pas.

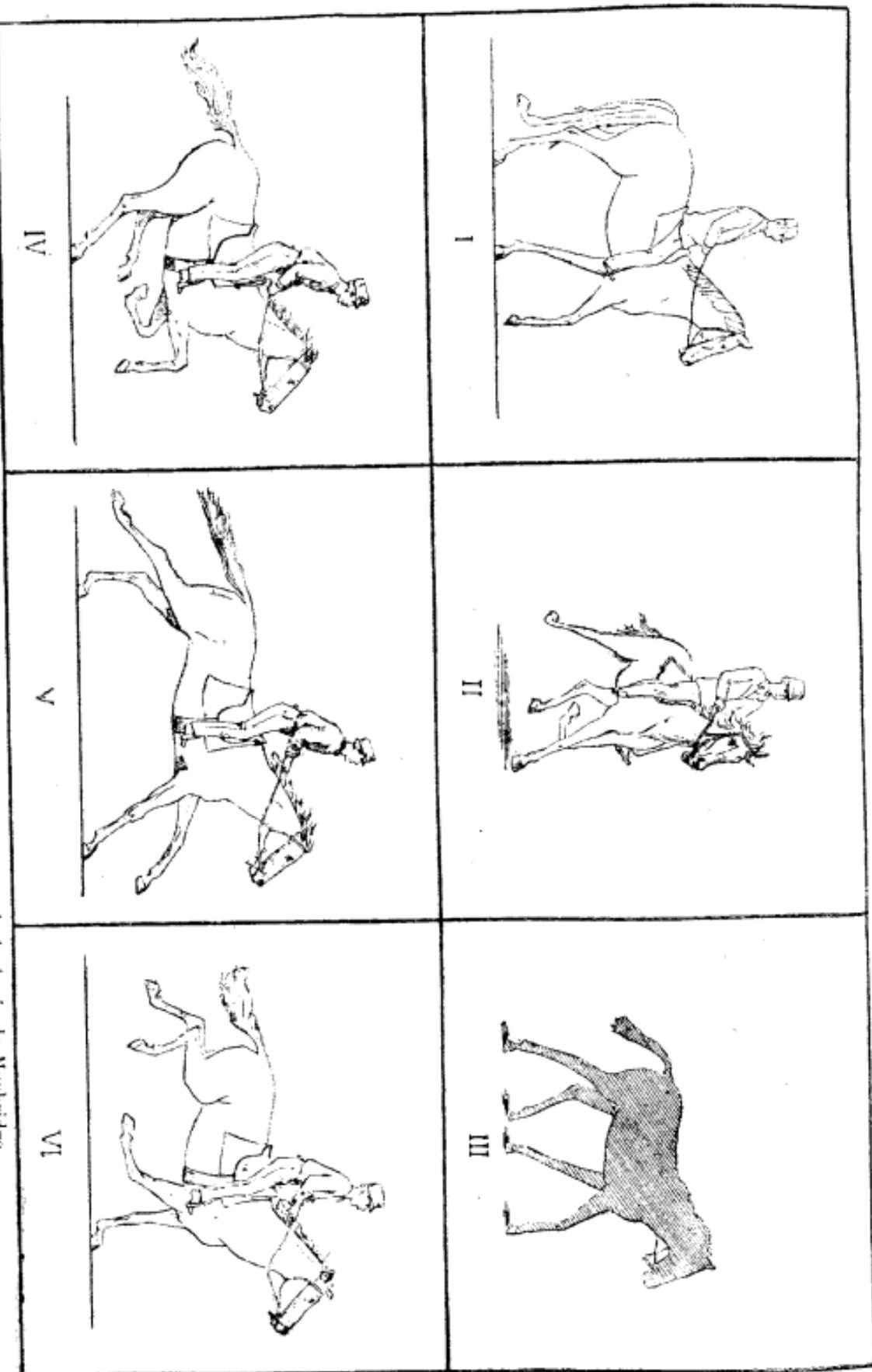


Fig. 137. — Tableau des attitudes du Cheval d'après les photogrammes instantanés de Muybridge.

phie, mais dans les tirages aux encres grasses les images agrandies gardent un modelé fort beau (1).

Pour l'allure du *galop*, on n'a pris, dans la série, que trois images bien caractéristiques, dont la première cor-

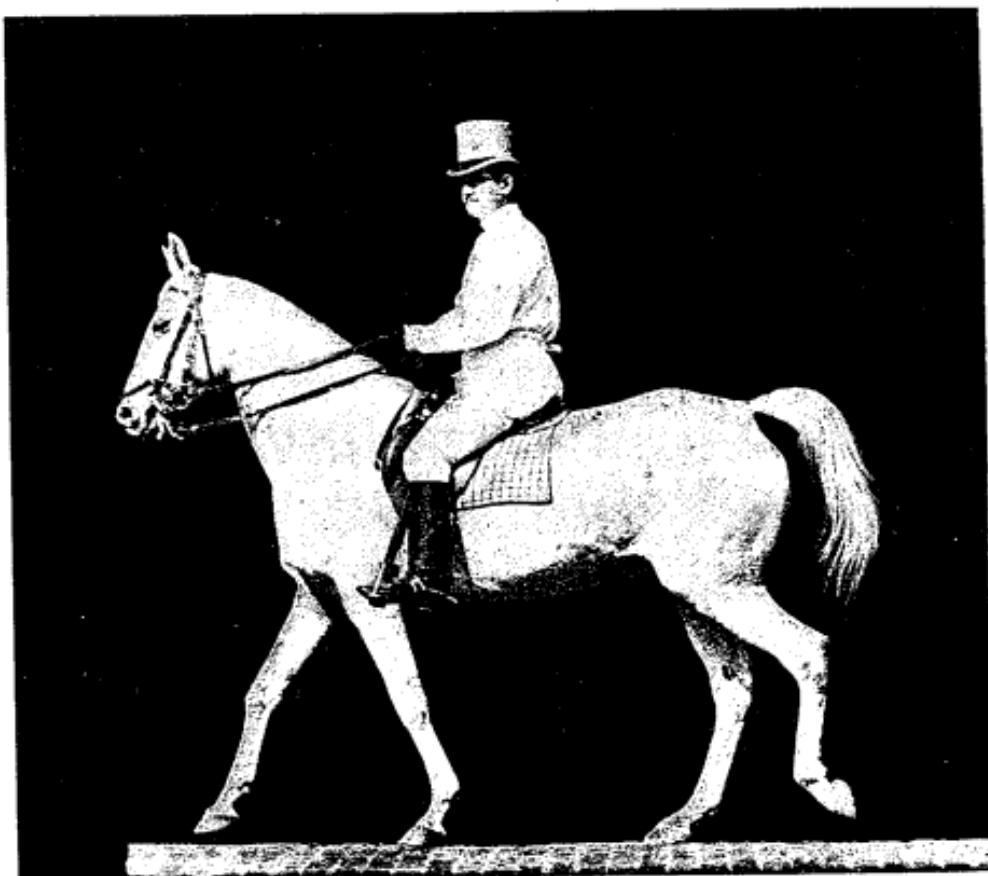


Fig. 138. — Cheval au pas (image agrandie).

respond au premier temps du galop, les deux autres, respectivement, au second et au troisième temps.

Les *passages* et les *changements de main* donnent lieu à des attitudes très élégantes (fig. 141 et 142), parmi lesquelles l'artiste en trouvera sans doute qui se prêtent à être représentées.

Utilité de la Photographie pour faire saisir le caractère

(1) Nous nous proposons, dans l'*Atlas de Physiologie artistique*, de représenter des séries d'images correspondant aux différentes allures du Cheval.

expressif des formes d'un animal. — Dans la représentation artistique, la correction des attitudes n'est pas tout; encore faut-il y joindre la correction des formes, si importante à l'expression du mouvement. L'antiquité la plus reculée

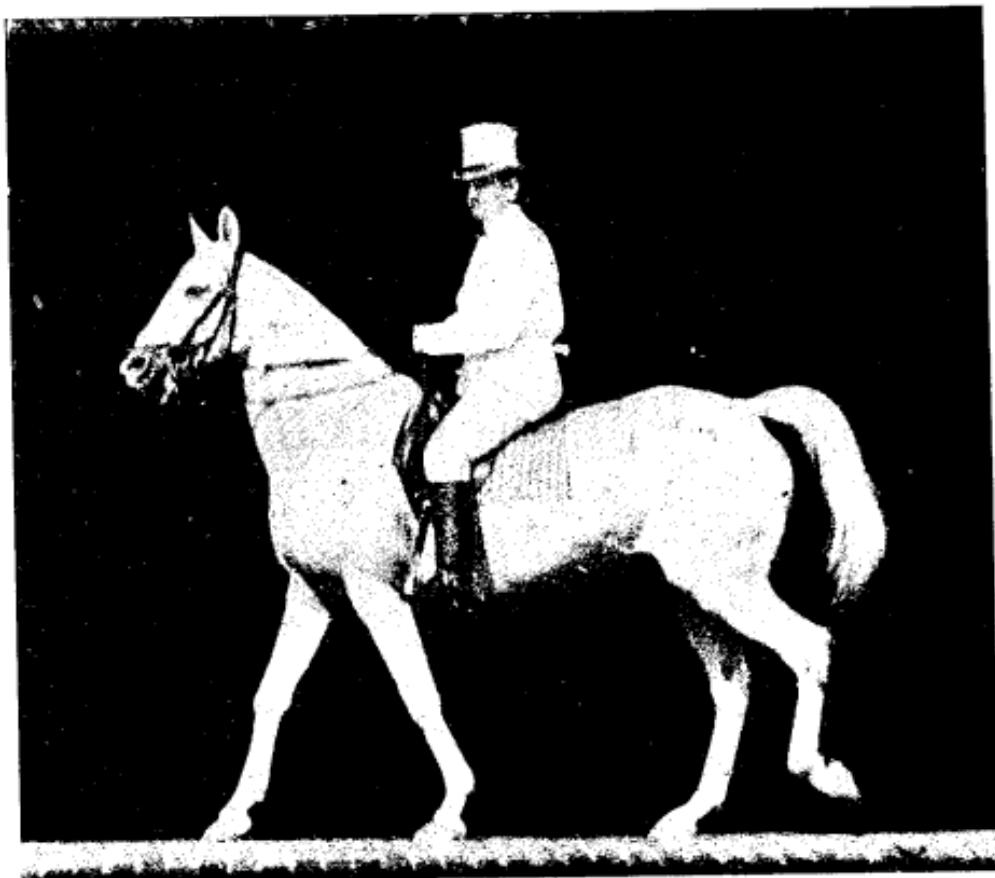


Fig. 139. — Cheval au pas (image agrandie).

semblait avoir acquis déjà la connaissance du mécanisme des allures, même de la plus compliquée, *le pas*.

Si l'on se reporte aux figures 143 et 144, on y voit, fidèlement représentée, l'allure de l'*amble* (1); c'est du reste la plus simple à saisir par la vue, à cause de sa symétrie ; c'est également celle qu'on observe sur de grands animaux comme le Chameau et l'Éléphant. Mais à côté de cette sincérité dans la représentation de l'attitude des membres, quelle lour-

(1) Ces figures et la plupart des suivantes sont empruntées à la collection Duhousset; elles ont paru dans le journal *La Nature*.

deur dans l'exécution, et quelle naïveté dans ce parfait syn-

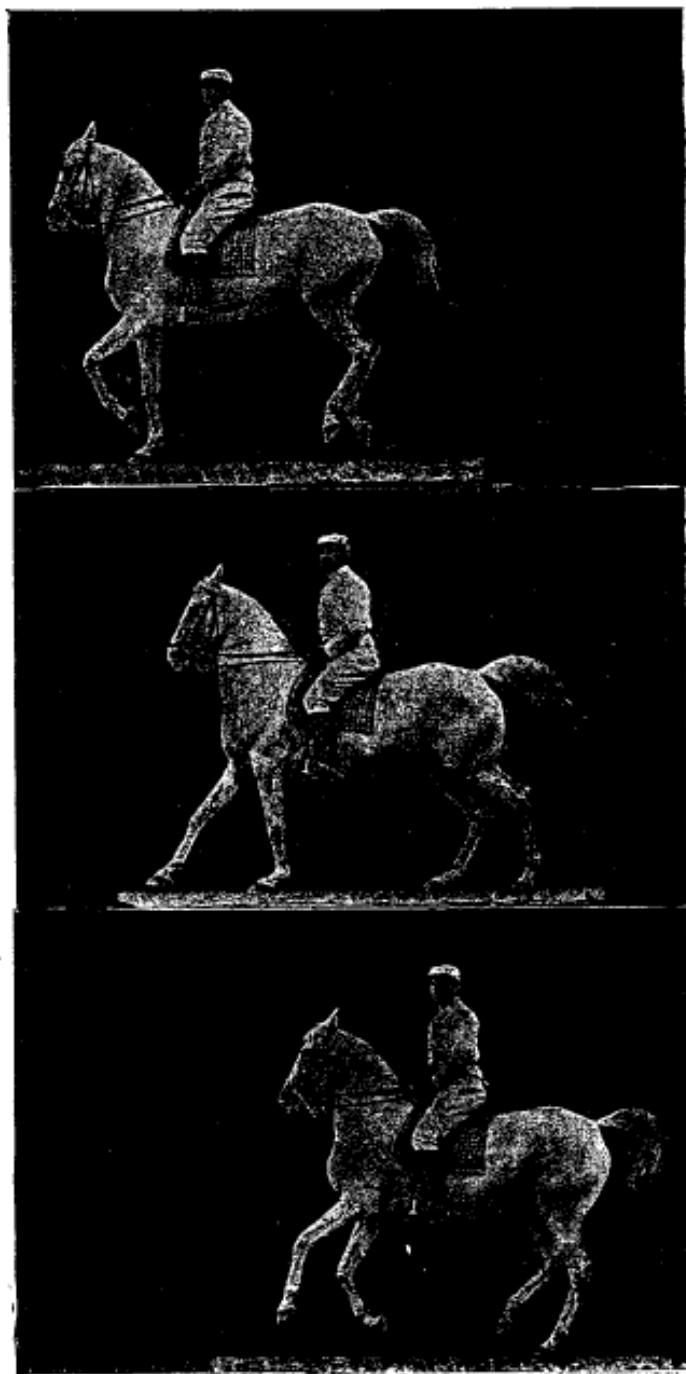


Fig. 140. — Cheval au petit galop (La succession des images se lit de bas en haut).

chronisme des mouvements des deux Chevaux qu'on voit sur le bas-relief de Medynet-Abou !

Plus massif encore et plus fruste est le Cheval au *pas* de la figure 145, mais il révèle déjà dans l'Art assyrien une grande connaissance des mouvements du Cheval, car l'allure du pas est, avons-nous dit, la plus difficile à saisir et celle qu'on trouve le plus souvent représentée d'une façon incorrecte. On rencontre pourtant, dans l'Art antique, des représen-

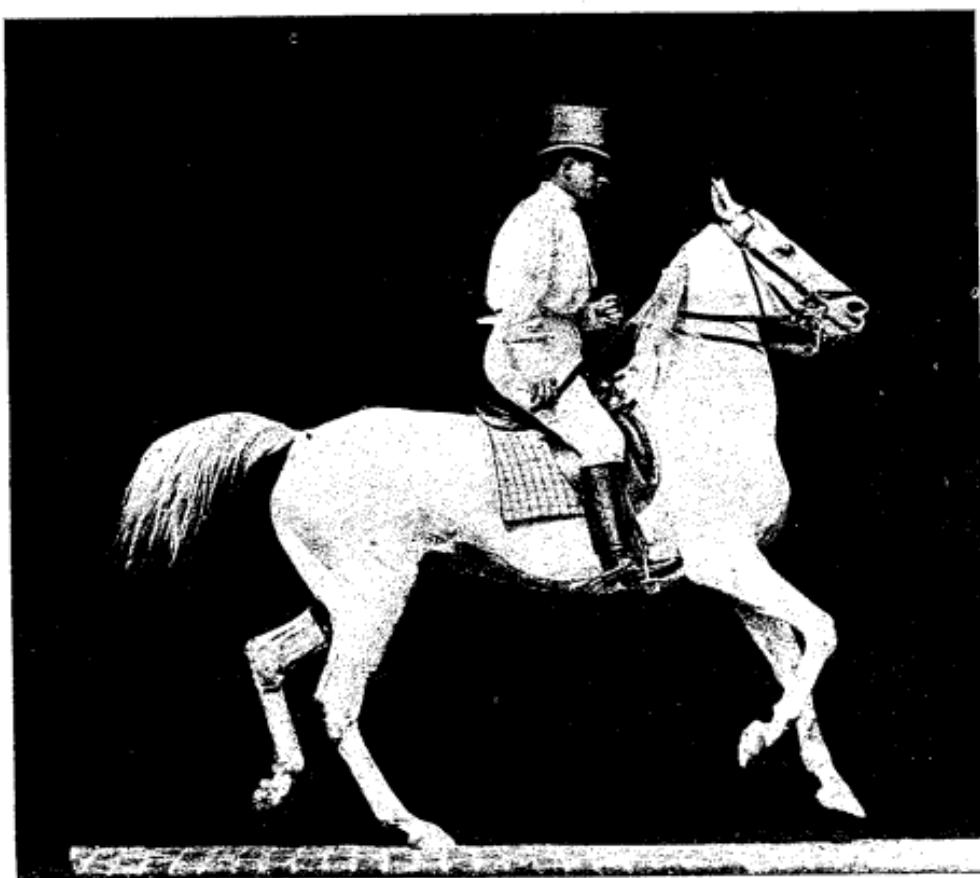


Fig. 141. — Passage du trot au galop.

tations très correctes de cette allure : c'est d'abord (fig. 146), un bas-relief de l'époque volsque, puis deux figures de la colonne Trajane, un Cheval avec son cavalier (fig. 147), et un Mulet chargé (fig. 147 bis).

Le *trot*, si souvent représenté dans les œuvres modernes, semble plus rarement figuré dans les anciennes. Albert Durer toutefois en a donné un type que l'on voit figure 148; puis c'est le classique Cheval de Henri IV sur le Pont-Neuf (fig. 149).

Quant au *galop*, c'était peut-être l'allure la plus familière aux artistes grecs. Ainsi la frise du Parthénon en offre des exemples sans nombre; mais il y a peu de variété dans le moment de cette allure choisi par l'école de Phidias. C'est

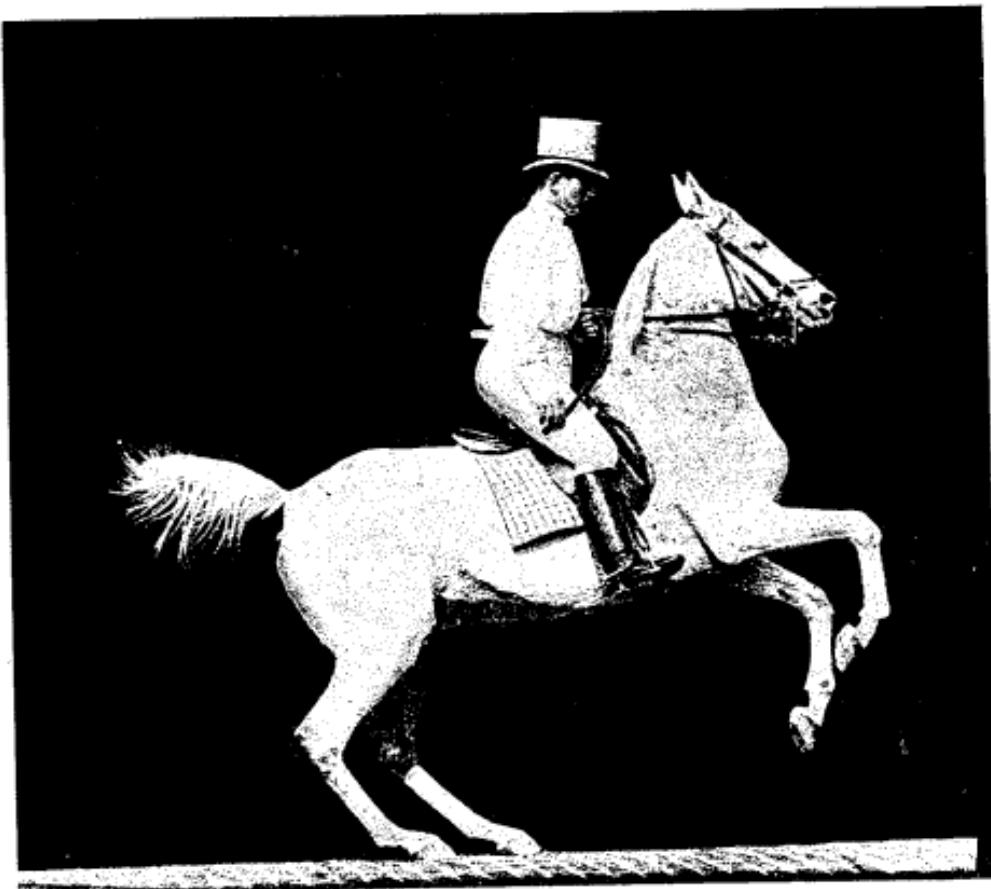


Fig. 142. — Changement de main au galop.

presque toujours le premier temps du galop qu'elle a choisi, c'est-à-dire l'instant où le Cheval retombe sur un pied d'arrière. La figure 150, prise sur un fragment de la frise qui reste encore à l'Acropole, représente ce premier temps. Toutes ces figures diffèrent beaucoup des allures du galop rapide usitées de nos jours; les Chevaux du Parthénon semblent se mouvoir sur place, ou du moins se régler sur la lente progression de théories sacrées.

Locomotion du Cheval au point de vue de la Physiologie des mouvements. — L'Art et la Science se rencontrent

quand ils recherchent l'exactitude ; les mêmes méthodes servent également à déterminer les différentes attitudes sous

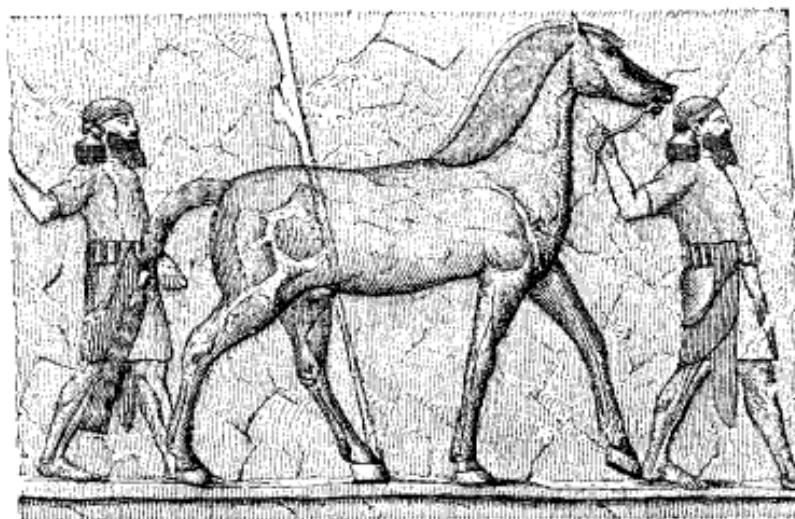


Fig. 143. — Bas-relief assyrien (British Muséum). Un cheval à l'amble.

lesquelles un artiste doit représenter le Cheval, et à suivre



Fig. 144. — Bas-relief égyptien (Medinet-Abou). Deux chevaux attelés marchant l'amble.

aux points de vue mécanique et physiologique les phases des mouvements de cet animal.

De même que dans nos études sur la locomotion de l'Homme, nous avons appliqué aux allures du Cheval la



Fig. 145. — Bas-relief assyrien (Ninive). Cheval au pas.

Chronophotographie géométrique, pour rassembler sur une



Fig. 146. — Bas-relief en terre cuite de l'époque Volsque (Velletri). Trois Chevaux attelés marchant au pas.

plaqué fixe, dans une série d'images très nombreuses, l'épure des mouvements de chacun des segments des membres.

Il serait bien difficile de revêtir un Cheval de velours



Fig. 147. — Cavalier au pas (Colonne Trajane).

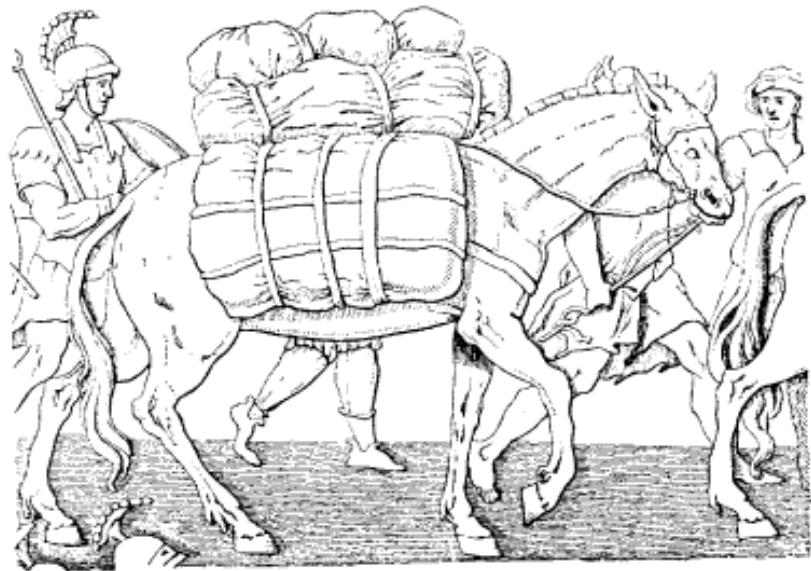


Fig. 147 bis. — Mulet au pas (Colonne Trajane).

noir et d'y appliquer, au niveau des différentes articulations et sur les divers rayons osseux, des points et des lignes

brillantes. Nous nous sommes borné à choisir un animal de robe foncée, que parfois nous avons rendue plus sombre en la peignant au noir de fumée; puis, sur les principales articulations, nous avons fixé à la poix de petits morceaux de papier blanc dont la forme était différente pour chaque articulation : ici un carré, ailleurs un triangle, puis une



Fig. 148. — Le Cheval de la Mort, par Albert Dürer. Cheval au trot légèrement désuni.

bande étroite, un cercle, etc. (fig. 151). L'animal passait alors devant l'écran noir et l'on obtenait la série des trajectoires des diverses articulations.

Il fallait ensuite, sur l'image agrandie, joindre entre eux les différents signes par les lignes exprimant la position des rayons osseux. Cette opération était laborieuse à cause de la multiplicité des signes et de la superposition des images de l'arrière-main sur celles de l'avant-main (fig. 152).

Nous avons, avec le docteur Pagès, construit l'épure des mouvements du Cheval à diverses allures, avec les trajec-

toires parfois assez compliquées de chaque partie des membres. Il n'y a pas lieu de nous étendre sur ces représentations du mouvement ; deux exemples suffiront pour donner une idée des résultats de ces essais, et pour montrer qu'on obtient ainsi des renseignements d'une précision parfaite que l'observation n'est pas capable de donner.



Fig. 149. — Statue de Henri IV sur le Pont-Neuf.
Cheval au trot.

Si, au lieu de chercher à fixer dans leur ensemble les mouvements des quatre membres à la fois, on se limite à ceux d'un segment d'un mem-



Fig. 150. — Frise du Parthénon. Cheval au petit galop.

bre ou d'une articulation en particulier, l'expérience est plus facile et les résultats sont plus clairs. Ainsi les figures

suivantes montrent les trajectoires du boulet et de la pointe du sabot dans le *pas*. La figure 453 correspond au pied postérieur droit, 454 au pied antérieur du même côté. Il y a peu de différence entre ces deux trajectoires.

Dans le galop, la Chronophotographie éclaire d'une manière saisissante le rôle de l'élasticité du tendon fléchis-

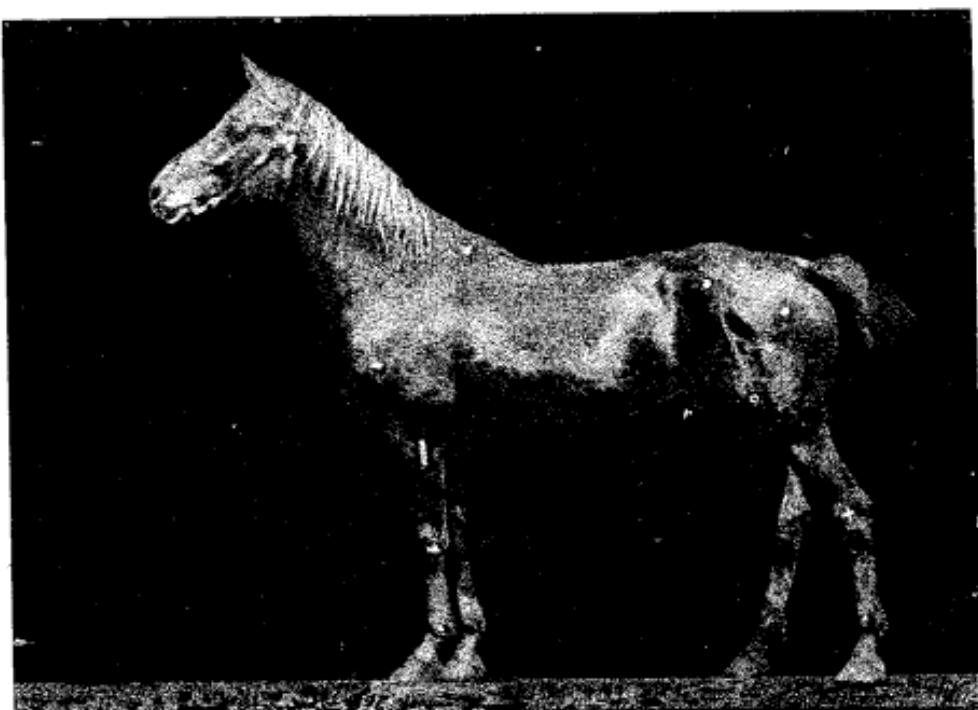


Fig. 454. — Cheval préparé pour les expériences de Chronophotographie géométrique.

seur, pour amortir le choc du pied postérieur sur le sol, au moment où ce pied reçoit tout le poids du corps. La figure 455 montre que le boulet décrit alors un mouvement alternatif dont le sens est indiqué par de petites flèches. L'étendue du mouvement rétrograde, au moment de l'appui, est très grande chez les Chevaux *long-jointés*; cela explique la douceur de leurs réactions.

Ce qui vient d'être dit montre les avantages des photographies géométriques pour résoudre un grand nombre de problèmes techniques, relatifs à l'équitation.

Mais il est un sujet qui présente à nos yeux un intérêt

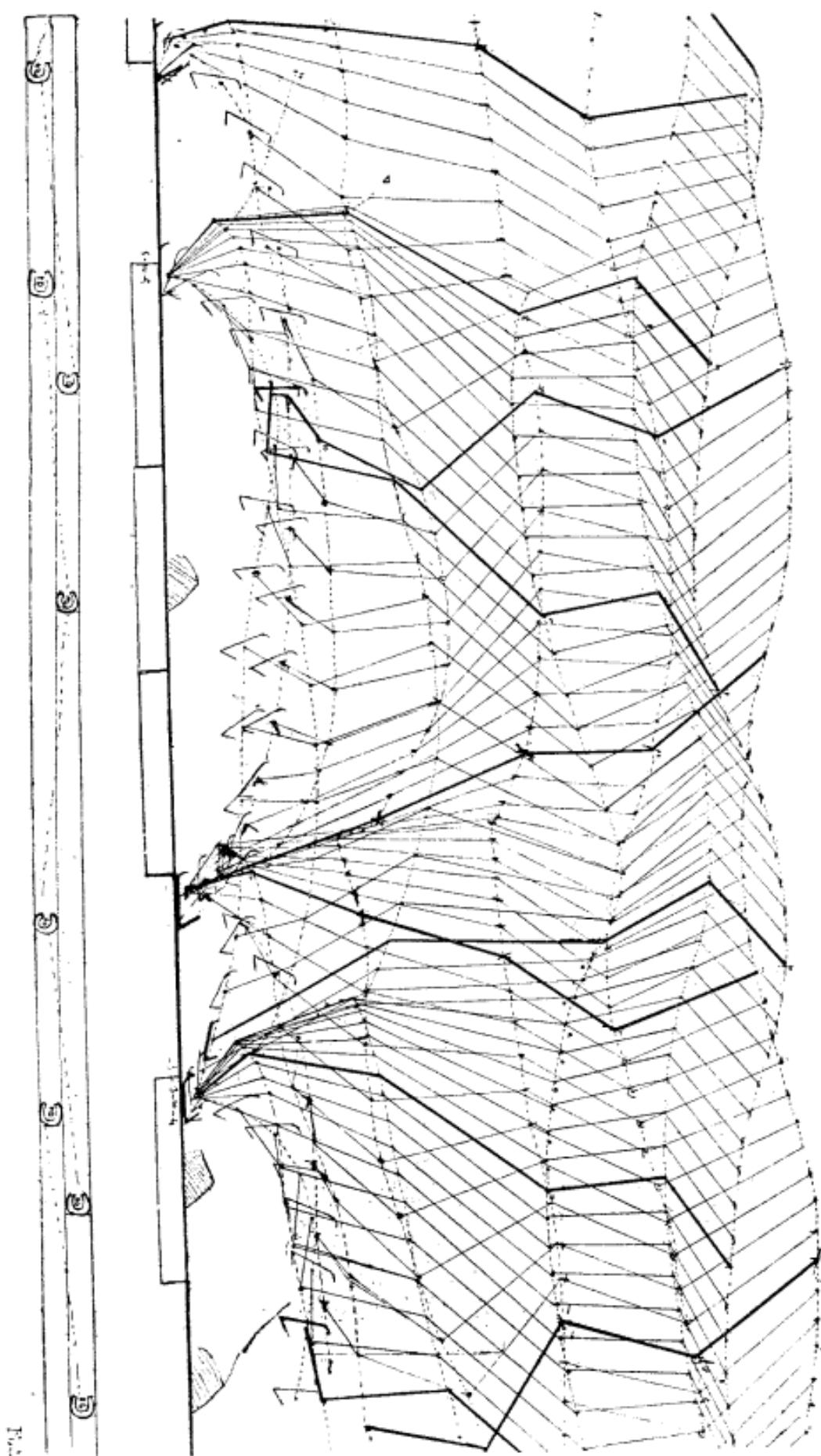


Fig. 152. — Épine des mouvements des membres antérieur et postérieur droits du Cheval à l'failure du pas

tout particulier. C'est la connaissance des caractères que la forme des membres d'un animal imprime à ses allures. Cette

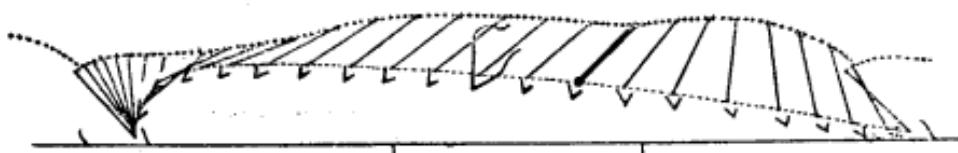


Fig. 153. — Mouvements du pied postérieur droit. Ligne supérieure trajectoire du boulet; ligne inférieure trajectoire de la pincee.

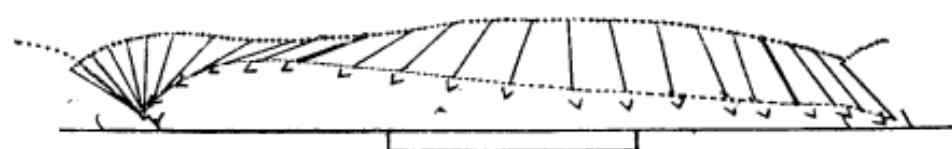


Fig. 154. — Mouvements du pied antérieur droit; mêmes trajectoires que ci-dessus.

connaissance est absolument nécessaire pour éclairer l'Ana-

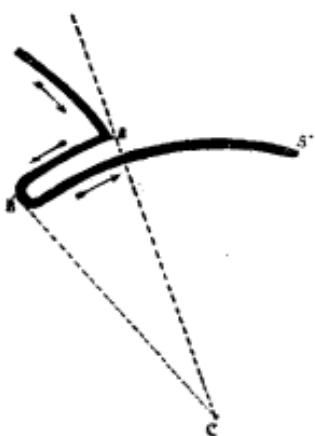


Fig. 155. — Appui du pied postérieur au premier temps du galop. Le trait noir et épais montre l'abaissement, la rétrogradation et le retour en avant du boulet (*).

(*) On a séparé pour les rendre visibles les deux lignes exprimant les deux mouvements de sens inverse décrits par le boulet. Dans la réalité, ces lignes se confondent à peu près complètement.

tomie comparée, en donnant à la forme des os et des muscles leur signification véritable.

CHAPITRE XII

LOCOMOTION DANS L'EAU

SOMMAIRE. — Des différents types de la locomotion dans l'eau. — Manière de prendre les images des animaux aquatiques : Méduse ; Comatule. — Locomotion par ondulations latérales ; Anguille. — Disposition qui se prête à l'étude du mouvement. — Locomotion par ondulations verticales ; Raie. — Disposition propre à étudier les ondulations verticales sous différents aspects : ondes de la Raie vues de côté ; ondes de la Raie vues de face. — Hippocampe ; Tortues d'eau. — Mouvements lents des Astéries. — Locomotion des petits animaux marins.

Des différents types de locomotion dans l'eau. — Les animaux terrestres trouvent sur le sol un point d'appui solide ; chez eux, les différents genres de locomotion se rattachent toujours au mécanisme suivant: Un effort plus ou moins brusque des membres tend à repousser le sol dans un sens, et le corps de l'animal en sens inverse; or, comme le sol présente une résistance à peu près absolue, c'est sur le corps de l'animal que se produit tout l'effet de l'action musculaire.

Tout autre est la locomotion des animaux aquatiques. Pour eux, le point d'appui est un liquide qui se déplace et consomme, en pure perte, une partie plus ou moins grande du travail musculaire dépensé.

Les différents genres de propulseurs que l'Homme croit avoir imaginés pour naviguer : voiles, rames, godilles, se trouvent à un haut degré de perfection dans les organes locomoteurs des animaux aquatiques. Et si l'hélice, en tant que mouvement rotatif, ne s'observe pas dans la Nature organisée, du moins y trouve-t-on certains mouvements ondulatoires, tels que

ceux du corps ou de la queue des Poissons qui, au point de vue de leur fonction, ont de grandes analogies avec l'action de l'hélice.

En outre, les animaux aquatiques présentent de nombreux moyens de propulsion que l'Homme n'a jamais employés et dont l'imitation pourra être tentée avec avantage.

Sans prétendre faire l'énumération complète des divers modes de progression qu'on observe chez les êtres aquatiques, on peut citer les suivants :

Progression par réaction, lorsqu'un jet de liquide est projeté par l'animal : Poulpe, Méduse, larves de certains Insectes, Mollusques bivalves.

Progression au moyen d'organes qui trouvent une résistance inégale dans les deux phases de leur mouvement : Comatulles, Crustacés, etc.

Progression par l'effet d'une onde qui se propage le long du corps, en sens inverse de la translation de l'animal : Anguille et Poissons allongés.

Progression par choqs alternatifs d'une palette flexible : Aplysies, Carinaires, nageoire caudale de la plupart des Poissons.

C'est l'invention de l'aquarium qui a permis d'étudier les différents types de la locomotion aquatique. Mais ici, comme pour les autres mouvements des animaux, l'œil est souvent incapable de suivre les phases de ces actes rapides et compliqués. Voici ce que nous ont donné les premières tentatives d'application de la Chronophotographie à ce sujet encore bien peu connu :

Manière de prendre les images des animaux aquatiques.
 — Les manières d'opérer varient beaucoup suivant les circonstances. Dans les cas les plus simples, on braque l'objectif sur un aquarium transparent encastré dans l'épaisseur de la paroi d'une chambre (fig. 156). Parfois, un réflecteur de toile blanche, convenablement incliné et recevant la lumière solaire, forme un fond lumineux sur lequel les animaux se détachent en silhouette. On recueille une série

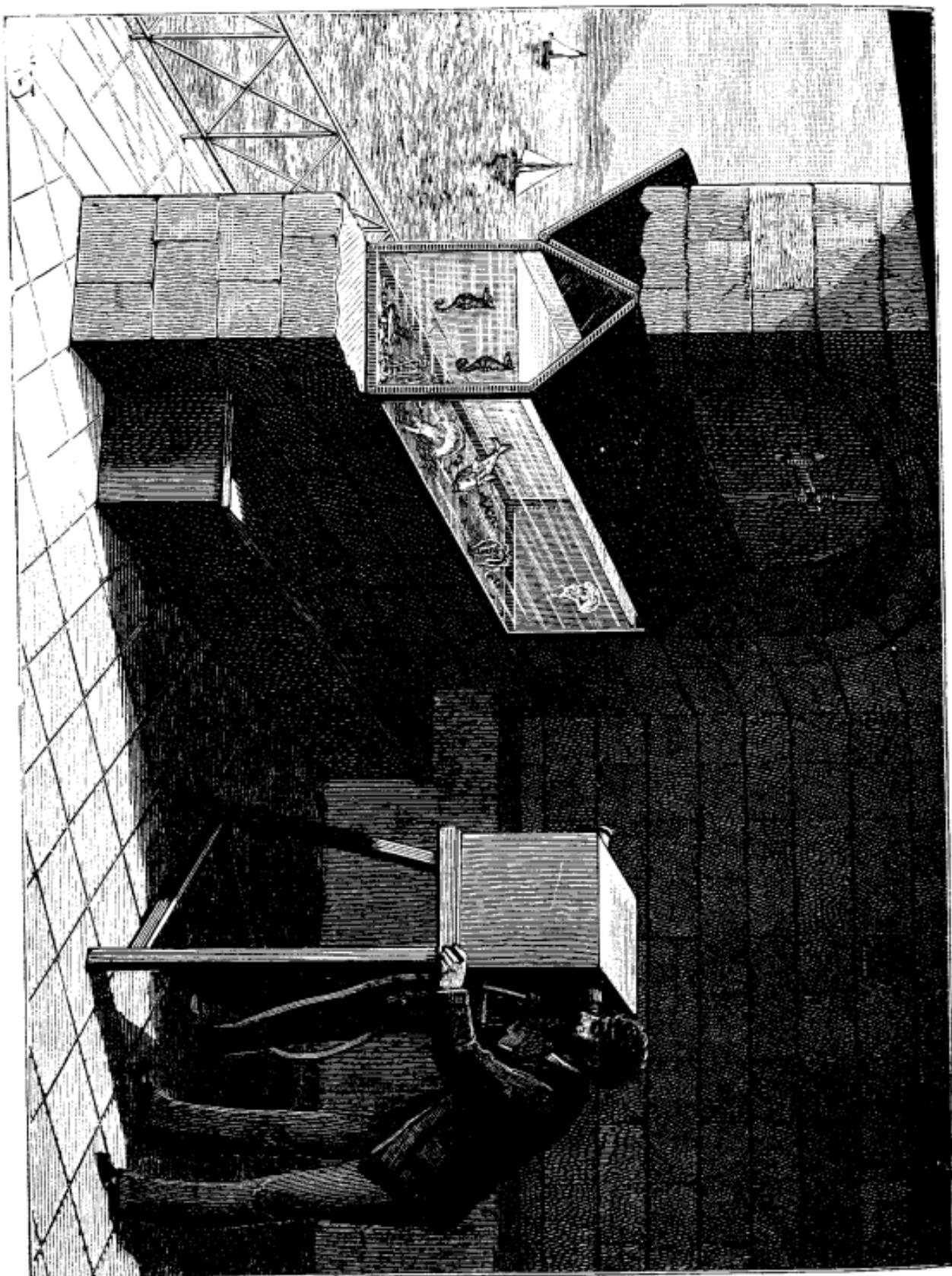


Fig. 156. — Disposition de l'aquarium marin pour l'étude de la locomotion dans l'eau.

d'images sur pellicule mobile, et l'on obtient la suite des attitudes qui correspondent aux phases successives du mouvement qu'on voulait connaître. La plus grande difficulté consiste à obliger l'animal à se mouvoir dans un espace

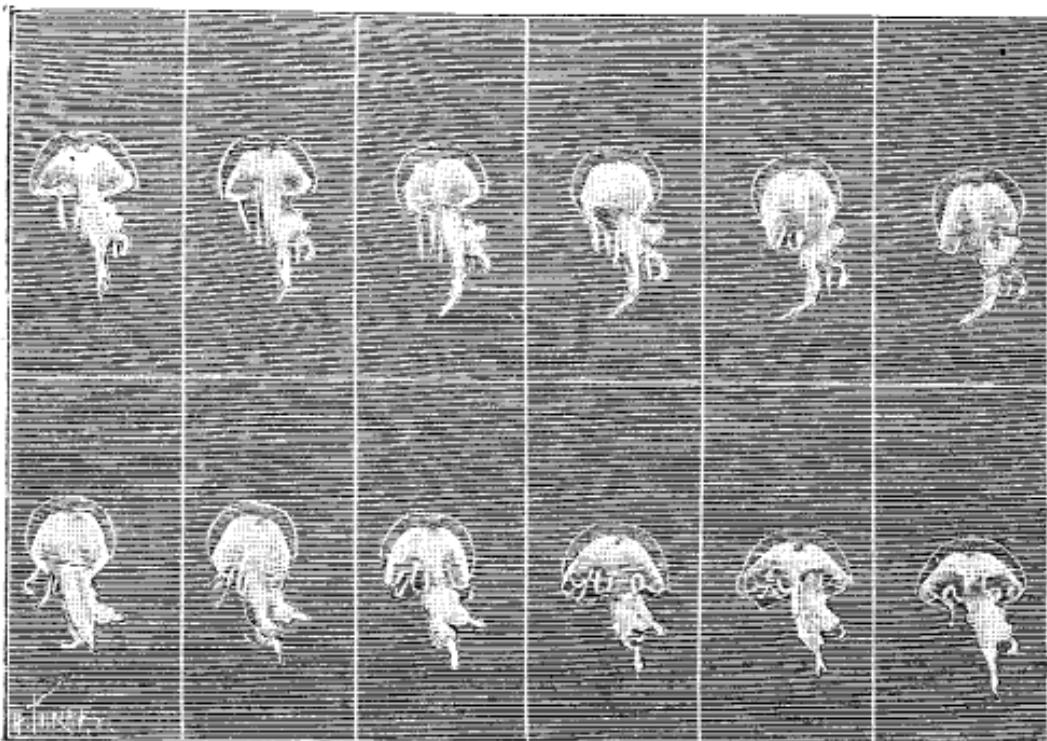


Fig. 137. — Mouvements de l'ombrelle de la Méduse. La première image est à droite de la ligne supérieure ; la dernière à gauche de la ligne inférieure.

restreint, afin qu'il ne sorte pas du champ dont l'image est contenue sur la plaque sensible.

Après avoir tracé sur la paroi de l'aquarium quatre lignes formant un rectangle, afin de limiter l'espace visible dans les images, on guette l'instant où l'animal traverse ce champ. Pour peu que ce passage ne dure pas moins d'une seconde, il est facile de recueillir une série de 10 ou 20 images ; cela suffit pour saisir les phases du mouvement (1).

La *Méduse* (fig. 137) est assez facile à étudier ; la transpa-

(1) Comme les dimensions d'une page ne permettent pas de représenter des séries aussi longues, nous ne pourrons donner ici que des spécimens incomplets de ces images.

rence de ses tissus fait que la silhouette montre quelques détails intérieurs.

Au moyen d'une baguette plongée dans l'aquarium, on amène la Méduse dans le champ sur lequel l'objectif est braqué ; elle y exécute des contractions et des relâchements alternatifs de son ombrelle ; ces mouvements chassent, à chaque fois, un certain volume d'eau et, par la réaction, propulsent l'animal en sens inverse.

Si la Méduse est verticalement orientée, la propulsion se

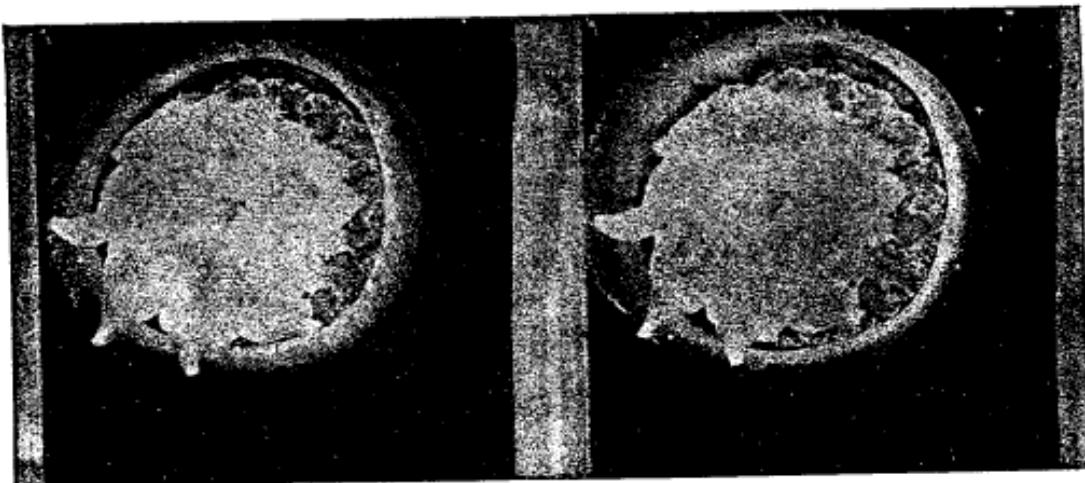


Fig. 158. — Méduse nageant horizontalement en s'éloignant de l'appareil (image négative).

fait de bas en haut et l'animal s'élève ; si elle est inclinée horizontalement, la propulsion se fait dans le sens horizontal : c'est ce qui a lieu (fig. 158), la Méduse nageait en s'éloignant de l'observateur. Cette disposition permet de voir comment les franges qui bordent l'ombrelle se retournent tour à tour en dedans ou en dehors, suivant les mouvements de l'eau alternativement aspirée et refoulée.

La *Comatule* (fig. 159) présente un mode de locomotion fort curieux. Généralement fixée sur quelque appui solide, comme une fleur sur la branche qui la porte, elle exécute avec ses bras des mouvements obscurs et très lents. Mais si on la détache de son support, et si on l'irrite au moyen d'une baguette, on la voit, au bout d'un certain

temps, agiter ses bras d'un mouvement rapide qui a pour effet de transporter l'animal loin des contacts importuns. De même que pour la Méduse, la translation a lieu dans le sens de l'axe du corps : si la Comatule incline obliquement son calice, elle chemine obliquement. Dans le cas représenté ci-contre, l'animal cherchait à s'élever du fond de l'aquarium.

Voici le mécanisme de la propulsion : Les bras de la Comatule sont au nombre de 10 ; il y en a toujours 5 qui s'élèvent et 5 qui s'abaissent. Deux bras consécutifs sont animés de mouvements contraires ; ceux qui s'élèvent se rapprochent de l'axe du corps, ceux qui descendent s'en éloignent. Parfois, pendant la phase d'élévation de chaque membre, les cirres ne se voient pas, accolées qu'elles sont par la résistance de l'eau sur le bras auquel elles s'implantent ; dans la phase descendante, au con-

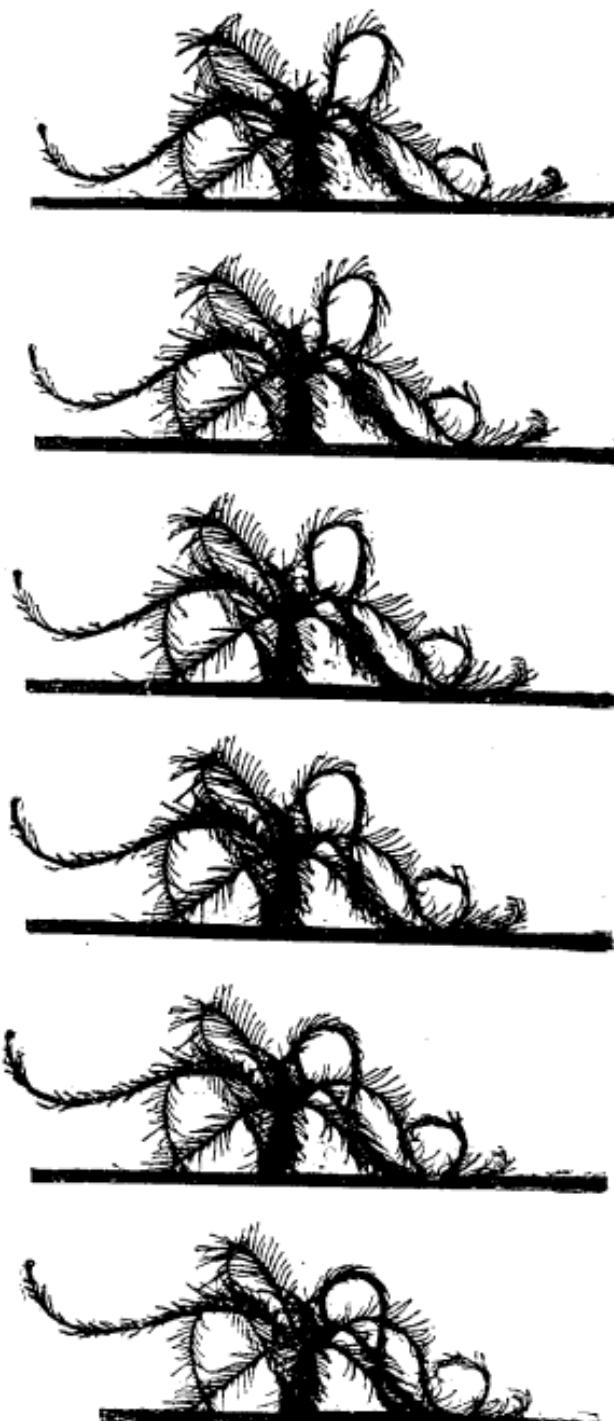


Fig. 139. -- Comatule exécutant des mouvements au fond de l'aquarium. La succession des images se lit de bas en haut.

traire, ces cirres s'écartent, deviennent visibles et trouvent sur l'eau une résistance qui sert de point d'appui pour la locomotion de l'animal.

Locomotion par ondulations latérales : Anguille. — L'*Anguille* et les Poissons qui ont une forme analogue progressent par l'effet d'un mouvement ondulatoire du corps, se faisant dans un plan horizontal. Pour bien voir ce mouvement, il faut être placé verticalement au-dessus de l'animal, et pour en prendre les images chronophotographiques, il faut recourir à un aquarium spécial.

Disposition qui se prête à l'étude de ce mouvement.

— La lumière doit arriver par la partie inférieure de la vasque. La disposition représentée figure 52, chapitre v, convient donc à ces études. L'*Anguille* se détache en silhouette sur le champ lumineux, l'objectif du Chronophotographe est verticalement braqué au-dessus d'elle, à moins qu'un miroir argenté, incliné sous un angle de 45° , ne reflète l'image du Poisson dans l'objectif horizontalement dirigé.

La figure 160 représente une série de cinq images sur lesquelles se voit la progression de l'animal et le déplacement des ondes le long de son corps. Des lignes diversement inclinées permettent de suivre la propagation de ce mouvement par rapport à la droite *oo* sur laquelle la tête de l'animal resterait dans toute la série des images s'il n'y avait pas progression. La ligne *aa*, obliquement inclinée, montre, pour chaque image, la quantité dont l'*Anguille* s'est avancée; cette ligne est droite, elle exprime donc que la vitesse de progression était uniforme. A la cinquième image, c'est-à-dire au bout d'une demi-seconde, l'*Anguille* a progressé de plus du quart de sa longueur, soit d'environ $0^m,075$, ce qui répond à une vitesse de $0^m,15$ par seconde.

D'autre part les lignes *p¹*, *p²*, ..., *n¹*, *n²*, ..., qui joignent entre eux les ventres et les noeuds d'une même onde dans la série des images ont, par rapport à la ligne *oo*, une obliquité qui exprime la vitesse de ces ondes et permet de la mesurer. Il résulte de cette mesure, que la marche de

L'onde se fait d'avant en arrière et qu'elle est plus rapide que la progression de l'animal. Il y aurait donc ici, comme dans l'action de l'hélice d'un navire, un *recul* qui tient à la mobilité du point d'appui.

Ainsi, l'ondulation de l'Anguille qui progresse se fait de la tête à la queue. Il nous a semblé que ces Poissons, lorsqu'ils veulent reculer, donnent à leur mouvement onduleux une direction contraire, c'est-à-dire que l'onde chemine de la queue

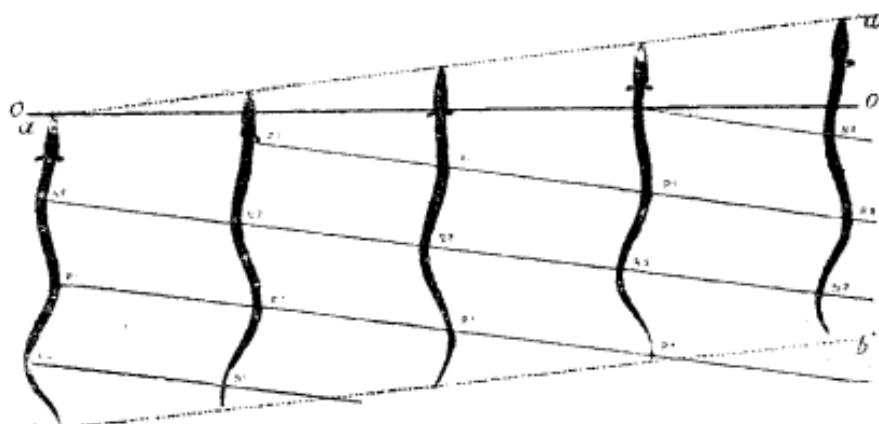


Fig. 160. — Anguille se déplaçant dans un plan horizontal. Une ligne horizontale *oo* sert de repère pour apprécier l'obliquité des lignes qui joignent les ventres et les nœuds des ondes formées par le corps, ainsi que la vitesse de progression de l'animal exprimée par l'obliquité de la ligne *aa*.

à la tête. Mais ce phénomène est difficile à provoquer, et nous n'avons pas encore pu le fixer par la Chronophotographie.

Nous avons étudié de la même manière la locomotion de diverses espèces de Serpents, soit sur terre, soit dans l'eau; la reptation des uns et la natation des autres présentent de grandes analogies avec la natation de l'Anguille, mais nous n'y avons pas trouvé la même régularité de mouvements.

Locomotion par ondulations verticales : Raie. — La *Raie*, comme l'Anguille, progresse par un mouvement ondulatoire, mais l'onde se fait symétriquement dans les deux nageoires de l'animal; de plus, elle a lieu dans le sens vertical. Pour photographier ce mouvement, il faut donc voir l'animal de côté; l'aquarium disposé comme dans la figure 156 se prête à cette étude.

La difficulté de l'expérience est de maintenir le Poisson dans une position convenable pour que son mouvement soit bien visible. Livrée à elle-même dans un aquarium, une Raie s'applique sur le fond et n'en bouge plus ; ou bien, si on l'excite, nage à la surface de l'eau, où elle produit des vagues avec ses nageoires ; ce n'est qu'à de rares moments qu'elle nage franchement entre deux eaux.

Pour forcer une Raie à demeurer dans le champ de

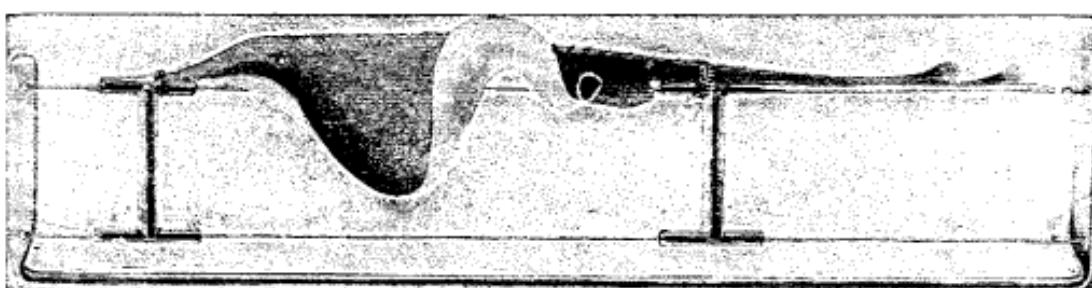


Fig. 161. — Raie, moyen de contention pour observer les mouvements des nageoires.

l'objectif et à y faire, sur place, ses mouvements de natation, nous avons recouru, après différentes tentatives, à un mode de contention qui nous a parfaitement réussi.

Disposition propre à étudier les ondulations verticales sous différents aspects. — La figure 161 représente l'appareil contentif. Une bande de fer plate est tordue et courbée à angle droit à ses deux extrémités. Des trous équidistants, percés dans ces deux branches verticales, servent à passer deux fils de fer bien tendus. Sur ces deux fils courent des tronçons de tubes réunis par des entretoises et qui portent les pinces destinées à fixer l'animal. L'un de ces tubes présente une pince armée de pointes, dans laquelle on saisit l'extrémité antérieure du poisson. L'autre porte une plaque sur laquelle repose la base de la queue ; on l'y fixe par une ligature. Ainsi immobilisé, entre ces deux points d'attache dont la position se règle suivant la longueur du Poisson, celui-ci est maintenu en place. La lame de fer repose sur le fond de l'aquarium et l'objectif est braqué sur l'animal.

Notre Raie, ainsi maintenue, ne peut ni avancer ni reculer, mais elle a toute liberté de mouvoir à son gré ses nageoires latérales. Toutefois, elle n'use généralement pas de cette liberté ; mais il faut l'exciter pour qu'elle mette en mouvement ses nageoires. Le meilleur moyen que nous ayons trouvé, c'est de lui gratter avec une baguette la base de la queue ; aussitôt on assiste à un curieux spectacle. On voit courir le long du corps une ondulation des nageoires, qui semble se diriger d'avant en arrière, mais dont l'œil se rend très difficilement compte. Ce mouvement dure parfois des minutes entières ; on a tout le temps de le soumettre à la Chronophotographie.

Ondes de la Raie vues de côté. — Lorsque l'animal est vu de côté, la série des images obtenues est celle qu'on voit figure 162, à droite. L'onde part de l'avant de chaque nageoire ; elle se porte en arrière en grandissant toujours. Mais, à mesure que de nouveaux rayons de la nageoire se soulèvent en arrière,

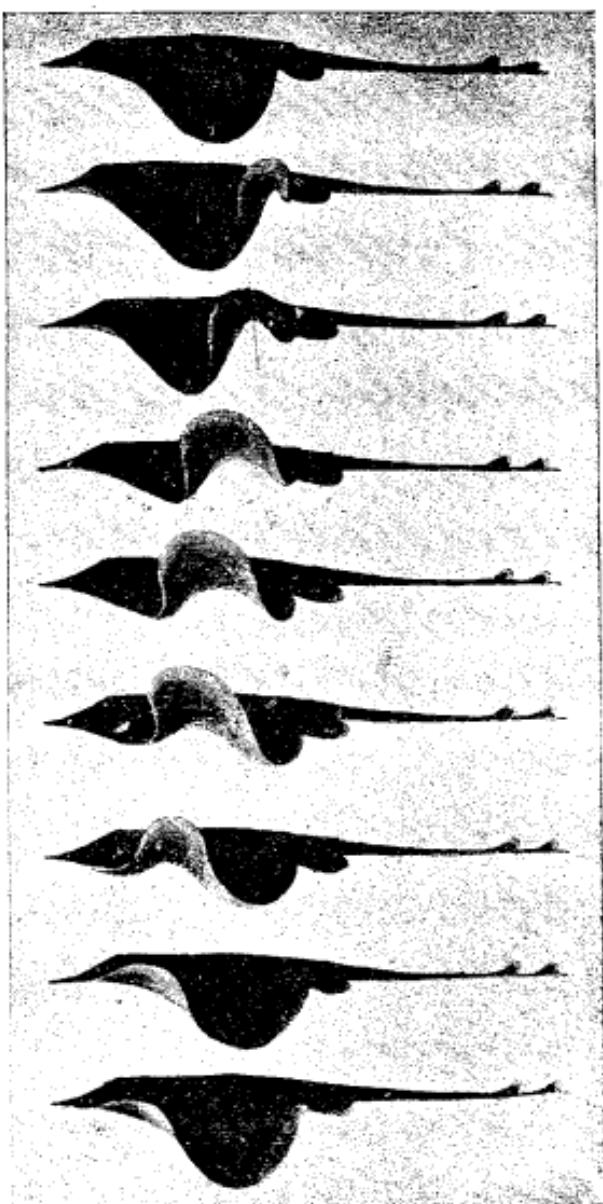


Fig. 162. — Ondulations des nageoires de la Raie vues de côté.

d'autres s'abaissent en avant, de sorte que le centre de l'onde, c'est-à-dire le point le plus élevé, chemine rapidement de la tête vers la queue du Poisson.

Arrivée à la fin de sa course, l'onde produit un soulèvement du bord postérieur de cette nageoire et s'évanouit. Mais déjà une autre onde s'est formée à l'avant, elle grandit et chemine comme la précédente; et cela dure ainsi indéfiniment. Il sera bien curieux de voir quels mouvements impriment à l'eau ces ondulations des nageoires; nous comptons y arriver en plaçant dans l'aquarium ces petites sphères brillantes qui montrent tous les détails des mouvements qui se produisent dans une masse liquide (voir au chapitre VI). Nous ne désespérons pas non plus d'obtenir les mouvements d'une Raie qui nage librement: c'est une question de temps et de patience.

Ondes de la Raie vues de face.

— Désireux d'étudier sous un autre aspect ce mouvement des nageoires, nous avons autrement orienté l'animal et, faisant faire demi-tour à la pièce de fer qui le supportait, nous avons dirigé d'avant en arrière l'axe du corps du Poisson,

Fig. 162 bis. — Ondulations des nageoires de la Raie vues d'avant.

la tête tournée vers l'objectif. La série des images (figure 162 bis) montre comment la Raie élève et abaisse le bord flexible de ses nageoires, ou plutôt comment la résistance de l'eau soulève ce bord quand la base de la nageoire s'abaisse.



Lorsque nous montrerons plus loin l'aspect de l'aile d'un Oiseau frappant l'air, on retrouvera cette même apparence. En effet, ces deux mouvements ont des effets semblables : tous deux propulsent un fluide par l'action oblique d'une surface inclinée.

L'ondulation qui vient d'être décrite sur la Raie, et qui semble due à la coordination des mouvements successifs des rayons de la nageoire, se retrouve également sur d'autres espèces aquatiques. Les *Calmars* présentent dans leurs nageoires latérales un mouvement ondulatoire très analogue, autant que l'observation permette d'en juger, car nous n'avons pas encore eu l'occasion de photographier les mouvements de ces Mollusques. Chose remarquable, le Calmar change à sa volonté le sens de l'ondulation de ses nageoires ; on le voit, dans un aquarium, nager à droite ou à gauche sans se retourner. S'il progresse, l'onde de ses nageoires court de la tête à la queue ; s'il recule, au contraire, l'onde court de la queue à la tête. Cette natation de sens alternativement contraires s'opère, bien entendu, indépendamment de l'action du siphon.

Même sur des Mollusques dont l'organisation ne semblerait pas compatible avec des mouvements si bien coordonnés, on observe aussi la propulsion par une onde ; l'*Aplysie* présente une ondulation de ce genre.

L'*Hippocampe* (fig. 463) présente à sa nageoire dorsale un mouvement ondulatoire qui le fait s'élever verticalement dans l'eau, ou le propulse du côté de sa face ventrale. Ce mouvement est très rapide et l'œil n'en peut saisir le sens. Mais on voit sur la figure 463 comment il se comporte. Dans la première image, la nageoire dorsale ne présente pas d'onde, elle est entièrement étendue ; mais sur la seconde image l'onde commence à naître, plusieurs des rayons inférieurs de la nageoire sont fléchis ; sur la troisième image, l'onde est au milieu de sa course ; sur la quatrième, elle est arrivée à l'extrémité supérieure de la nageoire ; sur la cinquième, tout est fini et le mouvement va recommencer.

Les *Tortues* d'eau offrent différents modes de natation: ordinairement, c'est une sorte d'allure quadrupède avec association diagonale du mouvement des membres, comme dans le trot, par exemple. Chez les espèces exclusivement marines, les pattes affectent la forme de nageoires, ou

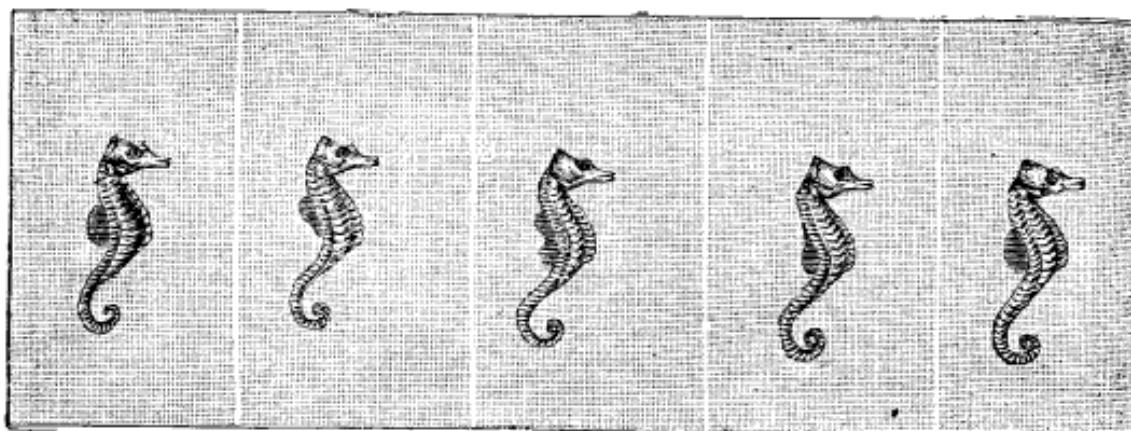


Fig. 163. — Hippocampe avec les phases successives de l'ondulation ascendante de sa nageoire dorsale et l'abaissement de l'animal dans l'eau.

mieux d'ailes rudimentaires, et les mouvements des membres antérieurs sont parfois symétriques comme ceux des ailes de l'Oiseau. Il en résulte une espèce de vol dans l'eau analogue à celui des Pingouins. Ce genre de locomotion, que nous n'avons pas encore eu l'occasion d'étudier par la Chronophotographie, rapproche, par les analogies fonctionnelles, les Chéloniens et les Oiseaux, déjà si voisins par leurs caractères morphologiques.

Mouvements lents des Astéries. — Les mouvements très lents de certains animaux aquatiques, faciles à étudier au moyen d'images successives, présentent également un grand intérêt. Rien n'est plus curieux que d'assister aux évolutions par lesquelles une Astérie qu'on a retournée sur le dos travaille à se remettre sur le ventre. Elle y arrive par des merveilles d'équilibre. On la voit (fig. 164) glisser peu à peu l'un de ses rayons sous son corps, tandis qu'elle en soulève deux autres, jusqu'à ce que son centre de gravité se trouve en dehors de sa base de sustentation. Alors, tout à coup, per-

dant l'équilibre, elle tombe sur sa face ventrale ; elle n'a plus ensuite qu'à étendre graduellement ses rayons pour être dans son attitude normale, et progresser sur le fond de l'aquarium par le mode de reptation qui lui est propre.

Ce mouvement de culbute est assez long à se produire, et exige de dix à vingt minutes d'ordinaire ; aussi doit-on, pour en rendre les phases saisissables, laisser environ une minute d'intervalle entre deux images successives.

Locomotion des petits animaux marins.
— Pour les très

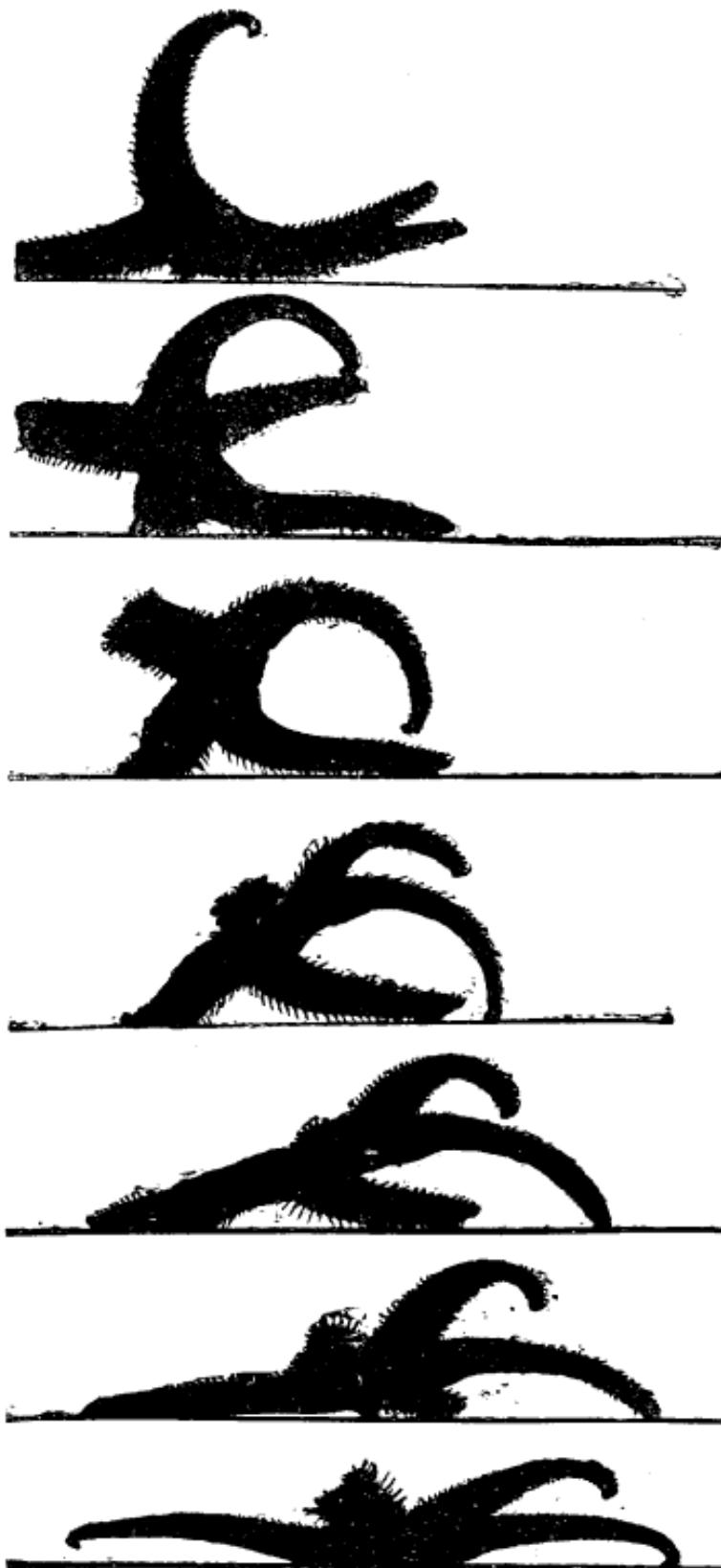


Fig. 164. — Phases du mouvement d'une Astéria qui se retourne. Succession des images de bas en haut.

petits mouvements, qu'on doit étudier de près, il faut recourir à une disposition particulière. On forme, avec deux glaces lutées au mastic, un petit aquarium dont les dimensions soient égales à celle du champ que devra couvrir l'image, et l'on place l'animal, une Crevette par exemple, (fig. 165), dans cette petite caisse remplie d'eau de mer. En



Fig. 165. — Mouvements des pattes d'une Crevette.

recueillant sur pellicule mobile les images successives qui se détachent en silhouette sur un fond lumineux, on obtient la série des mouvements des membres ; ceux, par exemple, qu'exécutent les pattes pour seconder la respiration. Nous décrirons plus tard une disposition analogue pour l'étude du vol des Insectes.

Enfin les plus petits animaux marins peuvent être étudiés dans le champ du microscope au moyen des dispositifs qui seront décrits plus loin.

CHAPITRE XIII

LOCOMOTION DANS L'AIR

Vol des Oiseaux

SOMMAIRE. — Théorie de Borelli sur le mécanisme du vol des Oiseaux. — Chronographie appliquée à la détermination de la fréquence des coups d'ailes et des durées relatives de l'élévation et de l'abaissement. — Myographie : inscription des phases de la contraction et du relâchement des muscles moteurs de l'aile. — Inscription de la trajectoire de l'humérus de l'Oiseau et des changements d'inclinaison de la surface de l'aile. — Photographie de la trajectoire de la pointe de l'aile. — Chronophotographie montrant les attitudes successives de l'Oiseau aux différentes phases d'un coup d'aile. — Images de l'Oiseau prises sous différents aspects. — Chronophotographies simultanées.

De tous les genres de locomotion qui existent chez les vertébrés, le vol des Oiseaux est resté longtemps le moins expliqué. Borelli, dans un texte assez obscur, compare l'action de l'aile à celle d'un coin. Il entendait par là que la surface de l'aile est oblique par rapport à la direction de son mouvement, et que la résistance de l'air contre cette surface inclinée se décompose en deux forces, dont l'une soutient l'Oiseau, tandis que l'autre le pousse en avant. Cette interprétation est légitimée par l'analogie què Borelli a justement établie entre l'action propulsive de l'aile et celle de la queue des Poissons.

Vivement intéressé nous-même par le problème mécanique du vol, nous avons, pendant bien des années, cherché à déterminer la nature des mouvements des ailes, et pour cela nous avons utilisé toutes les ressources de l'inscription mécanique.

Les expériences graphiques nous ont donné d'importantes indications sur la fréquence des coups d'ailes et sur les causes qui la font varier. Nous avons également obtenu l'inscription des actes musculaires qui se produisent dans le vol, avec leurs variétés chez les diverses espèces d'Oiseaux ; la trajectoire même d'un point de l'aile et l'inclinaison de sa surface empennée aux différentes phases du coup d'aile ont pu être déterminées par cette méthode. Mais c'est surtout par la Chronophotographie qu'on arrive à saisir dans leur ensemble les actes si complexes du vol de l'Oiseau.

Nous avons développé ailleurs (1) ces différentes expériences, aussi ne ferons-nous que rappeler sommairement la part qui revient à chacune des deux méthodes dans l'acquisition de connaissances nouvelles sur ce sujet.

Emploi de la Chronographie pour déterminer les durées d'élévation et d'abaissement des ailes. — De même que pour la locomotion terrestre, c'est à l'inscription mécanique qu'il faut recourir quand il s'agit de déterminer la fréquence des mouvements de l'Oiseau et les phases des actions musculaires qui se produisent dans le vol : la Chronographie et la Myographie ont été appliquées avec succès à ces déterminations.

Pour mesurer la fréquence des coups d'ailes, un Chronographe électrique inscrivait sur un cylindre tournant les ruptures et les clôtures d'un courant de pile produites par les mouvements de l'aile. A cet effet, l'Oiseau portait à l'extrémité d'une de ses rémiges une petite lame flexible que la résistance de l'air pliait, en sens divers, suivant que l'aile s'élevait ou s'abaissait. Un double fil conducteur, très flexible, reliait l'Oiseau au Chronographe et à la pile, tout en lui laissant la liberté de voler dans une vaste salle.

L'abaissement de l'aile fermait le courant, l élévation le rompait ; de sorte que chaque coup d'aile donnait un tracé

(1) *Le Vol des Oiseaux*, in-8°. Paris, G. Masson, 1890.

analogue à celui qui, dans la marche de l'Homme, traduit les appuis et levés des pieds.

En comptant, sur le graphique, le nombre des élévations et abaissements de l'aile inscrits en un temps donné pour des Oiseaux de différentes espèces, on obtient, avec une grande exactitude, la fréquence des coups d'ailes propre à chaque espèce. On voit alors que, suivant une règle générale chez les êtres vivants, ce sont les plus petits Oiseaux qui ont les mouvements les plus rapides : ainsi, le Moineau donne treize battements à la seconde, le Pigeon huit, la Buse trois, etc.

Les mêmes tracés chronographiques permettent de mesurer les durées relatives de l'élévation et de l'abaissement de l'aile. Ils montrent que ces deux phases sont inégales, surtout chez les Oiseaux à larges ailes, et que la phase d'abaissement est plus longue que celle de remontée. C'est exactement le contraire de ce qu'on avait supposé d'après des idées théoriques (1).

Inscription des actions musculaires. — L'inscription mécanique est encore le seul moyen auquel on puisse recourir pour déterminer les phases

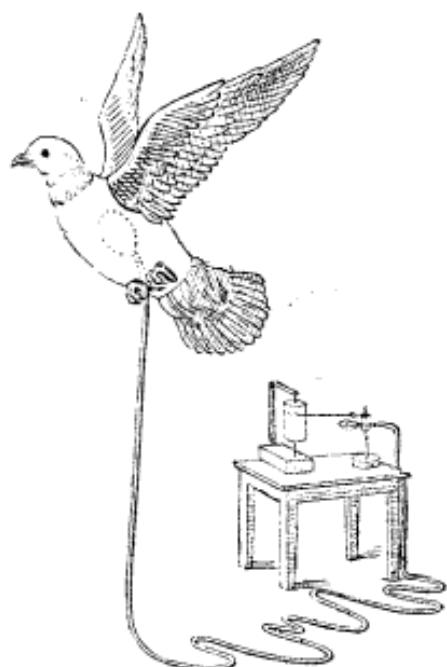


Fig. 166. — Inscription myographique des mouvements des muscles pectoraux d'un Oiseau qui vole.

(1) Cette méthode nous a permis de démontrer expérimentalement un des points les plus importants du mécanisme du vol, à savoir que l'aile trouve sur l'air un point d'appui d'autant plus résistant que la translation de l'Oiseau est plus rapide. Il semble qu'en agissant sur des masses d'air toujours nouvelles, l'Oiseau animé de vitesse trouve dans l'inertie de chacune de ces masses une série de résistances à vaincre. Dans le vol sur place, au contraire, l'air qui vient d'être frappé se dérobe sous l'aile et ne lui offre plus de résistance. Cela explique pourquoi tout Oiseau qui va s'envoler chercher d'abord à acquérir de

de contraction et de relâchement des muscles moteurs de l'aile. Un Pigeon (fig. 466) est revêtu d'une sorte de corset bien ajusté sous lequel on glisse une *Capsule myographique* (1) destinée à explorer les gonflements des muscles pec-

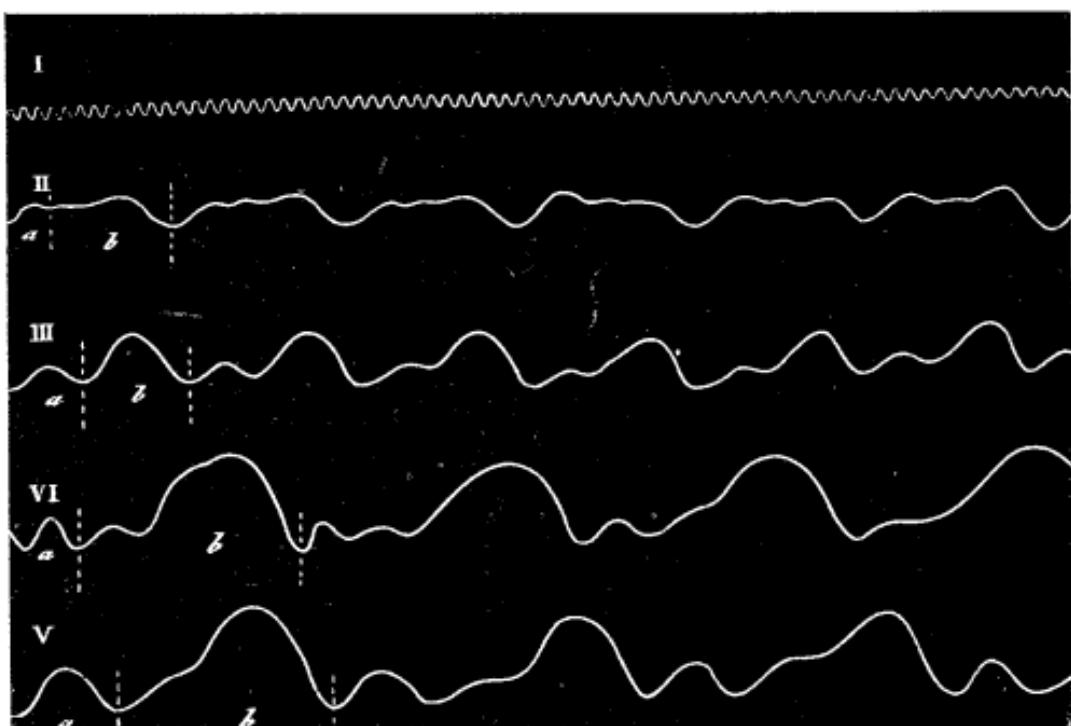


Fig. 467. — Courbes myographiques prises sur différents Oiseaux au vol. Ligne I, tracé chronographique d'un diapason à 100 VD. — Ligne II, tracé de muscles du Pigeon. — Ligne III, muscles du Canard. — Ligne IV, du Buzard. — V, de la Buse. — Dans tous ces tracés, l'ondulation *a* correspond à l'élévation de l'aile; l'ondulation *b* à l'abaissement.

toraux; un long tube flexible réunit cette capsule à un tambour à levier inscripteur. Ce tube n'entrave pas le mouvement du vol, et l'on obtient ainsi des tracés qui varient suivant l'espèce d'animal qui les a donnés (fig. 467). Un diapason chronographe permet d'estimer en 100^{es} de seconde la durée des différentes actes musculaires qui se produisent dans

la vitesse, soit en courant, soit en se laissant tomber d'un lieu élevé (*Le Vol des Oiseaux*, p. 249).

(1) Pour le fonctionnement de cet appareil, voir *La Méthode graphique*, p. 201.

un coup d'aile. Nous ne reviendrons pas sur la signification de ces courbes dont les variations ne peuvent s'expliquer que par des considérations tirées de l'Anatomie comparée (1).

Inscription de la trajectoire de l'humérus dans un coup d'aile. — Pour comprendre le mécanisme du coup d'aile, nous avons disposé des appareils assez compliqués inscrivant la trajectoire de l'humérus de l'Oiseau avec les changements d'inclinaison de la surface de l'aile aux différents instants de son parcours. Sur différentes espèces nous avons trouvé des formes légèrement différentes, mais qui toutes s'approchent d'une ellipse dont le grand axe serait dirigé en bas et en avant.

Ces expériences ont été fort laborieuses ; nous avons cependant réussi à les répéter un grand nombre de fois, et avec des résultats constants, sur une Buse qui avait fini par s'apprivoiser et par se prêter très bien à l'adaptation des appareils.

La figure 168 correspond à la trajectoire de l'humérus de la Buse. Cet os décrit autour de l'articulation de l'épaule un cône à base elliptique; l'inclinaison de la surface de l'aile est représentée, en chaque point du parcours, par une ligne différemment inclinée qui montre que le bord postérieur de l'aile se soulève pendant la phase d'abaissement; c'est un effet de la résistance de l'air contre les plumes. Dès que l'abaissement est fini, les plumes, par leur élasticité, reviennent comme des ressorts à leur direction naturelle,

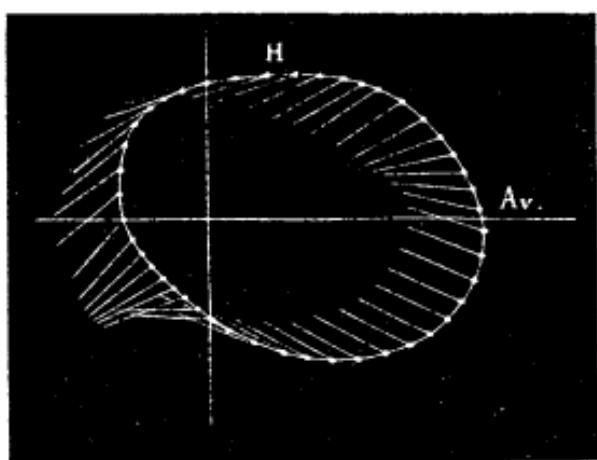


Fig. 168. — Trajectoire de l'humérus d'une Buse ; avec indication des changements d'inclinaison de la surface de l'aile dans les différents points de son parcours.

(1) Voir *Le Vol des Oiseaux*, p. 86.

de sorte que, pendant sa remontée, la face inférieure de l'aile est tournée un peu en avant.

Applications de la Chronophotographie à l'étude du vol. — Les appareils dont l'Oiseau était muni pouvaient être accusés de modifier les caractères du vol; aussi, à peine en possession de la méthode chronophotographique, l'avons-nous employée au contrôle des résultats obtenus par l'inscription purement mécanique. Non seulement ces résultats ont été pleinement confirmés, mais on peut dire que la nouvelle méthode donne la connaissance complète des mouvements de l'Oiseau qui vole.

Pour cette étude, comme pour celle des autres genres de locomotion, il a été nécessaire de combiner l'emploi de différentes méthodes, car chacune a ses avantages propres. L'inscription directe, grâce à la continuité de ses indications, l'emporte toutes les fois qu'il faut déterminer la fréquence et la durée d'un mouvement considéré en un point du corps, ou qu'il faut en apprécier les phases. La Chronophotographie est seule applicable quand on veut connaître un ensemble de mouvements; elle est également seule capable de traduire le mouvement d'un point isolé, quand ce mouvement n'est pas accompagné d'un certain développement de force motrice. On a vu un exemple de ce genre à propos de la trajectoire décrite par l'extrémité de l'aile (p. 21). Il est impossible en effet d'adapter à l'extrémité de plumes flexibles un appareil inscripteur de leurs mouvements.

Mais l'intérêt véritable de la Chronophotographie, c'est qu'elle donne des images complètes de l'Oiseau montrant les attitudes qui correspondent aux phases successives d'un coup d'aile.

Images successives d'Oiseaux prises au vol. — On fait voler devant un champ obscur un Oiseau blanc vivement éclairé par le soleil et l'on obtient une série d'images exprimant les différentes attitudes de l'Oiseau.

La figure 169 montre le vol du Goéland : l'Oiseau donnait environ cinq coups d'aile par seconde, et comme l'appareil

était réglé pour dix images, il s'ensuit qu'à chaque coup d'aile on avait deux images, l'une représentait les ailes en élévation et l'autre en abaissement. Le rapport qui existait entre le nombre des images et celui des coups d'aile à la seconde fait que, revenant toujours aux mêmes phases du vol, les images successives ne donnaient aucune variété. Il n'en est pas de même si l'on opère sur un Oiseau dont les coups d'aile ont une autre fréquence.

Ainsi, un Canard donne huit ou neuf battements à la seconde (fig. 170). Si l'appareil est réglé pour dix images, chacune d'elles représente l'Oiseau à une phase différente de son mouvement. Pour définir numériquement cette phase, elle sera par exemple les $10/9$ de la révolution, c'est-à-dire qu'entre deux images successives il se sera fait une révolution entière, plus un neuvième de la révolution suivante.

L'Oiseau sera donc vu, chaque fois, à une phase plus avancée de son coup d'aile ; enfin, à la dixième image, il se montrerait dans la



Fig. 169. — Images chronophotographiques d'un Goëland au vol (10 images par seconde).



Fig. 170. — Vol du Canard. Des fils verticaux, écartés entre eux d'un mètre, permettent d'évaluer la vitesse du vol. L'abaissement de l'aile se prononce de plus en plus dans les images suivies de droite à gauche; la succession des images se lit d'avant en arrière (10 images par seconde).

même attitude qu'à la première. Les dimensions de la figure ne permettent pas de représenter la révolution complète de l'aile, mais les cinq images qui y sont contenues correspondent à un peu plus de la moitié de ce mouvement.

Sur ces images on voit que les rémiges se courbent et donnent à la surface de l'aile une forme concave par en haut. Cette torsion de l'aile est produite par la résistance de l'air; elle en exprime l'intensité d'une manière saisissante, et si l'on veut se rendre un compte plus exact de ce que doit être la résistance de l'air sous l'aile de l'Oiseau qui vole, on n'a qu'à exercer avec la main un effort capable d'incurver au même

degré les rémiges de l'aile d'un Canard, et l'on sera surpris de l'effort nécessaire pour produire une pareille flexion. Cette courbure des plumes s'observe sur toutes les espèces d'Oiseaux, mais à des degrés différents suivant la flexibilité des rémiges : ainsi elle est très prononcée (fig. 171) vers le milieu de la période d'abaissement, sur l'aile du Héron-Aigrette (deuxième image à gauche). Nous retrouverons une torsion pareille sur l'aile de l'Insecte au vol.

Images de l'Oiseau prises sous des aspects différents. — Pour

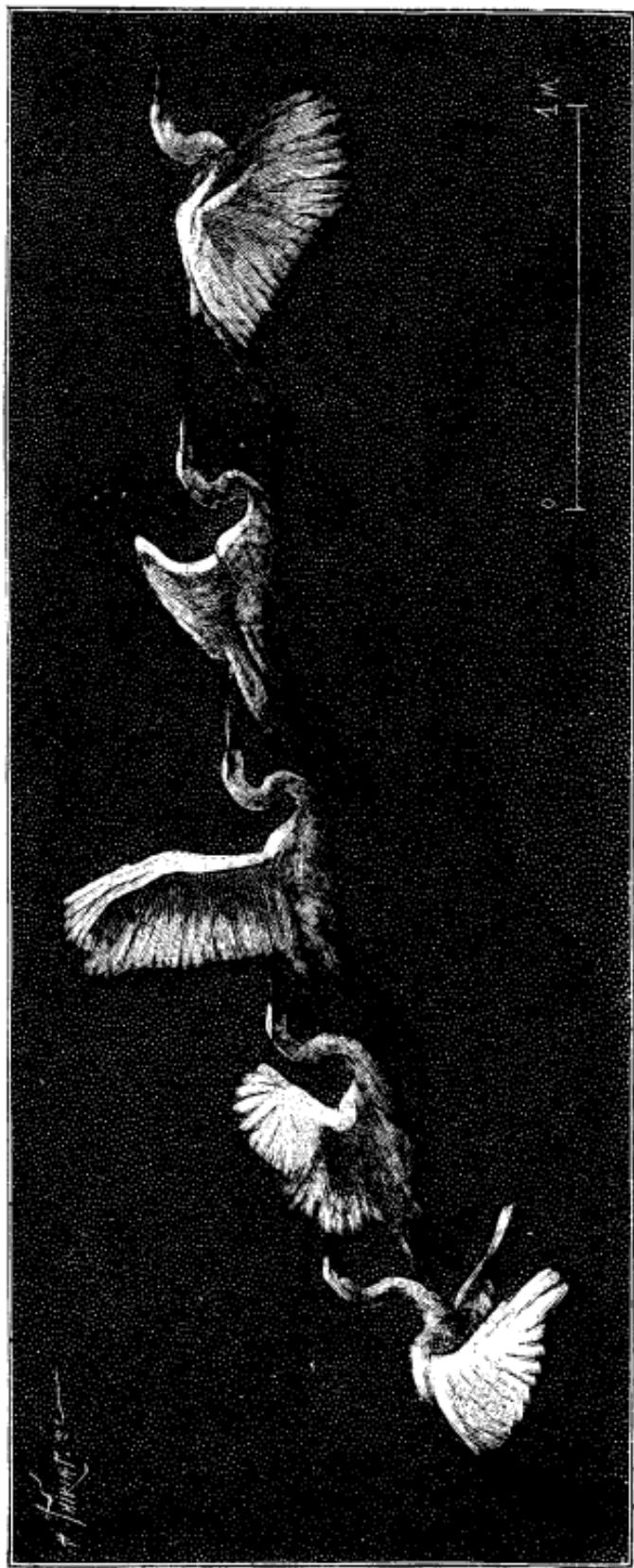


Fig. 171. — Vol du Héron-Aigrette. Une échelle métrique, au bas de la figure, permet d'évaluer la vitesse de l'Oiseau (10 images par seconde).



un mouvement que notre œil n'a jamais pu saisir, une série d'images, prises sous un seul aspect n'est pas suffisante ; elle ne permet pas de comprendre tout ce qui se passe à chaque instant; aussi est-il nécessaire de prendre les images sous différents angles, de manière à voir, par exemple, l'Oiseau volant dans la direction des appareils, ou bien pas-

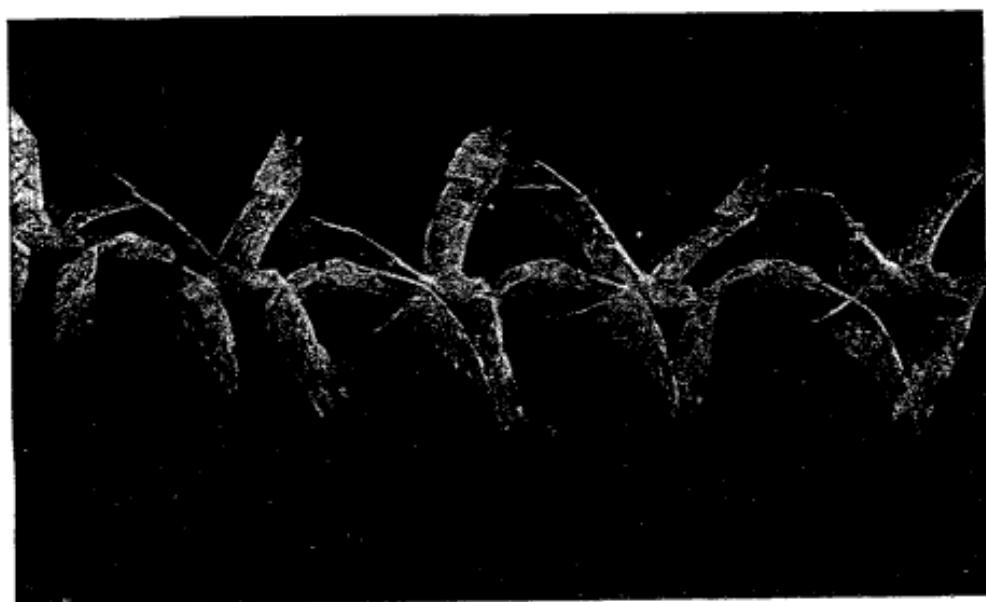


Fig. 472.

sant en travers; d'autres fois il faut prendre les photogrammes d'un lieu élevé, pour que l'Oiseau soit vu d'en haut.

La figure 472 montre un Goéland qui vole dans la direction de l'appareil. Afin d'éviter la superposition des images, on s'est placé un peu de côté. Mais on voit nettement la courbure concave inférieurement que présentent les ailes à la fin de leur abaissement.

Enfin, la figure 473 montre un Pigeon chronophotographié d'en haut. L'appareil était placé verticalement au-dessus du parcours de l'Oiseau à une hauteur de 42 mètres. Malgré la confusion qui résulte du grand nombre d'images (25 à chaque seconde), on constate les singulières positions que prend l'aile

à différents instants. Ces images se distinguent très facilement quand on est habitué à les reconnaître sur des séries où la fréquence n'est pas aussi grande.

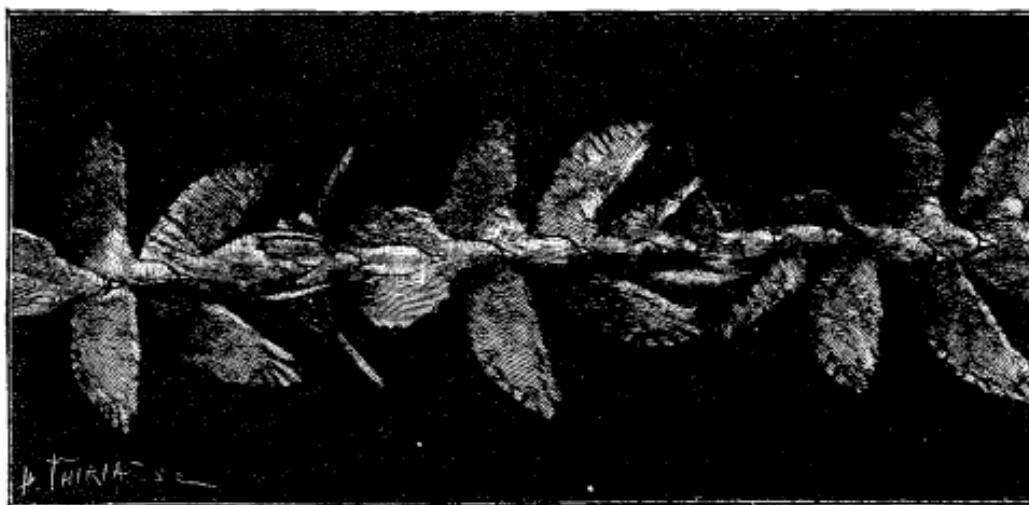


Fig. 173. — Pigeon qui vole les images sont prises d'un lieu élevé. — Chronophotographie sur plaque fixe (25 images par seconde).

Chronophotographie sur bande pelliculaire mobile. — Pour avoir, sans confusion, un très grand nombre d'images à chaque seconde, on peut recourir à la Chronophotographie sur pellicule mobile. En opérant devant un champ obscur nous avons obtenu jusqu'à soixante images distinctes par seconde. La figure 174 est un exemple de ce genre. La bande pelliculaire a été découpée en trois tronçons qu'on a juxtaposés dans un tableau d'ensemble; des numéros d'ordre en chiffres arabes indiquent la succession des images.

Images simultanées d'un même Oiseau prises sous différents aspects. — Lorsqu'on veut introduire toute la précision possible dans l'analyse des mouvements du vol, il faut prendre les images d'un Oiseau sous des aspects différents et d'une manière simultanée. Pour cela, trois appareils sont nécessaires, ainsi que trois champs obscurs sur lesquels se projettent les images prises sous des angles différents. Cette disposition est représentée figure 175.

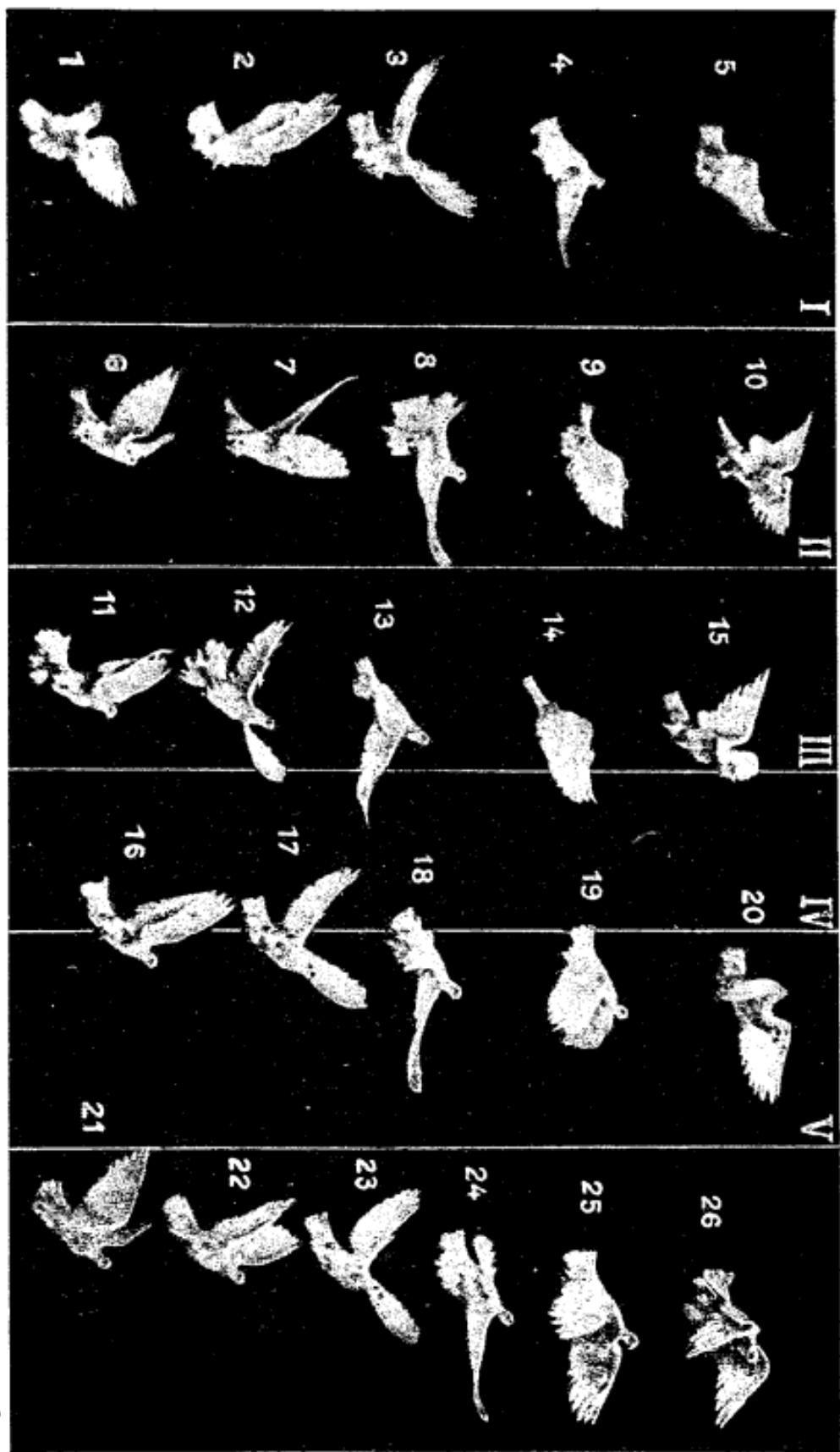


Fig. 175. — Images d'un pigeon recueillies devant un fond noir, sur pellicule mobile, avec soixante éclairages par seconde.

Elle nous a permis de recueillir sur le Goéland les trois séries d'attitudes représentées figure 176, montrant l'Oiseau de face, de côté et d'en haut. Ces images se complètent l'une par l'autre (1) et permettent de déterminer, à tout instant, la

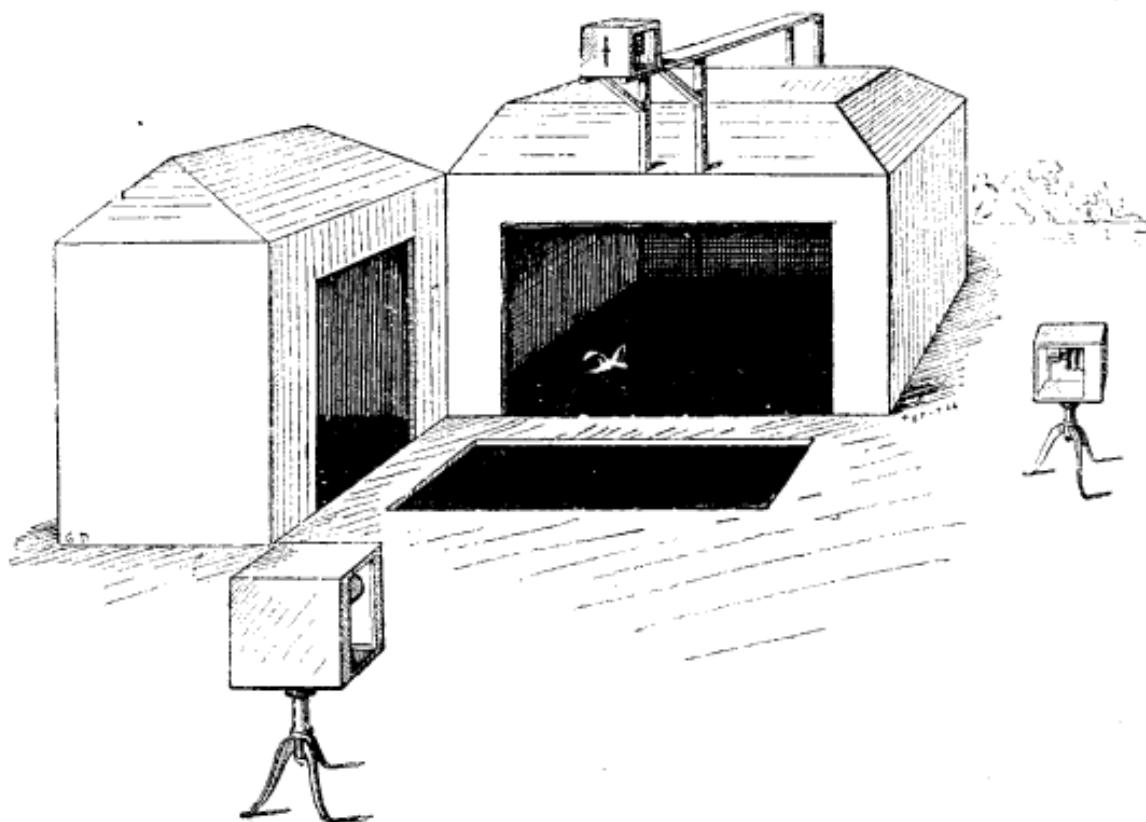


Fig. 173. — Disposition des trois champs obscurs et des trois appareils chronophotographiques pour prendre en même temps, suivant trois aspects différents, les images d'un Oiseau qui vole.

position de chaque partie du corps et des ailes, par rapport aux trois dimensions de l'espace.

Nous avons même pu, d'après ces trois images, construire une série de figures en relief montrant les attitudes successives de l'Oiseau. Ce genre de représentation est presque

(1) Nous n'avons pas à refaire ici l'analyse de ces images, qui nous ont donné la connaissance complète des mouvements de l'Oiseau considéré au point de vue cinématique, et desquelles nous avons essayé de tirer la mesure du travail dépensé dans le vol, d'après les accélérations imprimées à la masse du corps (voir *Le Vol des Oiseaux*, p. 324).

indispensable pour faire comprendre les mouvements du

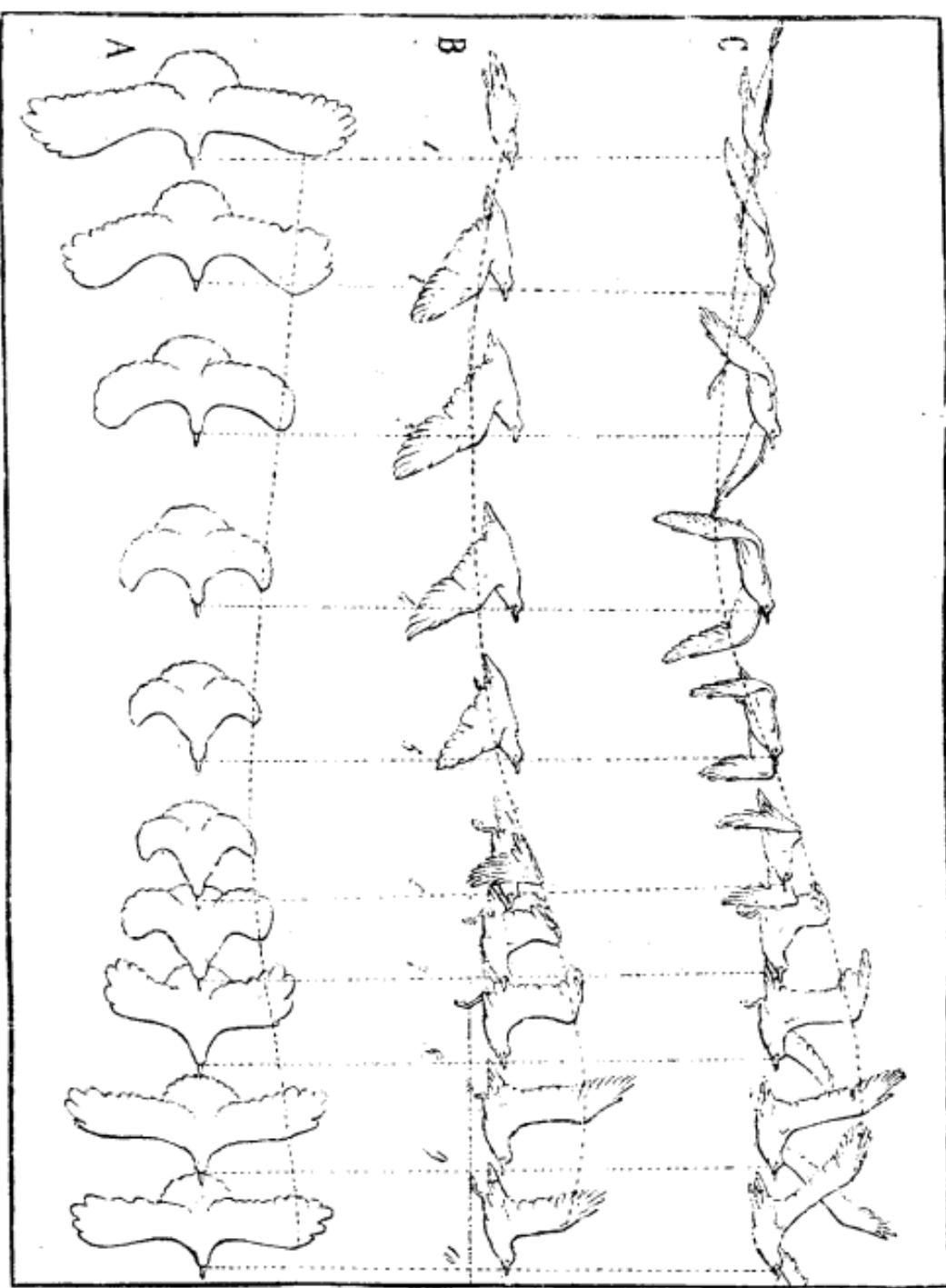


Fig. 176. — Trois séries d'images représentant les attitudes d'un Goliard aux mêmes phases d'un coup d'aile, mais prises sous des aspects différents. A, vue d'en haut; B, vue de côté; C, vue oblique d'avant et de côté.

vol, car l'observation seule ne saurait en donner la moindre idée.

CHAPITRE XIV

LOCOMOTION DANS L'AIR

Vol des Insectes.

SOMMAIRE. — Fréquence des coups d'aile des Insectes évaluée d'après le son que produit leur vol. — Inscription mécanique des coups d'aile; leur fréquence chez les différentes espèces. — Synchronisme de l'action des ailes; changement d'inclinaison de leur surface. — Trajectoire de l'aile d'un Insecte; son interprétation. — Expérience qui démontre le sens dans lequel se fait le parcours de l'aile, et ses changements de plans. — Insecte artificiel; théorie du vol des Insectes. — Application de la Photographie à l'étude du vol des Insectes; expériences de Lendenfels. — Trajectoire de l'aile pendant la translation de l'animal. — Photographie sur pellicule mobile: disposition de l'expérience; type divers d'Insectes au vol : Abeilles, Mouches, Tipules. — Confirmation de la théorie mécanique du vol.

Fréquence des coups d'ailes des Insectes évaluée d'après le son que produit leur vol. — Le vol des Insectes s'accompagne d'un bourdonnement, assez grave chez les grosses espèces, très aigu chez les petites, les Moustiques par exemple. Si l'on assimile les ailes d'un Insecte à des lames vibrantes, on peut évaluer la fréquence de leurs mouvements d'après la tonalité du son produit; mais alors il faut admettre que les quatre ailes d'un Hyménoptère ou les deux ailes d'un Diptère vibrent parfaitement à l'unisson.

Dans cette estimation de la fréquence des battements d'ailes une difficulté se présente : si l'on écoute une Mouche qui vole, on s'aperçoit que la tonalité du son change à chaque instant. Avec quelque attention, on constate en outre que le son devient plus haut lorsque la Mouche s'approche,

plus grave quand elle s'éloigne. Cela n'implique pas un changement dans la fréquence des battements des ailes : c'est un phénomène de tout point comparable à la variation apparente de l'acuité du sifflet d'une locomotive en marche. Lorsque nous croisons un train, le siflement de la machine nous semble devenir plus aigu à mesure qu'il se rapproche ; il devient plus grave en s'éloignant. Ce fait d'acoustique a reçu depuis longtemps son explication.

Du reste on peut observer que si l'on tient un Insecte immobile, en saisissant avec une pince l'extrémité de son abdomen, il exécute les mouvements du vol, mais le son produit par ses ailes est sensiblement fixe.

Inscription mécanique des mouvements de l'aile d'un Insecte. — Ces mouvements des ailes d'un Insecte captif, on peut les inscrire directement sur un cylindre tournant recouvert de noir de fumée. La couche noire se détache au

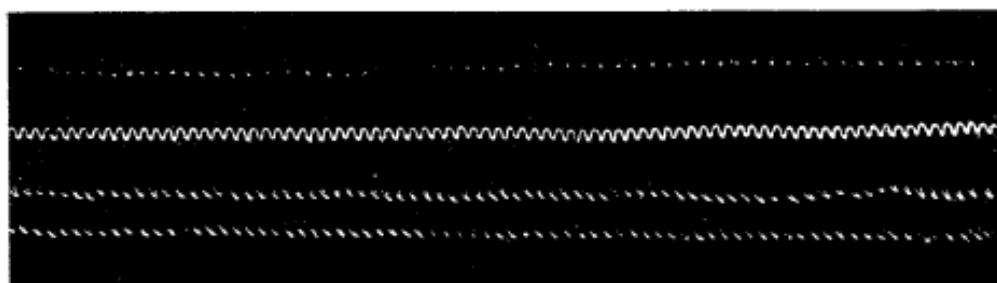


Fig. 177. — Les deux lignes supérieures sont produites par les frôlements de l'aile d'un Bourdon sur le cylindre enfumé ; au milieu, les vibrations d'un diapason de 250 VD permettent d'évaluer, par comparaison, la fréquence des battements de l'aile. En bas, frôlement de l'aile d'une Abeille.

moindre frôlement, et laisse à nu la surface blanche du papier.

Ainsi fut obtenue la figure 177, où plusieurs lignes ponctuées ont été tracées par l'aile d'un Bourdon. En tenant l'animal au bout d'une pince, on peut l'orienter de différentes façons, de sorte que le contact d'une aile se fasse par sa pointe et ne laisse sur le cylindre qu'un simple ponctué. Si l'aile frotte plus fortement sur le cylindre, elle trace une sorte de virgule ;

en même temps on observe que ses battements sont un peu moins fréquents ; cela tient à ce que les résistances de frottement ralentissent les mouvements de l'Insecte. Un pareil effet s'observe dans les mouvements de toutes les espèces d'animaux.

Pour mesurer avec précision le nombre des coups d'ailes qu'un Insecte donne à chaque seconde, on inscrit en même temps sur le cylindre les vibrations d'un diapason. Celles-ci tracent sur le papier noirci une ligne onduleuse dont chaque inflexion représente ici $1/250$ de seconde. Il n'y a plus qu'à compter le nombre des traces que laisse l'aile de l'Insecte sur la longueur du papier qui contient 250 vibrations du diapason, et l'on obtient avec une précision extrême le nombre des coups d'ailes à la seconde. C'est ainsi qu'on a trouvé pour la Mouche commune, 330 battements par seconde, pour l'Abeille 490, pour le Macroglosse du Caille-lait 72, pour la Libellule 28, etc.

Suivant la loi générale déjà signalée pour les Oiseaux, les petites espèces d'Insectes ont les mouvements plus rapides que les grandes.

Synchronisme du mouvement des deux ailes. Changements d'inclinaison de leur surface. — On peut encore demander à l'inscription directe des mouvements des ailes quelques autres renseignements.

Ainsi, en orientant une Mouche de telle façon que les pointes de ses deux ailes frottent à la fois sur le cylindre, on voit que le nombre des contacts donnés par les deux ailes est le même, et que leurs mouvements sont parfaitement synchrones.

Enfin, sur d'autres espèces dont les ailes sont couvertes à leur face supérieure d'un léger duvet, tandis que la face inférieure en est dépourvue, on obtient des tracés qui alternent entre eux et qui présentent des aspects différents.

La figure 178 est obtenue avec le Macroglosse du Caille-lait (un petit Sphynx diurne à vol très rapide, fort abondant dans nos pays). L'animal était orienté de telle sorte que le bord

postérieur de l'extrémité de son aile frottait sur le cylindre. Or, dans ses mouvements de va-et-vient, l'aile frottait alternativement par sa face villeuse et par sa face lisse, ce qui implique un changement d'inclinaison du plan de l'aile. Ce fait est important à noter, car il a une grande valeur pour l'explication du mécanisme du vol.

Telles sont les notions que donne l'inscription mécanique des mouvements de l'Insecte. On pourrait songer à demander

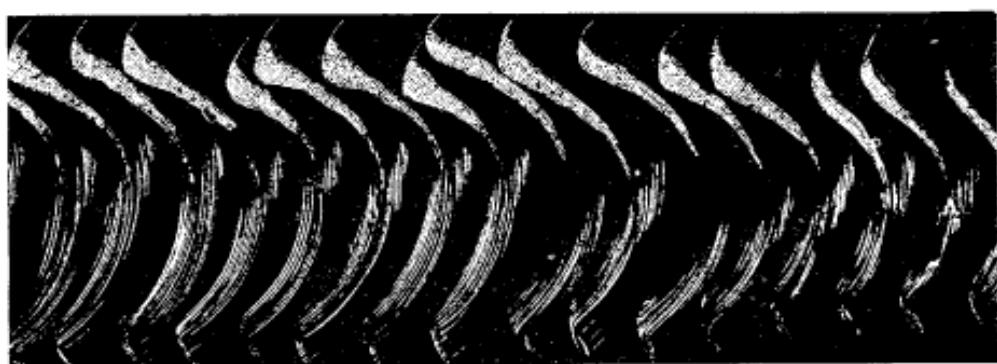


Fig. 178. — Frôlements de l'aile d'un Macroglossum du Caille-lait sur le cylindre enfumé.

à cette méthode la trajectoire de la pointe de l'aile ; mais cette aile, se mouvant en divers sens autour de l'articulation thoracique, décrit nécessairement, par sa pointe, une figure sphérique qui ne serait inscriptible en entier qu'à l'intérieur d'une sphère creuse de même rayon. Le contact de l'aile avec la surface du cylindre ne peut donc avoir lieu que sur une très petite étendue ; il faut recourir à une autre méthode pour obtenir la trajectoire que sa pointe décrit dans l'air.

Trajectoire de la pointe de l'aile. — Nous souvenant de ces rubans de feu qui laissent leur empreinte sur la rétine, quand on agite la nuit un objet lumineux, nous avons appliqué au bout de l'aile d'une Guêpe une paillette d'or battu. Puis, maintenant l'Insecte captif au bout d'une pince, nous l'avons placé au soleil devant un fond obscur. Nous vimes alors une trajectoire brillante en forme de lemniscate (fig. 179). Le chiffre S, la représente parfaitement. La ressemblance est d'autant plus complète que, dans la trajectoire

de l'aile, une des branches semble plus large et plus brillante que l'autre.

En décrivant cette forme nous ignorions, ou tout au moins nous avions oublié que M. Pettigrew, en Angleterre, avait décrit la même forme pour l'aspect de l'aile d'un Insecte qui vole, et cela donna lieu de sa part à de justes revendications.

Toutefois il faut remarquer que, d'après M. Pettigrew, la formation de la figure décrite par l'aile de l'Insecte est tout autre que celle que nous admettons.

Pour l'auteur anglais, dans la lemniscate décrite, le *bord*

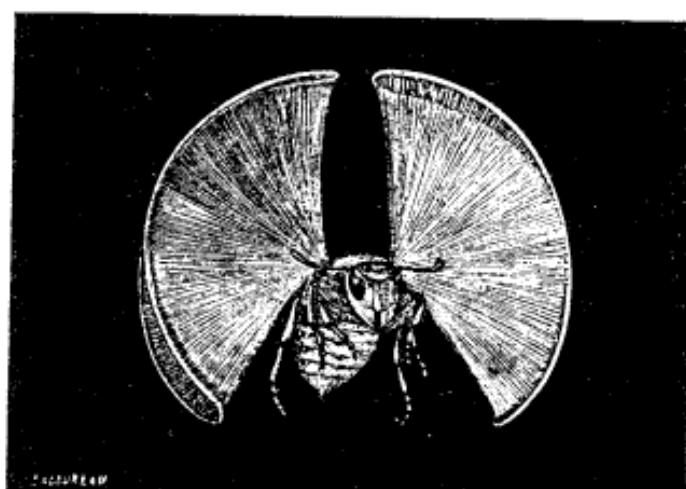


Fig. 179. — Aspect d'une Guêpe volant au soleil. L'extrémité des ailes a été dorée.

antérieur de l'aile, parcourt une des branches, tandis que le *bord postérieur* parcourt l'autre. Des flèches indiquent, sur la figure 180 qui est empruntée à son ouvrage, un *renversement complet* de la surface de l'aile *dans un simple mouvement* de gauche à droite.

Pour nous, au contraire, la *pointe* de l'aile décrit successivement chacune des branches de la lemniscate *dans son double mouvement* de gauche à droite, puis de droite à gauche. Pendant ce temps, la surface de l'aile s'*incline* en sens divers par l'effet de la résistance de l'air; des lignes ponctuées indiquent dans la figure 181 le sens de cette inclinaison qui *ne saurait être un renversement complet*.

Or, la manière de comprendre la formation de la figure optique tracée par l'aile en mouvement change complètement la théorie mécanique qui s'en déduit. Dans la théorie de M. Pettigrew, le retournement de l'aile serait *actif*, c'est l'ac-



Fig. 180. — Trajectoire des bords antérieurs et postérieurs de l'aile d'un Insecte dans une demi-oscillation (d'après Pettigrew).

tion des muscles qui le produirait; dans la nôtre ce changement d'inclinaison de l'aile est *passif*, c'est la résistance de l'air qui le produit, et cette flexion ne porte que sur la partie postérieure de l'aile, car l'antérieure est formée par une

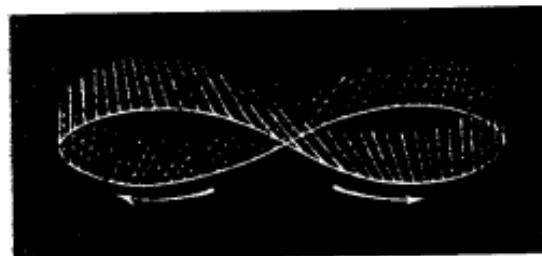


Fig. 181. — Trajectoire du bord antérieur de l'aile dans une oscillation complète (d'après Marey). De petites lignes inclinées en sens divers expriment pour l'une des branches les inclinaisons de la surface de l'aile.

nervure rigide. L'importance de l'interprétation de la figure décrite par une aile d'Insecte est donc très grande, puisque c'est d'elle que dépend l'explication du mécanisme du vol. Aussi ne nous sommes-nous pas borné à opposer théorie à théorie. Mais nous avons appuyé la nôtre sur un grand nombre de démonstrations expérimentales.

Expériences pour déterminer le sens dans lequel se fait le parcours de l'aile, et pour expliquer le mécanisme de ses changements d'inclinaison. — La méthode optique, c'est-à-dire la détermination des mouvements de l'aile d'après la trajectoire que laisse dans notre œil la paillette d'or dont elle est munie, montre que la surface alaire s'incline diverse-

ment aux différentes phases de son parcours. Or, on a vu que les deux branches du S décrit sont inégalement lumineuses : nous en avons conclu que, pendant le parcours de l'une des branches, l'inclinaison de l'aile est favorable à la réflexion du soleil sur la paillette brillante, tandis que cette paillette est inclinée sous un angle défavorable pendant que l'aile parcourt l'autre branche. S'il en est ainsi, en changeant l'orientation de l'animal, on doit pouvoir changer les conditions de la réflexion de la lumière ; c'est ce qui arrive en effet. Quand on fait tourner l'Insecte de 90° environ, la branche brillante perd son éclat, tandis que

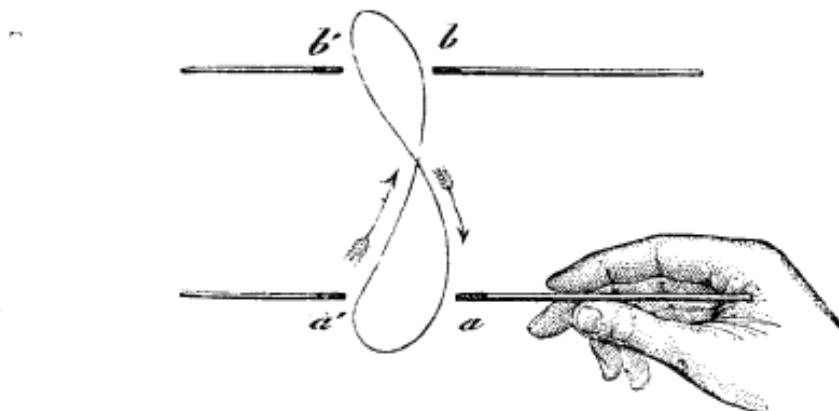


Fig. 182. — Expérience pour contrôler le sens du mouvement de l'aile d'un Insecte.

l'autre devient très brillante à son tour. Le changement d'inclinaison de l'aile se trouve ainsi démontré. On pourrait même déduire de cette expérience l'angle que le plan de l'aile forme avec la direction de son parcours, mais on verra par l'emploi de la Photographie que cet angle varie à chaque instant. Tout au plus pourrait-on dire, qu'au milieu de la trajectoire cet angle est d'environ 45°, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre.

Pour déterminer avec sûreté le sens du parcours de l'aile aux différents points de sa trajectoire visible, nous avons opéré de la manière suivante :

Une petite baguette de verre filé fut noircie à la fumée d'une bougie ; le plus léger frottement agissant sur cette ba-

guette devait enlever le noir qui la recouvrait, et faire connaître le sens du mouvement dans chacune des branches de la lemniscate. L'expérience fut faite dans les conditions représentées figure 182. On explora avec la baguette enfumée les différents points de la trajectoire décrite, et d'après l'orientation de la partie où le noir avait été enlevé on déduisit le sens du mouvement. Ce sens est représenté sur la figure par des flèches.

Enfin, à titre de contrôle, nous avons construit un *Insecte artificiel* dont les ailes étaient formées, comme dans la Nature, d'une nervure rigide bordée en arrière par un voile flexible. Nous avons vu cette petite machine se déplacer comme un Insecte véritable, donner comme lui une trajectoire lumineuse en forme de lemniscate, comme lui produire un souffle d'air en arrière et une aspiration en avant (1).

Théorie du vol de l'Insecte. — La théorie du vol de l'Insecte se dégage complètement des expériences qui précèdent. L'aile, dans son mouvement de va-et-vient, s'infléchit en sens divers sous la résistance de l'air. Son action est, à chaque fois, celle d'un plan incliné qui, frappant un fluide, en décomposerait la résistance et y éprouverait toujours une réaction favorable à la propulsion. Ce mécanisme est le même que celui de la *godille* des bateliers : cette rame, dans ses va-et-vient, est inclinée alternativement en sens opposés et, chaque fois, communique au bateau une force impulsive.

Il y a toutefois une différence entre ces deux propulseurs : la rame dont on se sert pour godiller présente à l'eau une surface rigide, aussi le batelier doit-il lui imprimer avec la main des mouvements de rotation alternatifs, pour qu'elle frappe l'eau dans les deux sens avec une inclinaison favorable. Plus simple est le mécanisme de l'aile de l'Insecte. La flexibilité de la membrane qui la forme en arrière, et la rigidité de la nervure qui existe en avant, font que l'aile s'oriente d'elle-même sous l'inclinaison favorable. Les muscles

(1) *La Machine animale*, livre III, chap. II.

n'impriment à l'aile qu'un mouvement de va-et-vient; et la résistance de l'air fait le reste, c'est-à-dire les changements d'inclinaison de sa surface, et même, conséutivement, la trajectoire en lemniscate que décrit son extrémité.

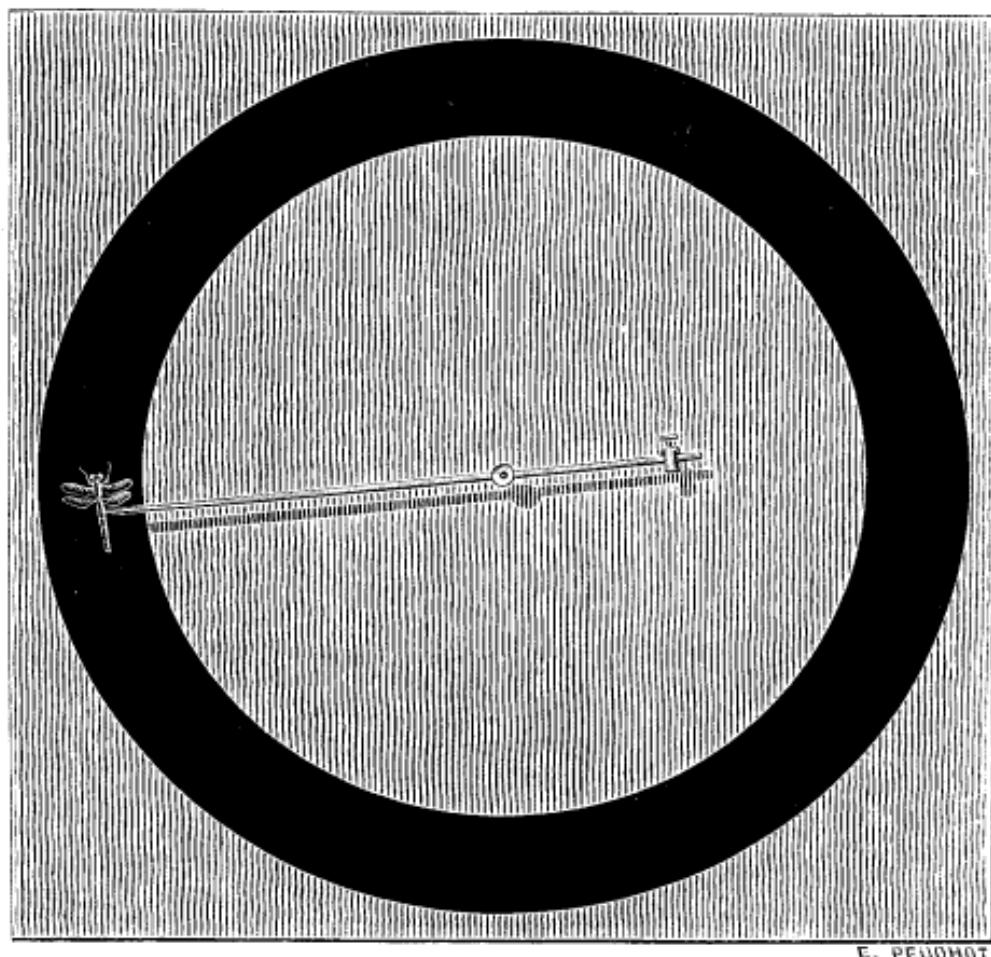
Applications de la Photographie à l'étude du vol des Insectes. — Le lecteur s'étonne peut-être de voir que nous n'ayons pas encore recouru à la Photographie pour la détermination de la trajectoire de l'aile de l'Insecte, qu'elle est seule capable de tracer exactement. C'est que les expériences qu'on vient de lire sont fort antérieures à l'emploi de la Photographie pour l'étude des mouvements.

Du reste, la Photographie a été appliquée par Lendenfeld (1) pour déterminer les attitudes des ailes sur la Libellule. Cet auteur montre aussi comment la lemniscate que décrit la pointe de l'aile se déplace et se transforme sous l'influence de la translation de l'animal. Les expériences du naturaliste allemand ont été faites sur une Libellule fixée à l'extrémité d'une sorte de fléau de balance, et qui ne pouvait s'élever qu'à une faible hauteur. Ces conditions ne permettaient pas de voir ce que devient en plein vol la trajectoire de l'aile dans l'air. Nous avons réussi à photographier l'aile dorée d'un Insecte, non pas dans le vol absolument libre, mais dans un vol en manège susceptible de prendre une grande rapidité.

Photographie de la trajectoire de l'aile. — Voici la disposition adoptée pour ces expériences. Une caisse de bois carrée, d'un mètre de côté sur 0^m,25 de profondeur, est doublée intérieurement de velours noir (fig. 483). La paroi antérieure de cette caisse est formée d'un disque plein, central, porté par un pied intérieur, et d'une partie antérieure percée d'un trou circulaire plus grand que le disque. Il existe donc dans cette paroi un espace annulaire vide, s'ouvrant dans l'intérieur de la caisse, et présentant l'aspect d'un anneau parfaitement noir. C'est devant ce champ annulaire qu'on fera voler l'Insecte.

(1) Lendenfeld, *Der Flug der Libellen*, Acad. der Wissenschaften, Wien, 1881, Heft I, p. 289.

Une aiguille implantée perpendiculairement au centre du disque sert d'axe à un petit manège formé d'une paille et de son contre-poids. A l'extrémité de cette paille est fixée une pince légère, sorte de *serre-fine* des chirurgiens, avec laquelle on saisit l'Insecte par un point de son abdo-



E. PEUHOT.

Fig. 483. — Insecte volant en manège devant un champ obscur annulaire.

men. Dès qu'elle est ainsi attachée, on abandonne la Libellule à elle-même, et elle vole en entraînant le manège, d'un mouvement circulaire assez rapide, qui dure fort longtemps. La paillette d'or dont son aile est munie décrit une trajectoire dont la figure 484 est la reproduction. On ne retrouve plus ici la lemniscate que l'Insecte décrivait dans le vol captif, mais une courbe onduleuse présentant aux différents points

de son parcours des changements d'éclat provenant de l'inclinaison de l'aile plus ou moins favorable à la réflexion de la lumière du soleil.

Chronophotographie des Insectes sur pellicule mobile.

— La série des démonstrations qui viennent d'être rappelées

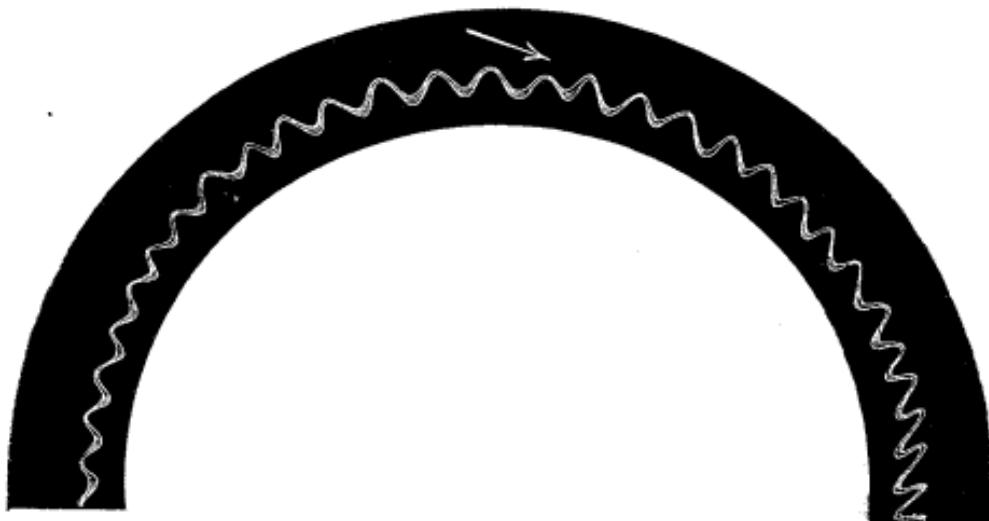


Fig. 184. — Trajectoire photographique d'une aile de Libellule.

ne nous semble pas laisser de doutes sur l'exactitude de notre théorie du vol des Insectes. Mais si cette théorie est établie dans son ensemble, il reste bien des points à élucider encore. En quoi consistent les différences du vol chez les différentes espèces ? Quel est le rôle des balaneiers, ces organes singuliers que l'Anatomie comparée assimile à des ailes avortées, mais dont l'existence, chez les Diptères, est absolument indispensable au vol ?

Il nous a paru que la Chronophotographie devait éclairer ces questions et beaucoup d'autres encore, si elle parvenait à rendre nettement visible l'aile de l'Insecte à un moment de son parcours. Mais quelle brièveté ne faudra-t-il pas donner à l'éclairage pour avoir une image nette de l'aile d'un Insecte, lorsqu'un temps de pose de $1/2000$ de seconde est déjà trop long pour l'aile de l'Oiseau, dont le mouvement est bien moins rapide ? D'autre part, n'est-il pas à craindre qu'avec des temps de pose si courts, l'éclairage ne soit insuffisant pour

donner des images? Il faut donc à la fois, pour diminuer les temps de pose, réduire à une grande étroitesse les fenêtres de l'obturateur rotatif, et, d'autre part, diriger sur l'Insecte une lumière extrêmement concentrée.

La figure 185 représente, théoriquement, la disposition à laquelle nous avons eu recours. On y voit, de droite à gauche, en premier lieu, le faisceau de lumière parallèle qu'un héliostat dirige suivant l'axe optique principal de l'objectif. Ce faisceau est concentré par une lentille C (1) derrière

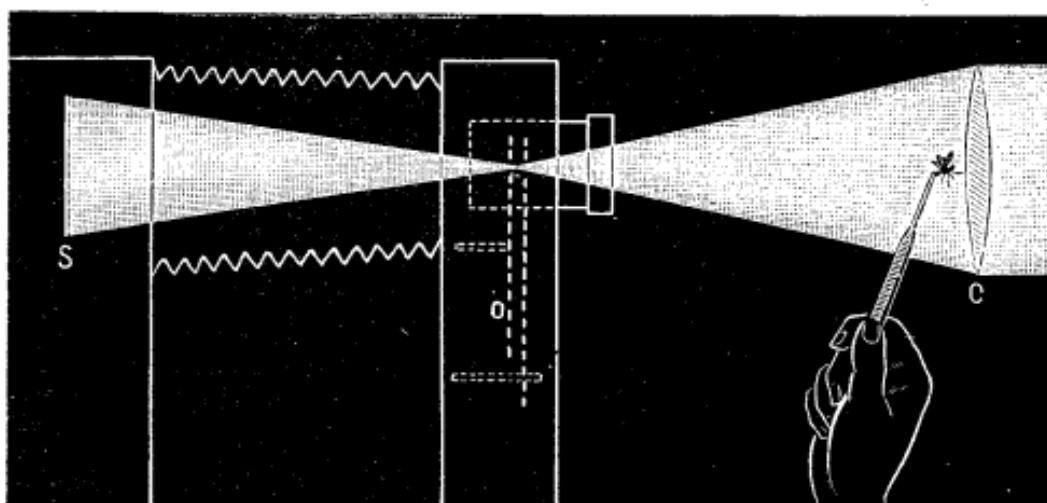


Fig. 185. — Disposition théorique de l'éclairage employé pour étudier le vol des Insectes.

laquelle se voit l'Insecte maintenu captif à l'extrémité d'une pince. Le faisceau concentré traverse la première lentille de l'objectif, et ses rayons convergent sur les disques obturateurs; ils traversent ces disques au moment de la coïncidence de leurs fenêtres, et vont former sur la pellicule sensible un champ lumineux au milieu duquel se détache en silhouette l'image de l'Insecte.

Le vol captif que l'on obtient avec ce mode de contention de l'Insecte ne réussit pas sur toutes les espèces; il permet, il est vrai, d'orienter à volonté l'animal et de saisir les attitudes de ses ailes sous différents aspects, mais il donne lieu à

(1) La longueur focale de cette lentille doit être au moins double de celle de l'objectif.

des mouvements d'une amplitude et d'une rapidité exagérées.

Pour étudier le vol libre, on dispose, en avant de l'objectif, une boîte de carton (fig. 186), fermée en avant par une glace qui vient toucher la *lentille-condensateur*. Introduit dans cette boîte, l'Insecte va aussitôt voler contre la

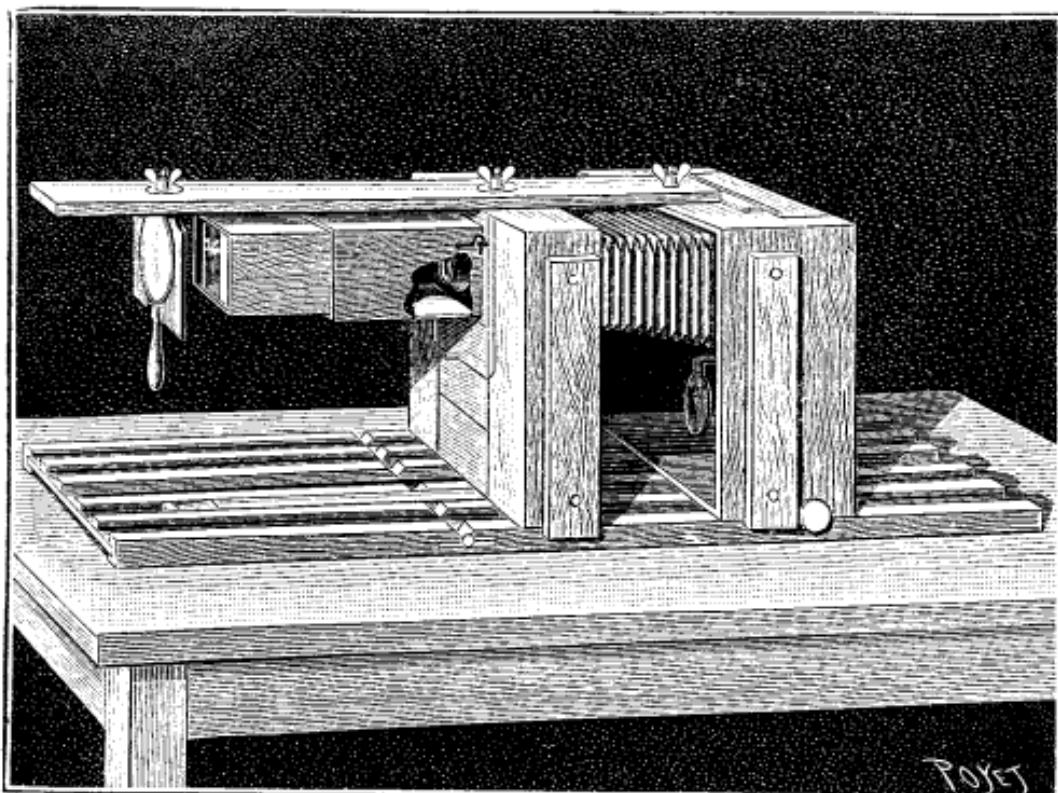


Fig. 186. — Appareil chronophotographique disposé pour étudier le vol naturel d'un Insecte.

vitre qui a été mise préalablement au foyer de l'objectif. Du reste, on surveille la manière dont s'accomplit le vol et, au moment voulu, on presse la gâchette qui met en marche la pellicule sensible. C'est ainsi qu'a été obtenue la figure 187, qui représente une Mouche courant d'abord sur la vitre, puis prenant son essor.

Une grande brièveté des poses est nécessaire, avons-nous dit, pour obtenir des images nettes des ailes, à cause de l'extrême rapidité de leurs mouvements.

Avec des fenêtres de 2 centimètres de largeur, dont les coïncidences donnaient des éclairements de $1/2000$ de

seconde, les images n'étaient pas nettes, du moins pour l'extrémité des ailes. Nous avons graduellement réduit le diamètre de ces fenêtres, en resserrant les rideaux de métal qui servent à en régler l'ouverture. Ces fenêtres, n'ayant que 4^{mm},5 de largeur, leur coïncidence avec un diaphragme de même ouverture réduisit la durée de l'éclairement de 1/25000 de seconde. C'est alors seulement que nous avons obtenu des images nettes.

L'Insecte qui vole contre la vitre occupe, en profondeur, un espace assez grand; il faut donc, pour que toutes les par-

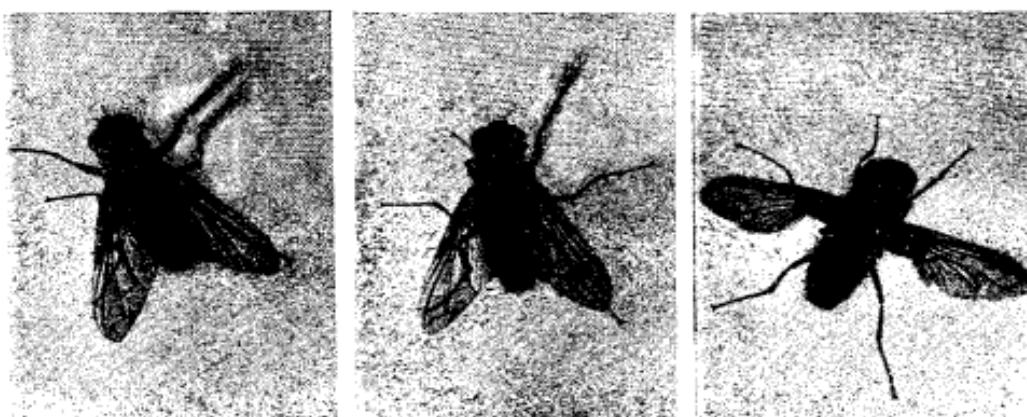


Fig. 187. — Mouche courant sur la vitre, puis prenant son essor.

ties de son corps soient nettement représentées, que l'objectif ait une grande profondeur de foyer. Or, il arrive précisément que l'extrême étroitesse des fentes par lesquelles doit passer la lumière, et l'étroitesse correspondante du diaphragme, donnent au foyer plus de deux centimètres de profondeur.

La figure 188 montre une Abeille à différents instants de son vol. L'Insecte prend quelquefois une position presque horizontale; la partie postérieure de son corps est beaucoup plus près de l'objectif que la tête, et pourtant les deux extrémités se voient sur l'image avec une égale netteté.

Sur les images successives qui sont séparées l'une de l'autre par un intervalle de 1/20 de seconde (durée énorme relativement à celle d'un battement d'aile qui n'est que de 1/190 de seconde), il ne faut pas songer à suivre les phases du mouve-

ment en prenant, pendant qu'il s'accomplit, une série d'images représentant les attitudes successives de l'aile aux différents instants de son parcours. Toutefois l'analyse de ces images isolées donne, sur le mécanisme du vol, bien des renseignements d'un grand intérêt.

Ainsi, on a vu que, par l'effet de la résistance de l'air, le voile de l'aile s'incline, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre. Or, comme l'oscillation, pendant le vol, se fait dans un plan horizontal, l'inclinaison du voile doit diminuer la largeur apparente de l'aile. Cet effet est très sensible sur la figure 489. On y peut comparer entre elles deux Tipules, l'une au vol, l'autre immobile et posée contre la vitre.

La Tipule immobile présente verticalement le plan de ses ailes, ce plan est donc perpendiculaire à l'axe optique de l'objectif; il se voit avec toute son étendue, on en peut compter les nervures et l'on remarque la forme arrondie de l'extrémité des ailes.



Fig. 488. — Abeille volant dans la caisse de l'appareil.

La Tipule qui vole agite ses ailes dans un plan horizontal. Or, par l'effet de la résistance de l'air, ces membranes s'in-

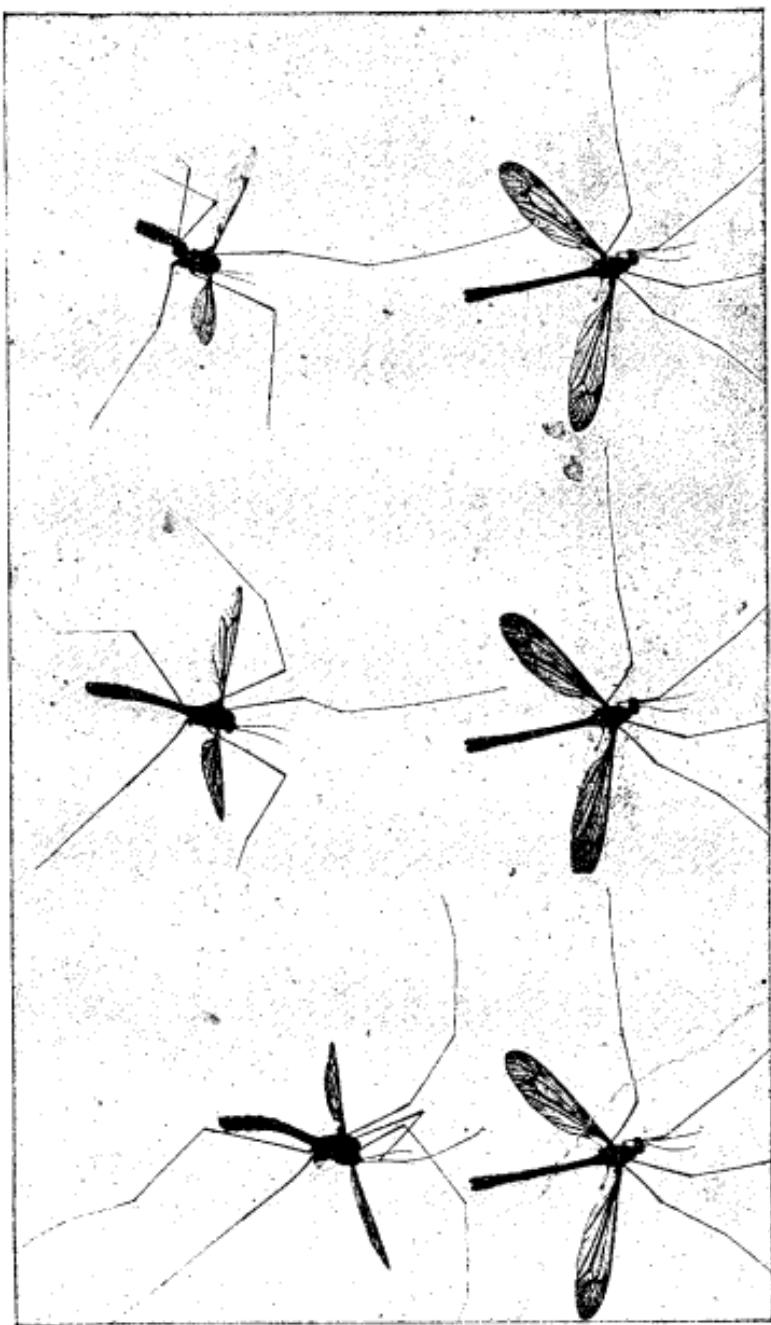


Fig. 189. — Montrant deux *Tipules*, dont l'une est immobile et posée contre une vitre, pendant que l'autre vole au-dessous d'elle, en agitant ses pattes de diverses manières et en donnant à son corps des inclinaisons variées. Cette figure est un fragment d'une longue bande pelliculaire.

clinent et ne montrent sur l'image que la projection de leur surface. Voilà pourquoi l'extrémité de l'aile semble pointue et les autres parties notamment plus étroites. On peut

même, d'après le changement apparent de la largeur de l'aile, en mesurer l'inclinaison, car la projection de ce plan est le sinus de l'angle qu'il fait avec la verticale. Cela permet de conclure que l'aile droite (fig. 489 troisième image), était inclinée d'environ 50 degrés sur la verticale, soit de 40 degrés sur l'horizon.

Du reste cette inclinaison change nécessairement aux différents points de la trajectoire de l'aile et doit augmenter avec la vitesse du mouvement de celle-ci. L'inclinaison étant maxima dans les parties de l'aile qui ont le maximum de vitesse, c'est - à - dire vers l'extrémité, il en résulte une torsion du voile à certains endroits du parcours. Cette torsion, qui s'observait sur les ailes de nos insectes artificiels, se retrouve dans certaines images, ainsi

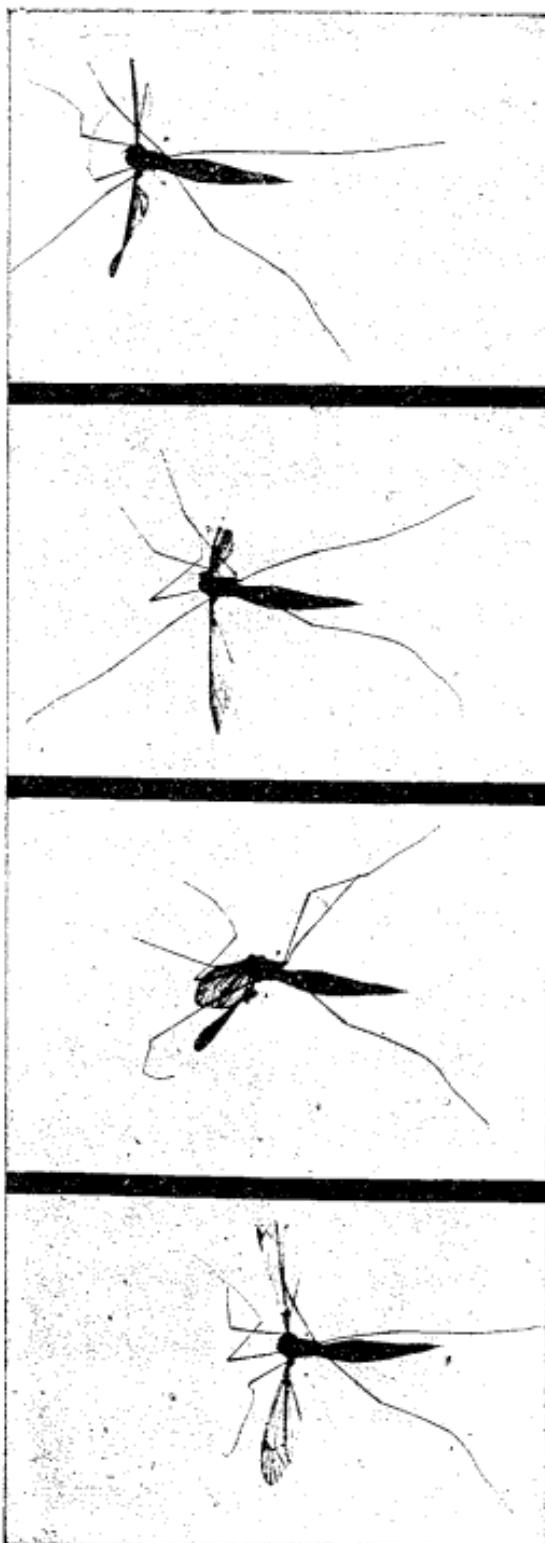


Fig. 490. — *Tipule volant*, montrant diverses attitudes de ses ailes et la position des balanciers.

dans la quatrième de la figure 190. D'autre part, quand le mouvement change de sens, l'inclinaison du plan de l'aile doit elle-même changer de sens; il faut alors que ce plan passe un instant par la verticalité. Cela s'observe sur la première image de la même figure où l'aile, vue normalement, présente la même largeur et le même aspect que sur l'Insecte immobile.

Enfin, on aperçoit très bien les balanciers; la position de ces organes semble varier avec celle des ailes. L'observation attentive d'un grand nombre d'images prises dans des conditions variées fixera sans doute sur la nature des mouvements des balanciers.

Nous ne désespérons pas, du reste, d'appliquer à l'Insecte la Chronophotographie sur plaque fixe, afin d'avoir un assez grand nombre de poses pour décomposer les phases du coup d'aile. Quelques essais nous ont déjà montré qu'avec certain mode d'éclairage, on peut faire que l'Insecte se détache lumineux sur le fond obscur.

CHAPITRE XV

LOCOMOTION COMPARÉE

SOMMAIRE. — Locomotion comparée chez différents Mammifères terrestres : Homme, Cheval, Éléphant. — Locomotion comparée chez les différents Oiseaux. — Classement des différents types de locomotion. — Locomotion comparée des Tortues et des Lézards. — Grenouilles, Crapauds et Têtards. — Serpents, Anguilles et Poissons. — Insectes et Arachnides.

Locomotion comparée. — Le plus grand intérêt de la Zoologie n'est pas de décrire, ni de classer les formes si variées que présente le règne animal, mais de saisir le lien qui existe entre la forme et la fonction. L'union de plus en plus intime de l'Anatomie et de la Physiologie comparées mènera sans doute à la découverte des lois fondamentales de la Morphologie, lois qui permettront, à l'inspection d'un organe, de prévoir les particularités de sa fonction.

On est assurément bien loin de comprendre ces relations pour la plupart des organes ; mais déjà, pour quelques-uns, le mécanisme de leur action est assez bien connu pour que la notion anatomique éclaire la fonction physiologique. La forme du squelette d'un animal vertébré, le volume et la longueur de ses muscles, les dimensions relatives des rayons de ses membres sont en relations nécessaires avec le genre de locomotion qui lui est propre. A ces relations président des lois mécaniques inflexibles dont quelques-unes déjà se dégagent nettement ; on pressent que bientôt elles se formeront d'une façon précise.

Mais, pour déterminer ces lois, il faut que les caractères de

la locomotion d'un animal soient déterminés avec autant de précision que sa conformation anatomique. La Chronophotographie, et surtout les épures qu'elle permet de construire, ne laissent rien à désirer comme expression fidèle d'un type de locomotion. Quelques exemples vont montrer les ressources de cette méthode.

Locomotion comparée chez différents Mammifères terrestres. — Ce qui frappe tout d'abord, c'est la variété de conformation des Mammifères terrestres et la variété non moins grande de leurs modes de locomotion. Mais, derrière cette diversité apparente, les zoologistes ont saisi de profondes analogies. Pour ne citer que les plus visibles, les membres inférieurs de l'Homme correspondent évidemment aux membres postérieurs des quadrupèdes, et dans toute la série des Mammifères on peut reconnaître, dans ces membres, des pièces homologues, osseuses ou musculaires, qui ne diffèrent, d'une espèce à l'autre, que par leurs proportions relatives, leur développement inégal, la fusion de certaines pièces, l'atrophie ou la déformation de certaines autres. Ce qu'il importe d'établir, c'est le lien qui rapproche ces différences anatomiques des différences fonctionnelles correspondantes. Or, la Chronophotographie montre très bien comment se comportent, dans la marche ou la course, les différents segments des membres chez les différentes espèces. Tel animal repose sur le sol par l'extrémité de ses doigts, tel autre par la plante du pied tout entière; celui-ci procède par oscillations alternatives de ses membres, celui-là par un brusque allongement qui produit le saut. Mais l'œil ne peut saisir exactement la part que prennent, dans ces actes divers, chacun des segments osseux; l'épure chronophotographique, au contraire, exprime tous ces détails avec une parfaite précision.

Ainsi les épures 491, 492 et 493 représentent, à peu près à la même échelle, les déplacements des divers segments des membres postérieurs pendant un demi-pas de marche chez l'Homme, le Cheval et l'Eléphant. Elles montrent qu'un même rayon osseux a des mouvements différents, de même qu'il a des

longueurs et des formes différentes, dans les trois types que nous comparons, et que ce segment prend une part inégale aux flexions et extensions alternatives du membre. On conçoit alors pourquoi les muscles chargés de mouvoir ces rayons

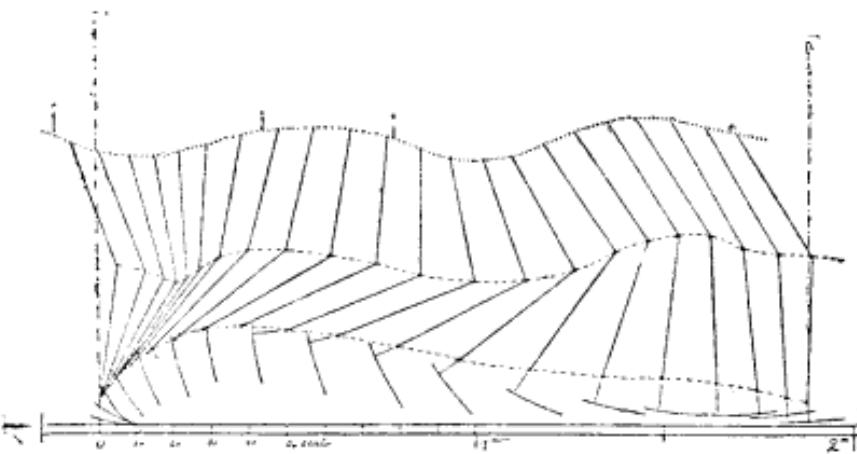


Fig. 191. — Mouvements des divers rayons du membre inférieur de l'Homme dans un demi-pas de marche.

osseux présentent, chez les divers animaux, des différences de longueur et de volume en rapport avec les mouvements qu'ils produisent. C'est en analysant de cette manière les types de

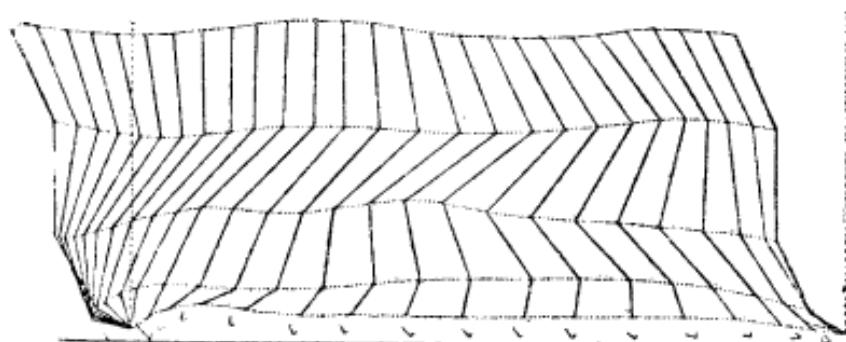


Fig. 192. — Mouvement du membre postérieur du Cheval dans un demi-pas.

locomotion propres à un très grand nombre d'espèces qu'on aura les éléments nécessaires pour saisir les rapports qui existent entre la forme des organes et les caractères de la fonction qu'ils remplissent (1).

Et si l'on revient alors à l'étude de l'Homme, la signification

(1) Voir Marey, *Recherches expérimentales sur la Morphologie des muscles*. C. R. de l'Académie des Sciences, 12 sept. 1887.

des particularités individuelles dans la conformation du corps apparaîtra clairement. Les variétés dans la longueur des rayons osseux des membres, ou dans le développement de certains muscles, qui s'accentuent si fortement quand on compare entre elles différentes races d'Hommes, rapprochent chaque type humain de quelque espèce animale qui présente

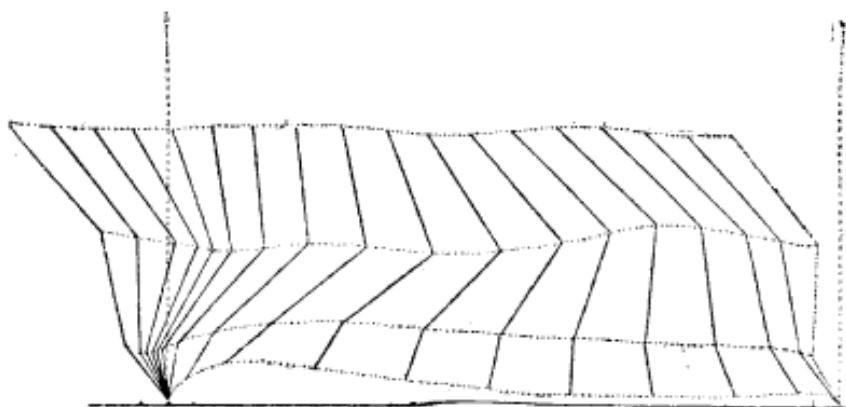


Fig. 193. — Mouvement du membre postérieur de l'Éléphant.

à un haut degré des caractères analogues. Si, par exemple, par le développement des gastrocnémiens ou par celui des muscles extenseurs de la cuisse, un Homme se rapproche des animaux sauteurs, on en pourra conclure, avec quelque vraisemblance, qu'il présente pour le saut des aptitudes spéciales, et ainsi du reste.

Locomotion comparée chez les différents Oiseaux. — On sait que la conformation des ailes des Oiseaux les rend propres à deux types de vol bien distincts, le vol à *voile* et le vol *ramé*. Des ailes longues et étroites appartiennent aux Oiseaux voiliers; des ailes plus courtes et plus larges aux Oiseaux rameurs. Si l'aile est tout à fait réduite dans ses surfaces, l'Oiseau ne peut plus voler dans l'air, mais il vole très bien dans l'eau, comme le Pingouin et le Manchot. Ce vol dans l'eau s'observe également chez certaines Tortues marines dont les membres antérieurs rappellent par leur structure la forme des ailes du Pingouin. Du reste les Tortues et les Oiseaux se rapprochent par un grand nombre de caractères anatomiques.

La relation entre la forme des ailes et les caractères du vol peut se poursuivre dans d'autres détails de la conformation des Oiseaux. Nous avons montré ailleurs que le volume et la forme des muscles diffèrent chez le voilier et chez le rameur : au premier, des muscles courts et épais, au second, des muscles longs et grêles ; et ces différences se retrouvent dans la forme du squelette thoracique dont les pièces sternales traduisent la forme des muscles qui s'y inséraient.

La Chronophotographie a fait ressortir les différences du vol chez les principaux types d'Oiseaux que nous avons pu étudier ; et il est plus que probable qu'en l'appliquant à un grand nombre d'espèces on trouvera, entre les types de vol, des nuances et des transitions pareilles à celles que l'Anatomie comparée permet de reconnaître entre les genres et les espèces ornithologiques.

Classement des différents types de locomotion. — Il n'est pas toujours possible de prendre l'Anatomie comparée pour point de départ d'un classement physiologique. C'est parfois la différence ou l'analogie fonctionnelle qui sera le plus apparente et qui mettra sur la voie de relations zoologiques. C'est pourquoi nous avons tenté de recueillir les images d'un grand nombre d'espèces d'animaux, de manière à rassembler une série de types physiologiques destinés à être groupés et classés entre eux comme les pièces d'un musée d'anatomie comparée, en attendant que de ces rapprochements naîsse quelque lumière.

La principale difficulté de cette entreprise n'est pas de se procurer beaucoup d'espèces différentes, mais de placer chacune d'elles dans les meilleures conditions pour l'étudier. Les animaux domestiques ou les espèces apprivoisées sont d'un maniement assez facile, mais les autres ne prennent leurs allures naturelles que dans des conditions spéciales qu'on n'arrive à réaliser qu'après de longs tâtonnements.

(1) *Le Vol des Oiseaux*, p. 39. Paris, G. Masson, 1890.

Un animal effrayé n'a pas son allure normale, et si on le force à passer par un chemin que l'on croit avoir bien préparé, il s'obstine à prendre une direction contraire. C'est parfois la vive lumière avec laquelle il faut éclairer l'animal qu'il effraie et le fait enfuir. D'autres fois il ne trouve pas sous ses pieds le point d'appui nécessaire. Il faut, dans certains cas, éclairer l'animal au-devant d'un champ obscur, d'autres fois le faire se détacher en silhouette sur un fond clair. Dans tous les cas, on doit lui préparer un chemin rectiligne dont il ne puisse s'écartez. Forcé de limiter l'exposé de ces études, nous ne donnerons que de rares exemples de locomotion comparée, avec les dispositions employées pour recueillir les images.

Locomotion comparée de la Tortue et du Lézard. — Une *Tortue* aquatique placée dans un aquarium de verre était éclairée par transparence comme dans la disposition représentée figure 156. L'animal plongeait, marchait au fond de l'aquarium, mais à un moment donné était forcé de remonter



Fig. 194. — Allure quadrupède d'une Tortue d'eau qui nage en montant.

à la surface pour respirer ; c'est de cet instant qu'on profitait. La figure 194 montre l'animal exécutant dans l'eau une marche quadrupède avec la succession des mouvements des quatre membres qui caractérise l'allure du pas (1). C'est par un mode de progression semblable que la Tortue, après avoir respiré, redescendait au fond de l'aquarium.

D'autres espèces, la Tortue marine par exemple, ont deux genres de locomotion bien distincts, l'allure du pas qui vient d'être décrite, et celle que nous avons comparée au vol. Dans

(1) Voir la succession de ces mouvements au chapitre xi : Notation synoptique des allures du Cheval.

cette dernière allure, les pattes postérieures sont étendues, immobiles et accolées l'une à l'autre, tandis que les pattes antérieures s'abaissent et s'élèvent symétriquement en exécutant les mouvements de l'aile d'un Oiseau rameur.

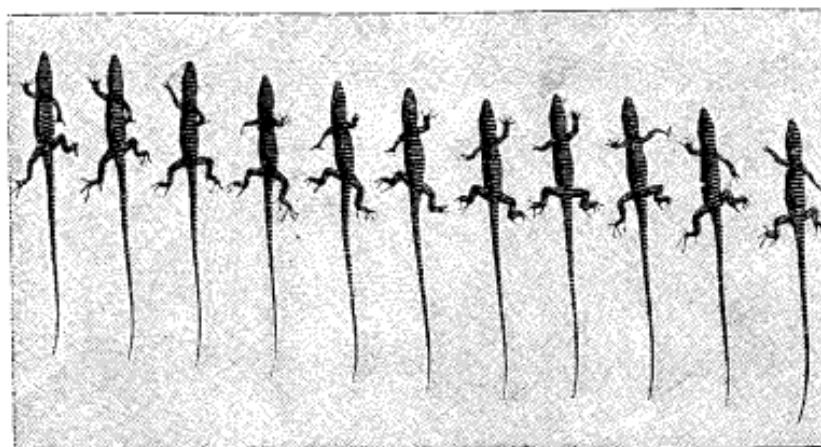


Fig. 193. — Lézard gris (la succession des images se lit de droite à gauche).

Enfin les Tortues de terre nous ont paru marcher à l'allure du pas; mais n'ayant pas eu le temps d'appriover ces animaux, nous n'avons pas réussi à les faire marcher au-devant de

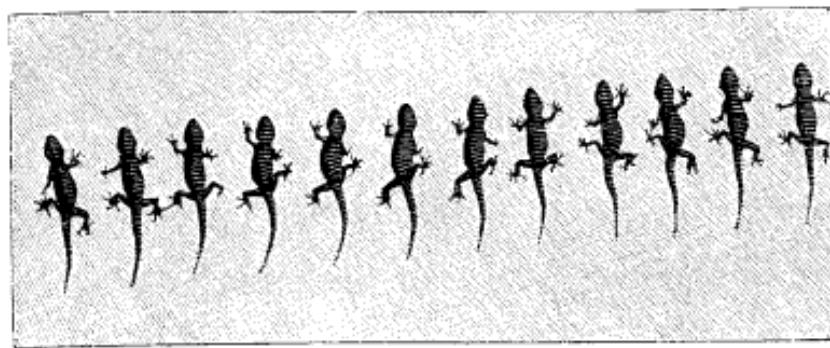


Fig. 196. — Gecko (la succession des images se lit de gauche à droite).

l'objectif photographique. L'animal, terrifié sans doute par le bruit de l'appareil, gardait obstinément la tête et les pattes rentrées sous sa carapace.

Le *Lézard* est extrêmement difficile à manier. Pour le placer dans des conditions favorables à l'observation, nous

nous sommes servi de la gouttière annulaire décrite figure 452 et destinée à l'étude des mouvements de l'eau. La partie transparente de cette gouttière était éclairée par dessous ; l'appareil, placé à un niveau supérieur, recevait les images réfléchies par un miroir incliné à 45°. Ainsi, un Lézard placé sur la glace qui formait le fond de la gouttière donnait sa silhouette sur la plaque sensible.

Mais, sur cette surface de verre trop glissante, le Lézard gris et le Lézard vert étaient incapables de courir ; le Gecko, au contraire, avec ses doigts spatulés, courait parfaitement. Pour placer tous ces animaux dans des conditions comparables, il fallut coller sur la glace du fond une mousseline bien transparente, qui présentait cependant les aspérités nécessaires pour la locomotion.

Les figures 495 et 496 montrent la marche du Lézard gris et

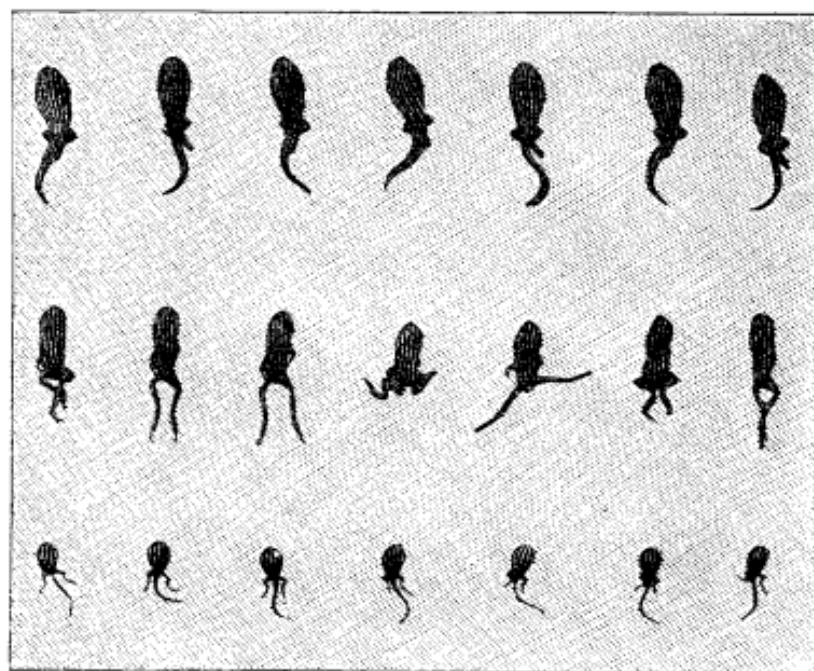


Fig. 497. — Locomotion des Batraciens aux différentes phases de leur développement.

celle du Gecko. L'allure est la même de part et d'autre, c'est celle du trot légèrement désuni (1). Mais chez le Gecko, dont

(1) Voir chap. xi, tableau synoptique, les caractères du trot du Cheval.

le corps est plus court, les empreintes d'arrière vont se faire très près de celles des membres antérieurs, et les mouvements sont très étendus, ce qui produit une torsion serpentine du corps tout entier. Comme ces mouvements sont extrêmement rapides, il faut, pour en discerner la succession, prendre un très grand nombre d'images, soixante environ par seconde.

Grenouilles, Crapauds et Têtards.—Suivant la phase de leur développement, les Batraciens ont des types de locomotion différents : tant que le Têtard n'a pas encore ses membres suffisam-

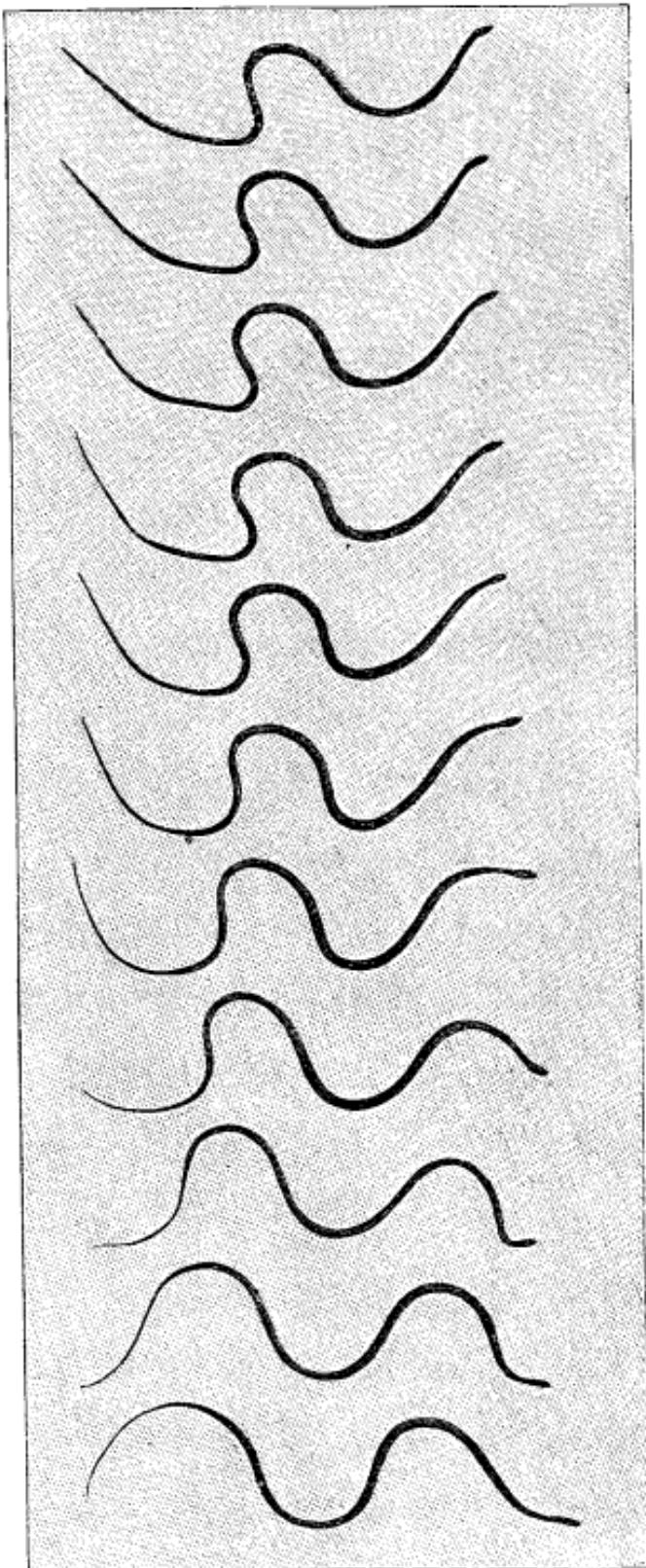


Fig. 498. — Coulonvre terrestre rampant (la succession des images se lit de gauche à droite).

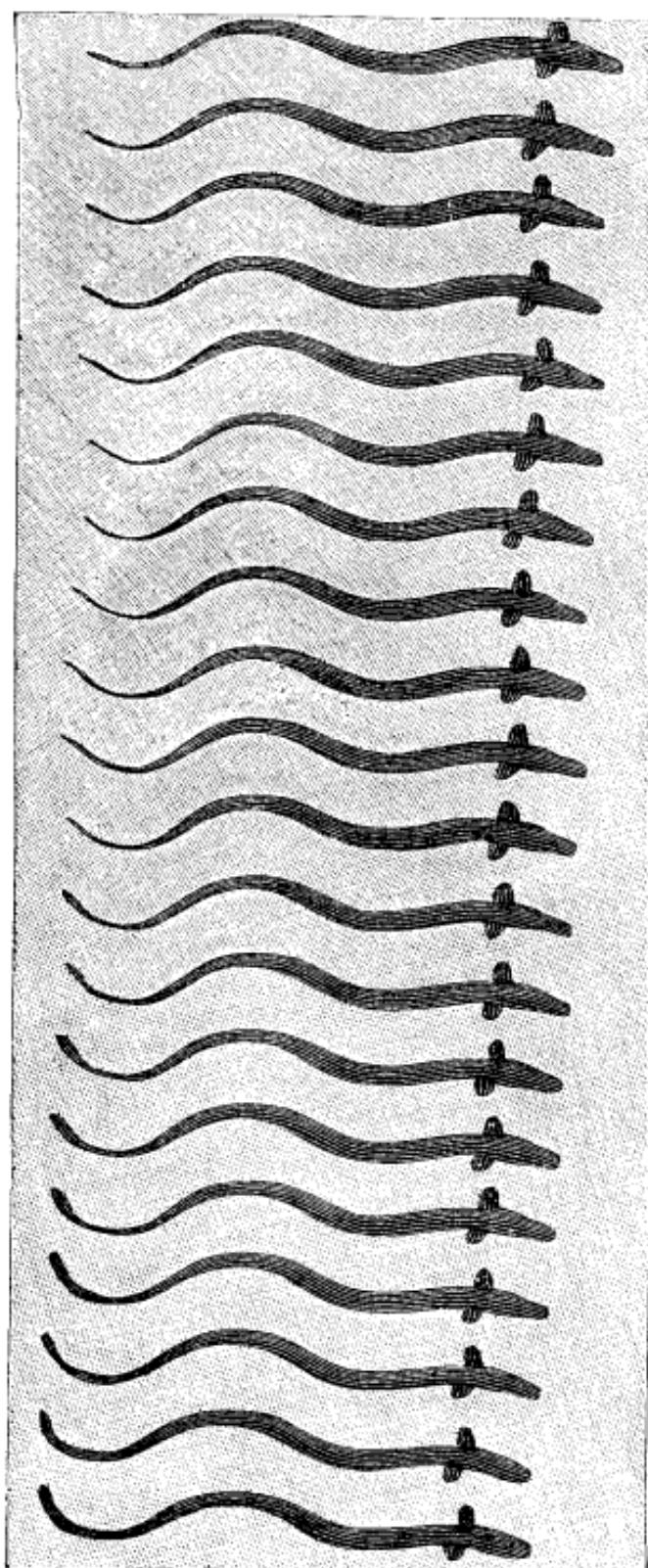


Fig. 199. — Anguille nageant (la succession des images se lit de droite à gauche).

ment développés il nage avec sa queue à la manière d'un Poisson (fig. 197 ligne 1).

Quand la queue a disparu et que les quatre membres sont formés, la natation du Batracien ressemble à celle de l'Homme (fig. 197 ligne 2). Les jambes, très écartées d'abord, se rapprochent brusquement l'une de l'autre, puis se fléchissent en se rapprochant du corps, enfin s'écartent de nouveau pour donner une impulsion nouvelle par leur brusque rapprochement. Pendant ce temps, les membres antérieurs, serrés contre le thorax, semblent complètement inactifs (1).

(1) Par une erreur du graveur, la suc-

Enfin, dans la phase intermédiaire où, les membres étant formés, la queue n'a pas encore disparu, le Batracien a un mode de progression mixte : entre les jambes qui font les mouvements de la nage (197 ligne 3), la queue frétille continuellement.

Serpents, Anguilles, Poissons. — Suivant qu'ils se meuvent sur terre ou dans l'eau, les Serpents ont des modes de locomotion légèrement différents : une Couleuvre terrestre, placée à sec dans le canal qui a été décrit plus haut, y exécute des ondulations très larges (fig. 198). En même temps que l'animal progresse, l'ondulation se propage dans son corps, de l'avant à l'arrière, comme cela se passe pour une Anguille

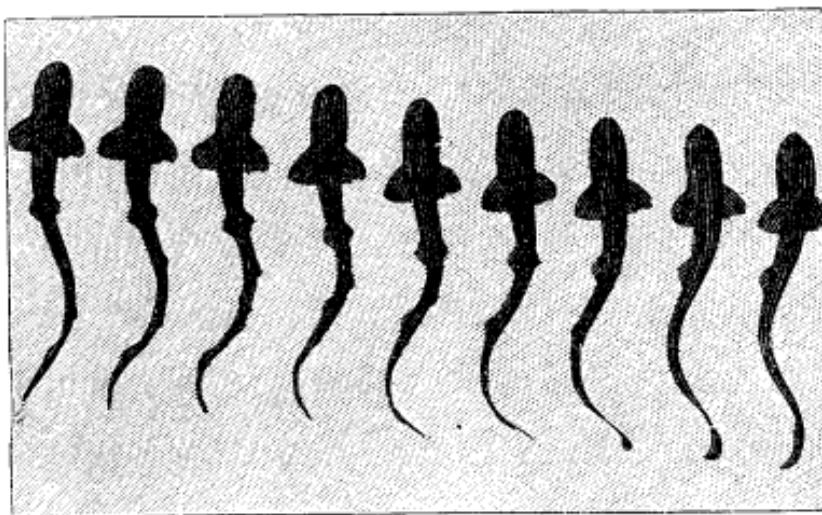


Fig. 200. — Chien de mer nageant.

qui nage. La Couleuvre aquatique, mise à sec dans le canal, progresse de même, et l'Anguille aussi.

Mais ces animaux, placés dans l'eau, y nagent par un mouvement onduleux de moindre amplitude et beaucoup plus régulier. La figure 199 est la natation de l'Anguille ; le mode de progression est identique à celui de la Couleuvre, sauf une action plus marquée de la queue. Cette queue, dans l'Anguille, étant transversalement aplatie, donne une action propulsive cession des images est intervertisse en plusieurs endroits de la figure 197 ligne 2.

Fig. 202. — Orthoptère marchant (succession des images de droite à gauche).

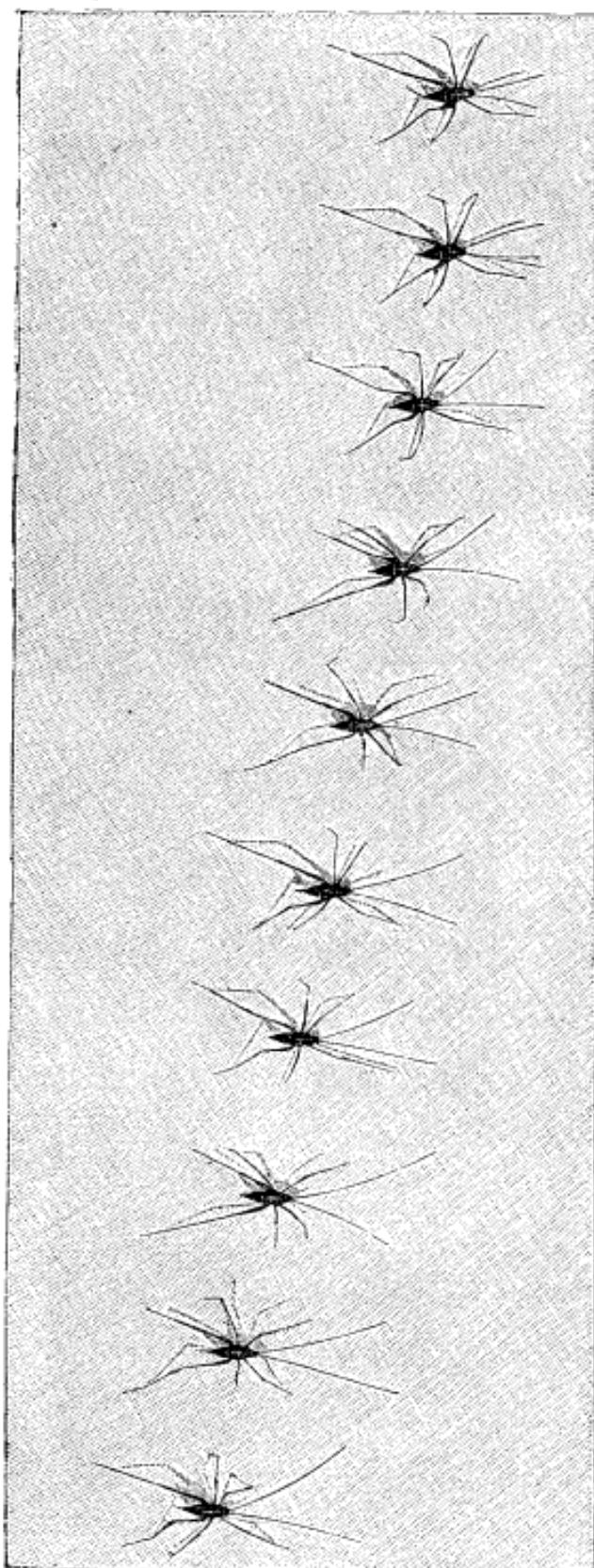
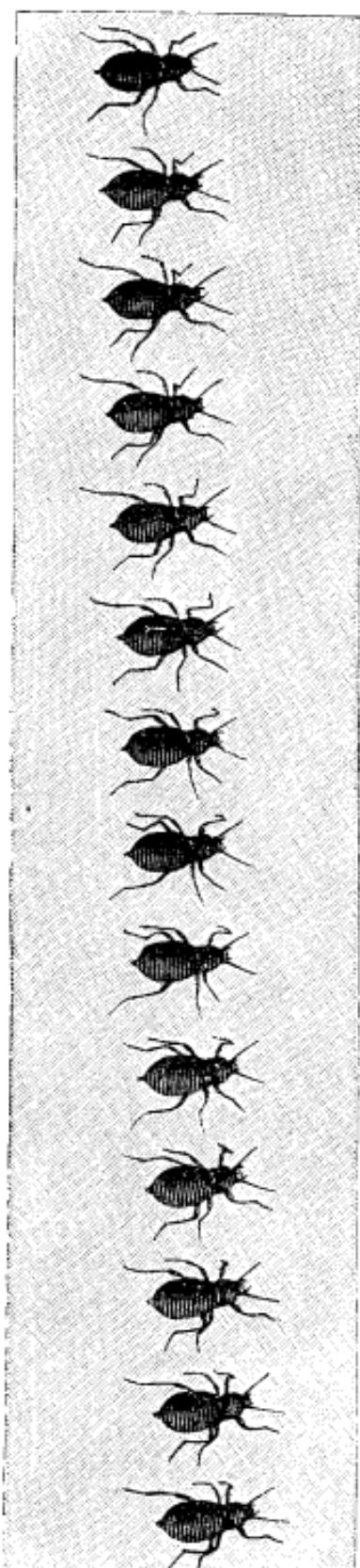


Fig. 204. — Coléoptère marchant (succession des images de gauche à droite).



analogue à celle des autres Poissons, et exécute des ondulations plus marquées que le reste du corps.

Chez les autres Poissons le mouvement ondulatoire du corps est moins accentué. Très apparent encore sur le Chien de mer dont les formes sont allongées (fig. 200), il n'existe plus, chez certaines espèces, que dans la queue, le corps ne se courbant que d'une façon très faible, chez les Cyprins par exemple.

Insectes et arachnides.

— Chez les Insectes qui ont six pattes et chez les Araignides qui en ont huit, le mode de progression présente des différences qui tiennent exclusivement au nombre des pattes. Dans ces espèces, les mouvements des membres d'une même paire alternent entre eux, et les mouvements d'une patte alternent avec ceux de la patte suivante. Il s'ensuit, comme l'ont très bien observé Carlet et M. de Moor (1), que chez un Coléoptère

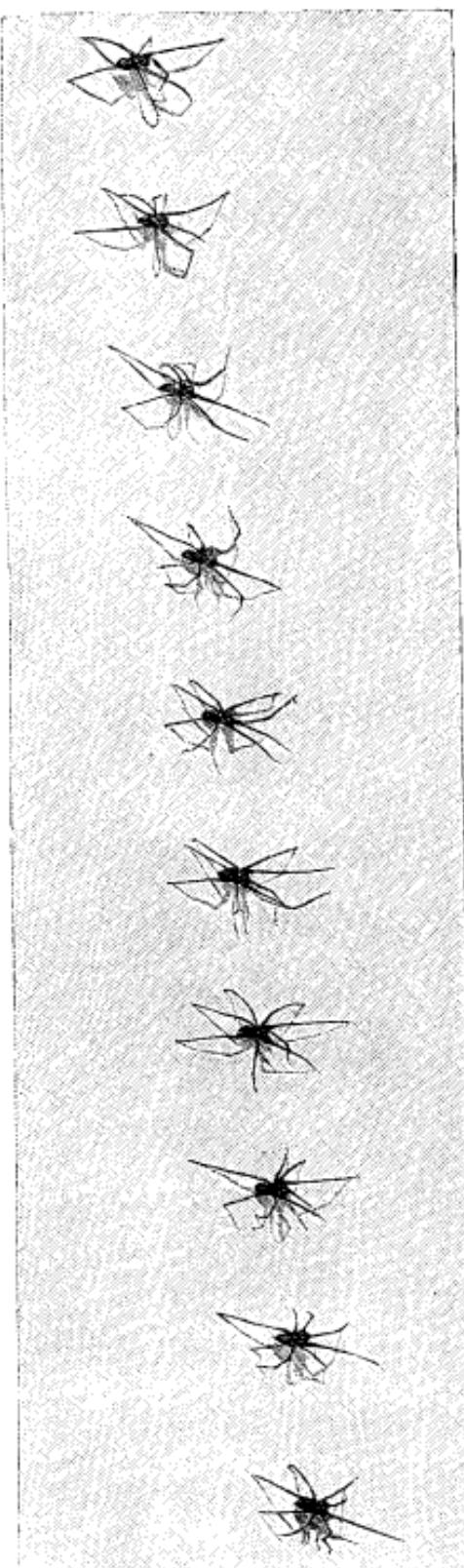


Fig. 203. — Marche d'une Araignée (la succession se lit de gauche à droite).

(1) De Moor (*Archives de biologie*, Liège, 1890). L'auteur donne un historique fort complet des

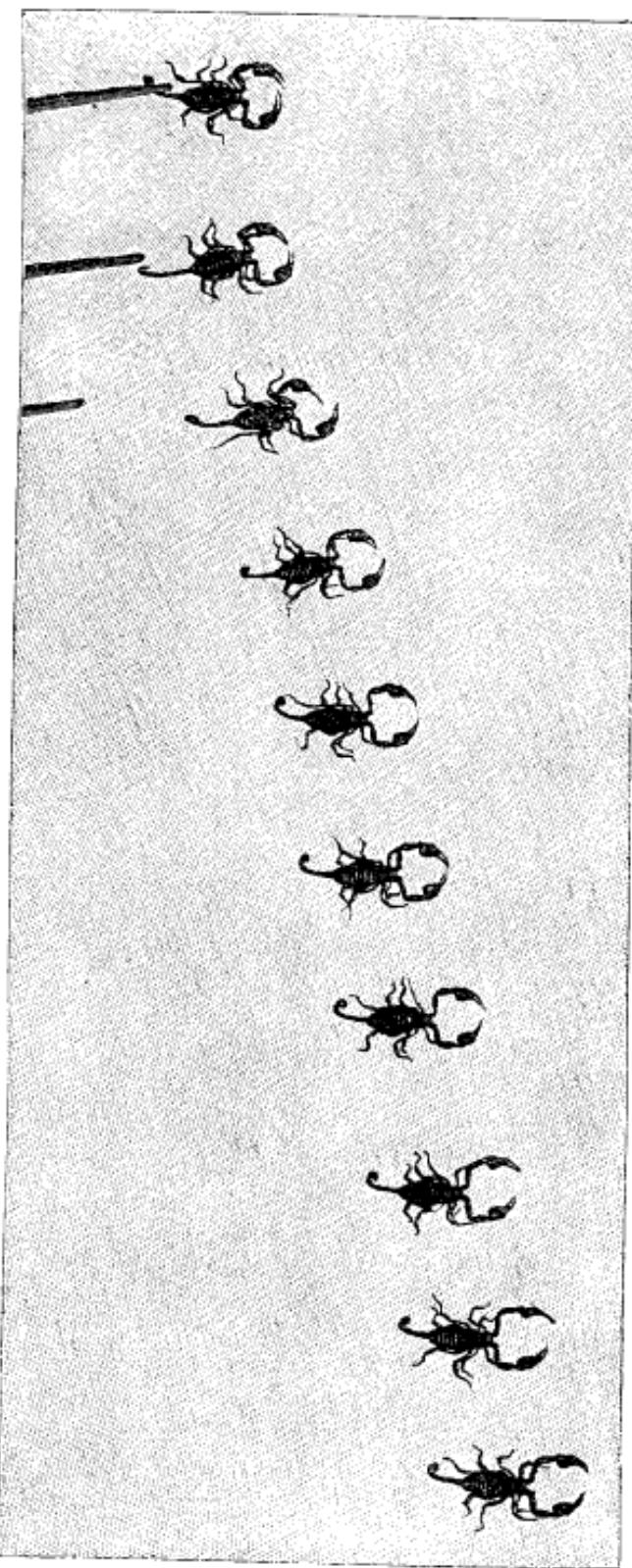


Fig. 204. — Marche d'un Scorpion (la succession se lit de gauche à droite).

par exemple (fig. 201), les deux pattes extrêmes d'un côté seront à l'appui, et la patte moyenne sera au levé, tandis que, de l'autre côté, la patte moyenne sera à l'appui et les deux extrêmes au levé. Quand un Insecte tourne sur lui-même, les mouvements sont plus faibles et parfois nuls du côté qui regarde le centre de courbure.

Chez les Insectes qui pratiquent

études faites sur la locomotion des Insectes : il décrit la manière dont il a obtenu des pistes colorées où chaque patte de l'Insecte, enduite d'une couleur particulière, laisse la trace de ses appuis sur une feuille de papier ; il expose également les artifices d'éclairage qui lui ont permis de mieux observer la succession des mouvements.

également la marche et le saut, nous n'avons pas encore pu saisir la brusque détente des membres postérieurs, mais la marche se fait dans les mêmes conditions que chez les Coléoptères, par exemple, ainsi qu'on le voit figure 202 sur un Insecte orthoptère.

Chez les Arachnides les quatre pattes de chaque côté procèdent par alternance, de sorte qu'il y en a toujours deux au levé et deux à l'appui. Cela peut se constater sur l'Araignée (fig. 203). Pour distinguer plus facilement les pattes qui sont à l'appui de celles qui sont au levé, nous avons éclairé l'animal par en haut, de telle sorte que l'ombre de ses membres se projetait sur la surface blanche sur laquelle il marchait. Dans ces conditions, pour chaque membre à l'appui, l'ombre vient à son extrémité rejoindre la patte elle-même ; pendant le levé, au contraire, il y a discontinuité entre l'extrémité de la patte et celle de l'ombre qu'elle projette.

La marche du Scorpion est extrêmement rapide : l'animal procède par brusques élans qu'il faut provoquer en l'excitant. La succession des mouvements des membres est si rapide, qu'il ne nous a pas été possible de la déterminer sur les images (fig. 204).

Tous ces Insectes marchaient sur une glace couverte de papier ou de mousseline éclairée, par transparence ou par réflexion, et étaient dirigés dans leur marche par deux lames de verre, verticales et parallèles, qui les empêchaient de s'écartez de la direction voulue.

Ces quelques exemples suffisent à montrer comment on peut recueillir et comparer, sur différentes espèces animales, les images chronophotographiques qui traduisent leur genre de locomotion. En recueillant un très grand nombre de ces images on aura les éléments nécessaires pour les études de Physiologie comparée que nous nous proposons de faire.

CHAPITRE XVI

APPLICATIONS DE LA CHRONOPHOTOGRAPHIE

à la Physiologie expérimentale

SOMMAIRE. — Multiplicité des applications de la Chronophotographie ; elle complète les renseignements donnés par la Méthode graphique. — Étude des mouvements du cœur par la Méthode graphique. — Photographie des phases successives de l'action d'un cœur de Tortue soumis à la circulation artificielle. — Changements de forme et de capacité des oreillettes et des ventricules pendant une révolution du cœur. — Mécanisme de la pulsation du cœur étudié par la Chronophotographie. — Valeurs comparées de l'inscription mécanique et de la Chronophotographie. — Déterminations de centres de mouvements articulaires.

Des mouvements accompagnent presque toutes les fonctions de la vie ; mais si l'on cherche à les saisir on éprouve en général de grandes difficultés, car ils sont la plupart du temps fort complexes, souvent très rapides, parfois au contraire fort lents et obscurs. Les méthodes que les physiologistes emploient ont presque toujours pour but de rendre saisissable ce que l'œil ne saurait voir.

On peut donc pressentir que la Chronophotographie trouvera dans ce domaine de nombreuses applications : elle nous montrera, par exemple, quelle part prennent à chaque instant les différentes parties du thorax dans les mouvements respiratoires ; elle fera suivre dans leurs phases les contractions péristaltiques et antipéristaltiques de l'intestin, avec les conditions qui modifient les caractères de ces mouvements. En somme, elle aura son application à tous les cas où ni

L'observation ni l'emploi de la Méthode graphique ne nous renseignent complètement.

Le règne végétal offre aussi beaucoup de mouvements curieux à étudier par la Chronophotographie : ce sera tantôt la brusque rétraction des feuilles et des pétioles de la Sensitive qu'on irrite, puis le retour graduel de ces organes à leur position première ; tantôt les progrès de l'accroissement des plantes, du déplissement des feuilles, de l'épanouissement des fleurs. Des images successives, prises à plus ou moins longs intervalles de temps, traduiront les phases de ces phénomènes.

Enfin, dans les deux règnes, le Microscope révèle dans la profondeur des tissus vivants, des mouvements d'un haut intérêt, car ils se rattachent aux actes les plus intimes de la vie organique. Ainsi la circulation des globules du sang dans les vaisseaux capillaires les plus fins, les mouvements des Zoospores dans les cellules des Algues, les lents changements de forme des Amibes, la migration des globules blancs du sang, les phénomènes de la phagocytose, etc. Il sera d'un grand intérêt de fixer par la Photographie les caractères de ces mouvements.

Pour montrer par un exemple particulier les avantages de la Chronophotographie appliquée à un problème de Physiologie expérimentale, nous choisirons comme exemple les mouvements de cœur. Sur ce sujet qui a déjà donné lieu à tant de travaux faits au moyen de la Méthode graphique, la Chronophotographie donnera des renseignements nouveaux, d'un ordre tout différent. Nous rappellerons d'abord sommairement l'état actuel de la question.

Analyse des mouvements du cœur par la Méthode graphique. — Il y a plus de trente ans qu'avec notre confrère et ami, Chauveau, nous présentions à l'Académie des Sciences et à l'Académie de Médecine une théorie des mouvements du cœur basée sur l'emploi de la Méthode graphique. Cette théorie, devenue classique aujourd'hui, a mis fin aux divergences d'opinions qui partageaient les physiologistes

et les médecins; elle n'a pas été étrangère aux progrès réalisés à notre époque dans le diagnostic des maladies du cœur et des vaisseaux.

Ce qui nous avait décidés à entreprendre ces expériences, c'est l'insuffisance évidente de l'examen direct pour discerner la nature et la succession des actes, fort complexes, que le cœur exécute à chacune de ses révolutions.

La méthode que nous avons employée était *indirecte*: elle consistait à inscrire les courbes des changements de pression qui se produisent à l'intérieur des cavités du cœur et même en dehors de ces cavités. Nos courbes n'exprimaient donc pas les mouvements du cœur à proprement parler; mais elles permettaient cependant de déduire, des changements de pression qu'elles traduisaient, l'ordre de succession et les phases de l'action des oreillettes et des ventricules. Cette interprétation était souvent assez délicate; elle a exigé un nombre considérable d'expériences pour en vérifier les différents points.

En effet, s'il était à peu près évident que les maxima de la pression, dans chacune des cavités du cœur, correspondent aux moments où ces cavités se resserrent pour expulser le sang qu'elles contiennent, il n'était plus aussi facile d'interpréter chacune des petites ondulations des courbes cardiométriques.

Rappelons (fig. 205) le triple tracé qui exprime les changements de la pression du sang dans une oreillette, dans un ventricule, et les phases de la pulsation du cœur.

Si l'on mettait cette figure sous les yeux d'un physicien, que nous supposons ignorer la Physiologie du cœur, il en tirerait une connaissance exacte des changements de pression que le sang éprouve dans les cavités cardiaques et de la force incessamment variable avec laquelle le ventricule comprime l'appareil explorateur appliqué contre sa surface; il apprécierait exactement l'ordre dans lequel ces changements se succèdent, mais il ne pourrait, d'après ces courbes toutes seules, se faire la moindre idée de l'organe qui les a pro-

duites. Il concevrait, à sa volonté, tel système de pistons, de pompes et de soupapes capables de donner des effets semblables, mais n'arriverait pas à prévoir la forme réelle du cœur, ni les changements d'aspect et de volume que présentent à chaque instant les différentes cavités de cet organe. Bien plus, comme aucun phénomène analogue ne se produit en dehors des êtres vivants, notre physicien

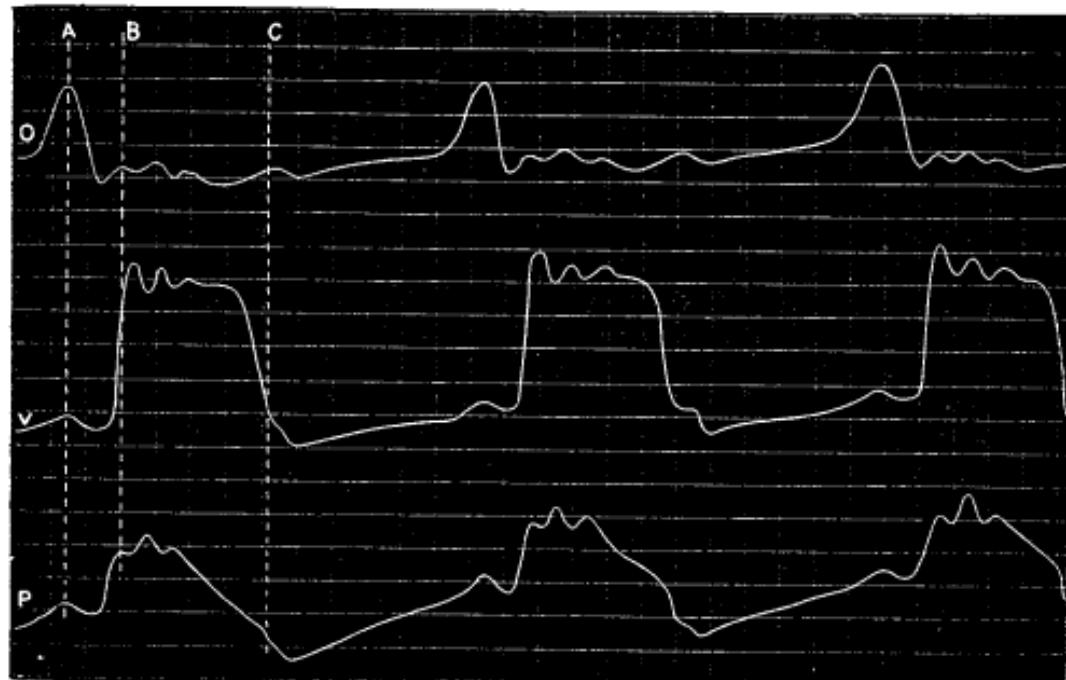


Fig. 205. — Les tracés O. V. P. traduisent respectivement les phases de la pression du sang dans l'oreillette droite, dans le ventricule droit, et au point où le ventricule touche intérieurement la paroi de la poitrine. — Les lignes ponctuées A. B. C. signalent, dans les trois tracés, la systole de l'oreillette, celle du ventricule et la clôture des valvules sigmoïdes.

aurait sans doute beaucoup de peine à comprendre le mécanisme de la pulsation des ventricules, c'est-à-dire de l'impulsion centrifuge que donne cet organe à un moment où il diminue de volume.

Le physiologiste lui-même, pour donner aux cardiomagrammes leur signification véritable, doit avoir acquis, par les vivisections, certaines notions complémentaires relativement à la forme du cœur et aux mouvements qu'il exécute pendant sa fonction.

Mais notre œil est bien peu capable de suivre les changements d'aspect rapides et complexes que présente le cœur en mouvement; la forme que prennent ses diverses cavités, suivant qu'elles s'emplissent ou se vident; leurs changements de volume et de position; les instants où se dessinent à la surface du cœur le relief des vaisseaux distendus, ou des fibres musculaires en action, etc.

Aussi, une fois en possession de la Chronophotographie qui traduit avec tant de fidélité les changements de forme et de position des corps en mouvement, avons-nous cherché dans cette méthode un complément indispensable des notions fournies par la Méthode graphique. Les expériences qu'on va lire sont nos premiers essais dans cette voie.

Photographie des phases successives de l'action d'un cœur de Tortue soumis à la circulation artificielle. — Comme nous ne disposons pas, en ce moment, de grands animaux, sur lesquels les mouvements du cœur s'accompagnent de changements d'aspects si curieux, nous nous sommes borné à analyser par la Chronophotographie les mouvements du cœur de la Tortue terrestre.

Pour que le cœur soit visible dans sa totalité, nous l'avons détaché de l'animal et placé dans les conditions de la circulation artificielle (1). Enfin, pour faire tenir dans un petit espace tous les détails de cette circulation, le dispositif a été réduit aux pièces représentées figure 206.

Un entonnoir de verre est introduit par son bec dans une veine cave, très près de l'oreille gauche, et on l'y fixe par une solide ligature; d'autre part, une canule de verre introduite dans l'aorte se continue, par un tube *ta* qui représente une artère, jusqu'à un petit ajutage *e* recourbé qui s'ouvre au-dessus de l'entonnoir. Le tout est établi sur un support solide *S*, et se détache en silhouette sur un fond clair.

Du sang de Bœuf défibriné est versé dans l'entonnoir qu'il

(1) Pour la description de la méthode, voir Marey, *La Circulation du sang à l'état physiologique et dans les maladies*, p. 70, fig. 28. Paris, G. Masson, 1881.

remplit aux trois quarts; au bout de quelques instants, on voit ce sang passer dans l'oreillette qu'il gonfle et celle-ci, presque aussitôt, l'envoie dans le ventricule; le ventricule à son tour se resserre et chasse son contenu dans le tube dont l'ajutage le déverse dans l'entonnoir.

Au lieu des mouvements faibles et rares que présentait le cœur quand il était vide de sang, il s'établit une circulation énergique dont la durée varie de six à dix heures, et même davantage, suivant la saison. Sous l'influence du travail du cœur, le sang prend rapidement le caractère veineux; aussi est-il bon, pour maintenir l'énergie des mouvements de la circulation artificielle, de renouveler de temps en temps le sang dans l'entonnoir.

Les images qu'on obtient ainsi (fig. 207), ne peuvent être que des silhouettes, car la couleur rouge vif du cœur de la Tortue n'étant point photogénique, ne peut donner une image par réflexion avec le modelé indispensable pour faire comprendre les changements de forme que présentent à chaque instant les oreillettes et les ventricules. Ces silhouettes permettent cependant de suivre les phases de la circulation du sang dans le cœur et dans les tubes qui communiquent avec les cavités de cet organe.

La figure 207 devant contenir un grand nombre d'images, on a condensé les pièces qui forment l'appareil à circulation artificielle. Ainsi, le large entonnoir de la figure 206 est remplacé par un gros tube de verre effilé en pointe pour

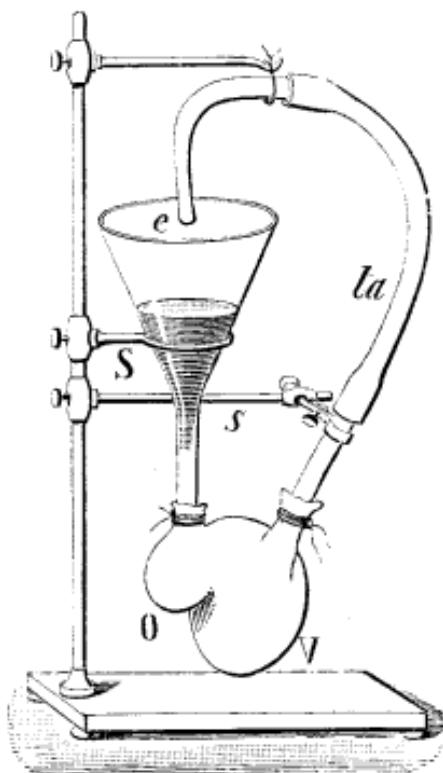


Fig. 206. — Cœur de Tortue soumis à la circulation artificielle. O, oreillette; V, ventricule; ta, tube artériel; e, son orifice d'écoulement. S, support de l'entonnoir qui représente le système veineux et se déverse dans l'oreillette.

s'engager, par une veine, dans l'intérieur de l'oreillette : c'est le *réservoir veineux*. Un autre tube, plus mince, représentant l'artère, s'adapte à l'origine de l'aorte et se recourbe pour se verser dans le réservoir veineux.

En suivant de gauche à droite la série des images chronophotographiques correspondant aux phases successives d'une révolution du cœur, on voit d'abord que, sur la première

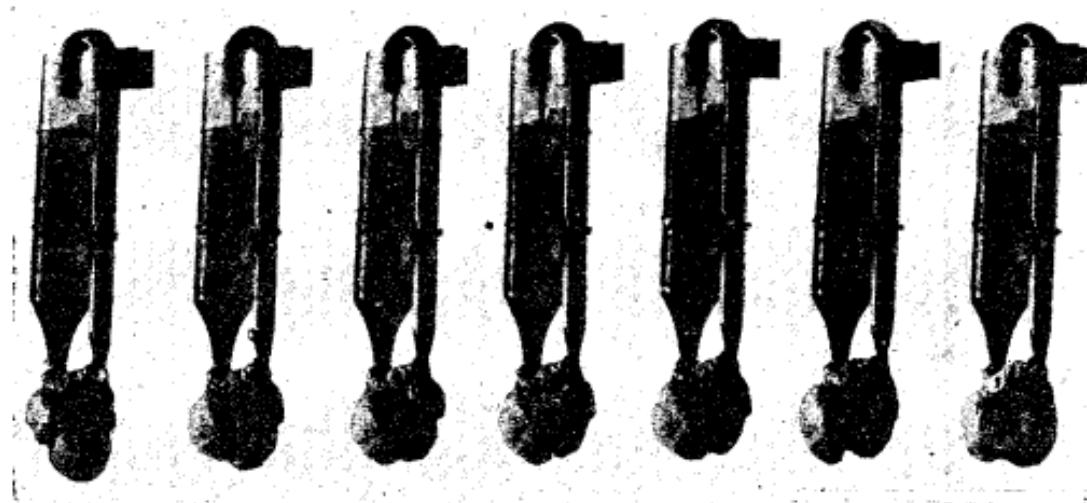


Fig. 207. — Huit images successives d'un cœur de Tortue avec circulation artificielle. La succession des images se lit de gauche à droite ; leur fréquence est de 10 par seconde. Dans toutes ces images l'oreillette est à gauche et le ventricule à droite. De la deuxième à la cinquième image, la systole ventriculaire se reconnaît au jet de sang qui coule dans le réservoir veineux.

image, il ne coule pas de sang par le tube artériel dans le réservoir veineux ; le ventricule est donc en relâchement (diastole). Les images 2, 3, 4 et 5 montrent qu'un jet de sang coule dans le réservoir ; le ventricule est donc en resserrement (systole). Enfin les images 6 et 7, où le jet de sang ne se voit plus, expriment une nouvelle diastole. Les mêmes phénomènes recommenceraient indéfiniment, en suivant les phases que nous avons énumérées. La série des images pourrait donc être refermée sur elle-même, le n° 1 suivant immédiatement le n° 7.

Quant au cœur, on n'en voit guère que les contours ; ceux-ci accusent toutefois les alternances de gonflement et de resserrement de l'oreillette et du ventricule.

L'oreillette, qui commence à se remplir à la deuxième image, se resserre pendant les phases 6, 7 et 1. Or, pendant que l'oreillette se resserre, on voit le ventricule se remplir graduellement, de sorte que dans l'image 1, quand l'oreillette est à son resserrement extrême, le ventricule est à son maximum de réplétion. L'alternance est donc parfaite entre les systoles et les diastoles des deux cavités du cœur.

Quant à la durée de ces phases, elle se déduit assez exactement du nombre des images occupées par chacune d'elles : l'appareil donnait 10 images par seconde, et puisque 7 images suffisent à représenter la révolution entière du cœur, celle-ci ne durait donc que $7/10$ de seconde. De même on attribuera à la systole des ventricules une durée de $4/10$ de seconde, à la diastole $3/10$ (1).

Ces premières notions sur les changements de forme des cavités du cœur vont être complétées par l'expérience suivante.

Des changements de forme et de capacité des oreillettes et des ventricules pendant une révolution du cœur. — Un artifice très simple permet de rendre photogénique la surface du cœur : il suffit de la peindre avec une couche de gouache un peu épaisse. Le cœur devient alors parfaitement blanc ; les jeux de lumière et d'ombre permettent de saisir les changements de forme et de capacité de ses différentes cavités. La figure 208 est ainsi obtenue (2).

(1) Ces mesures ne sauraient prétendre à l'exactitude de celles que donne la Méthode graphique et qui est presque illimitée. En effet, quand on mesure le début et la fin d'un phénomène d'après des images discontinues, il peut y avoir une erreur sur le début et sur la fin de ce phénomène. Ce début et cette fin ont lieu entre deux éclairements de la plaque photographique, mais peuvent tomber plus ou moins près de l'un ou de l'autre.

(2) Chaque image du cliché original représentait, en même temps, le cœur et le petit appareil circulatoire. Mais pour montrer, dans la justification d'une page, les aspects successifs du cœur sous les dimensions les moins réduites possibles, on a dû éliminer de la figure tout ce qui n'était pas le cœur lui-même. Toutefois les images complètes ont servi à l'interprétation qui va être donnée de chaque aspect du cœur.

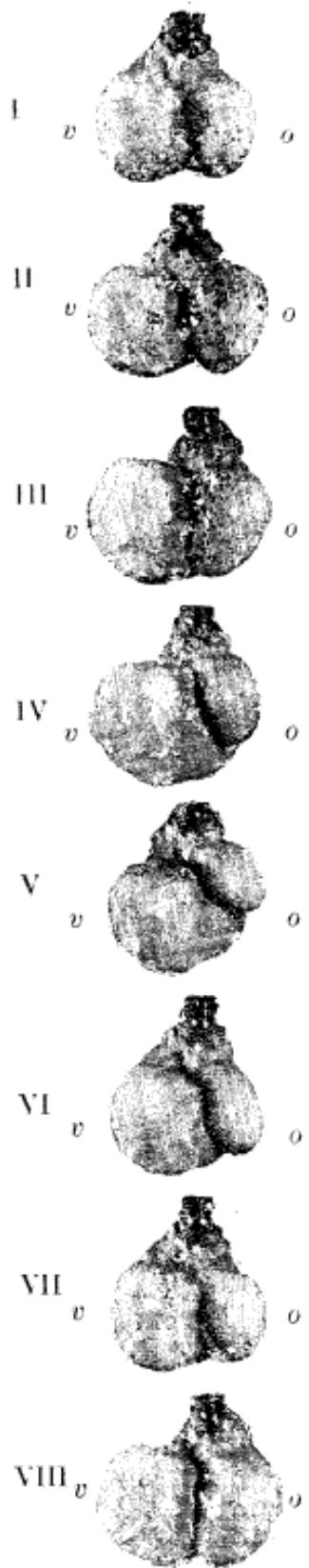


Fig. 208.

En suivant, de haut en bas, la série des images, on assiste aux phénomènes suivants :

I. Le ventricule *v* a fini sa systole et est à son minimum de volume; l'oreillette *o* est remplie, arrondie et luisante.

II. L'oreillette commence à se vider et change de forme; elle est aplatie à sa surface extérieure et présente deux bords mousses et une pointe arrondie, ce qui lui donne à peu près la forme d'une langue. Le ventricule commence à augmenter de volume.

III. L'oreillette a diminué de volume et sa pointe se rapproche du ventricule qui grossit encore.

IV. L'oreillette continue à se resserrer et le ventricule arrive à son maximum de réplétion.

V. L'oreillette achève de se vider et le ventricule diminue de volume; sa systole commence (à cet instant le sang jâtissait dans le réservoir).

VI. La systole du ventricule continue et l'oreillette relâchée commence à se remplir.

VII. La systole du ventricule finit, l'oreillette est distendue et luisante; nous sommes revenus à la phase représentée par l'image I.

Dans cette expérience, comme dans la précédente, la fréquence des battements du cœur était extrême, 42 par seconde, ce qui est exceptionnel pour la Tortue. Cette accélération était due à la température extérieure élevée, 32° centigrades.

Pour mieux suivre les phases des mouvements du cœur, il faudrait opérer à une température plus basse, et augmenter le nombre des images; cela permettrait d'avoir de 40 à 60 aspects différents de l'organe pendant un de ses battements.

Tels qu'ils sont, toutefois, ces chronophotogrammes font voir des phénomènes que l'on n'a pas le temps d'observer: ils montrent que les cavités du cœur ont chacune sa forme propre et que, surtout lorsqu'elles se remplissent, elles n'offrent pas cet aspect globuleux que présenterait une poche élastique homogène. Ces formes particulières sont vraisemblablement commandées par l'inextensibilité de la poche péricardique dans laquelle oreillettes et ventricules sont, à l'état normal, contenus et comprimés. Il en résulte que ces parties doivent présenter une surface extérieure convexe moulée sur la concavité du péricarde qui les enveloppe, tandis que, par leurs autres faces, elles s'aplatissent les unes contre les autres, ce qui donne naissance à des facettes et à des bords plus ou moins saillants.

Les facettes ne sont pas toujours également visibles: sur le ventricule, par exemple, on en voit une très distinctement dans les images IV et V, au moment où elle est démasquée par le resserrement progressif de l'oreillette. Ces empreintes s'effacent peu à peu dans la systole : les ventricules prennent alors une forme sphéroïdale montrant que tous les points de leur paroi contribuent également à comprimer le sang qu'elles renferment.

Un autre fait, visible sur nos images, c'est que la diastole des ventricules coïncide parfaitement avec la systole de l'oreillette. On assiste pour ainsi dire à la réplétion des ventricules par la systole auriculaire. (Nous recommandons l'examen de ces figures à ceux qui admettent encore une *diastole active*, une sorte d'aspiration du sang par les ventricules : phénomène étrange que la structure du cœur ne saurait expliquer, et que l'action de l'oreillette rend complètement inutile.)

Mécanisme de la pulsation du cœur démontré par la Chronophotographie. — Nous avons autrefois expliqué ce phénomène par le durcissement subit des ventricules qui, de mous et dépressibles qu'ils étaient pendant qu'ils se remplissaient passivement, deviennent globuleux et durs au moment où ils se resserrent avec énergie ; à cet instant, ils repoussent ce qui, tout à l'heure, pouvait les déprimer. Cette théorie rend seule compte de tous les phénomènes que l'observation démontre : elle explique pourquoi la pulsation du cœur se perçoit sur tous les points de la surface ventriculaire ; elle rend intelligible ce fait, en apparence paradoxal, que le cœur presse contre les parois de la poitrine, non pas quand il augmente, mais quand il diminue de volume. Ce n'est pas, en effet, par son changement de volume, mais par son changement de dureté que le cœur repousse tout ce qui tend à comprimer sa surface.

Le maximum de dureté correspond, avons-nous dit, à la systole des ventricules, c'est-à-dire au moment où ses fibres puissantes compriment le sang pour le projeter dans les artères. Tel est le mécanisme qui produit la poussée violente que le doigt perçoit comme un choc, et que nous appelons *pulsion* pour rappeler que le phénomène est de même nature que la pulsation des artères : c'est-à-dire qu'il consiste en un durcissement, une moindre dépressibilité de l'organe sous le doigt qui le comprime.

Cette théorie devient plus clairement intelligible pour celui qui tient dans sa main les ventricules d'un grand animal, qui les déprime sous ses doigts et sent que son effort est repoussé au moment où la surface du cœur se ride, accusant ainsi le raccourcissement systolique des fibres musculaires.

Nous avons essayé de rendre ce phénomène *visible* dans l'expérience qui va suivre et nous avons recouru à la disposition suivante :

On conserve pour la circulation artificielle les pièces représentées dans la figure 207, mais on les incline oblique-

ment, en les fixant avec de la cire à modeler sur un bouchon coupé en biseau. Le cœur (fig. 209), est alors couché sur une tablette horizontale et y repose par l'une de ses faces, tandis que l'autre se présente, entièrement libre, pour qu'on y explore la pulsation.

Pour rendre celle-ci visible, il faut montrer qu'un corps solide qui appuie sur les ventricules avec une certaine force en déprime les parois pendant leur relâchement, et disparaît tout entier dans la fossette qu'il y creuse ; mais que, par l'effet

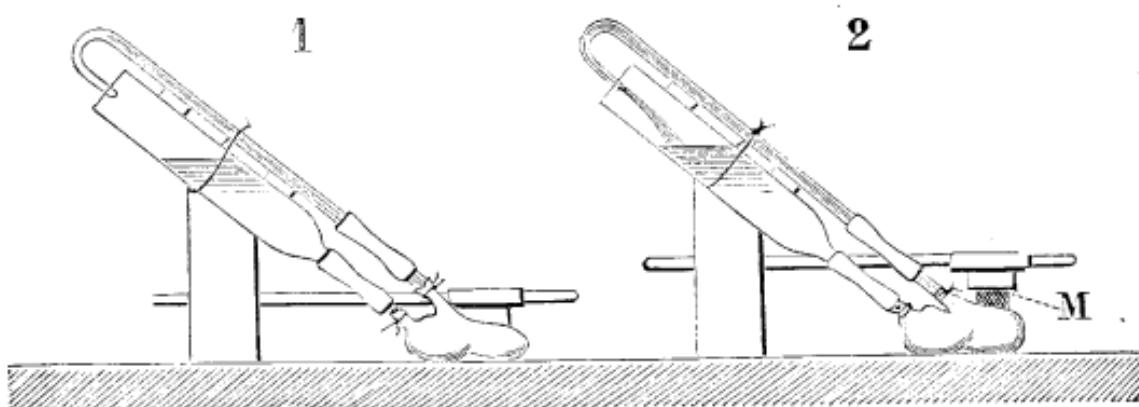


Fig. 209. — Expérience pour montrer par la Chronophotographie le mécanisme de la pulsation du cœur.

de leur systole, les ventricules repoussent ce corps et effacent la dépression qu'il avait formée dans leur paroi.

A cet effet, un petit cube de liège (M image 2) est placé sur la face du ventricule, tandis qu'un levier portant un disque pesant repose sur ce cube de liège. Sous cette pression extérieure, la paroi ventriculaire est déprimée ; le liège disparaît dans cette dépression comme le montre l'image 1. C'est qu'à ce moment les ventricules sont en diastole, comme on peut le reconnaître d'après l'absence du jet de sang artériel.

Dans l'image 2, le ventricule est en systole, cela se reconnaît au filet de sang qui jaillit dans le réservoir. Or, à ce moment, le cube de liège émerge tout entier, repoussé de la dépression qu'il avait formée dans le ventricule quand celui-ci était en relâchement.

Valeurs comparées de l'inscription mécanique et de la

Chronophotographie. — En résumé, ces expériences, qui constituent une des premières applications de la Chronophotographie à la Physiologie expérimentale, donnent sur la fonction du cœur d'autres renseignements que ceux qu'avait déjà donnés la Cardiographie. Si l'on compare les deux méthodes, on voit qu'elles atteignent des buts différents. L'une, traduisant par les inflexions de courbes variées les plus petits changements de la pression du sang dans les cavités, révèle *indirectement* les plus petits détails de la fonction cardiaque ; mais cette méthode s'adresse aux initiés ; elle a exigé, pour l'interprétation des cardiogrammes, de nombreuses expériences de contrôle. L'autre méthode n'est, en définitive, que l'*examen direct* des mouvements du cœur par un œil plus subtil que le nôtre et capable de saisir, en un instant, l'ensemble des changements qu'éprouvent les différentes cavités du cœur. Cette méthode livre du premier coup tout ce qu'elle renferme ; la comparaison d'une série d'images successives permet de suivre entièrement les phases du phénomène étudié, mais seulement ce qui est visible ; elle ne nous renseigne point, comme la Cardiographie, sur la force qui préside aux changements que nous constatons ; elle ne donne même qu'avec une approximation assez grossière l'ordre de succession des phases du mouvement, puisqu'elle procède par indications intermittentes au lieu des indications continues que donnent les courbes.

Toutefois, la Chronophotographie promet d'importantes conquêtes dans la domaine de la Physiologie. Les mouvements dont nous venons d'ébaucher l'étude sur le cœur peu volumineux de la Tortue terrestre, devront être étudiés sur des Tortues de grandes dimensions ; les images en seront plus nettes et plus instructives. Mieux encore, on devra opérer sur le cœur de grands mammifères, en procédant, suivant la manière classique, par l'ouverture du thorax et la respiration artificielle ; puis, en blanchissant le cœur ainsi qu'on l'a vu plus haut et en concentrant sur cet organe un puissant éclairage. On aura ainsi des photogrammes con-

tenant beaucoup de détails qui manquent sur le cœur des petits animaux, tels que le relief des artères et des veines, celui des faisceaux musculaires, les plissements de la séreuse viscérale, les déplacements du cœur dans la cavité péricardique, etc.

On pourra même apprécier avec une exactitude extrême les effets des excitations, électriques ou autres, portées sur différents points de la surface du cœur.

Ainsi, l'inscription graphique et la Chronophotographie donnent sur la fonction du cœur des renseignements très différents, mais également utiles. Telles l'auscultation et la percussion qui, bien différentes aussi l'une de l'autre, concourent cependant, avec une valeur égale, à renseigner sur les conditions physiques du cœur et sur l'état de sa fonction.

On pourrait multiplier indéfiniment les exemples d'applications de la nouvelle méthode à la Physiologie expérimentale; nous en avons déjà signalé quelques-unes au passage. Ainsi, la Chronophotographie permettra de déterminer le rôle propre à chaque muscle dans la locomotion, d'après le relief qui traduira la contraction de ce muscle à telle ou telle phase du mouvement.

Mais s'il est une question obscure entre toutes dans la locomotion animale, c'est la détermination des centres des mouvements articulaires. Avec la Chronophotographie cette détermination est des plus faciles.

Détermination des centres du mouvement des articulations par la Chronophotographie. — Quand deux surfaces articulaires se meuvent l'une sur l'autre, le mouvement ne se passe pas toujours autour d'un point correspondant au centre de courbure des surfaces. On sait, par exemple, qu'au genou, les condyles du fémur roulent et glissent à la fois sur les facettes du tibia; que les condyles de la mâchoire inférieure glissent en sens divers dans la cavité glénoïde du temporal, etc. Il s'ensuit que le centre du mouvement articulaire n'est pas révélé par la conformation anatomique, mais qu'il faut le trouver expérimentalement.

Ce problème est à peu près identique à celui que nous avons vu se poser à propos du roulis des navires; il comporte la même solution expérimentale. Sur le cadavre, la chose est simple : on plante un clou dans un condyle du maxillaire et un autre dans la branche montante de cet os, près de sa partie inférieure. Un fil de métal poli, tendu entre ces deux clous, représentera, sous forme d'une ligne brillante, l'axe de la branche montante du maxillaire. On noircit un peu la peau du sujet, et l'on prend, sur plaque fixe, une série d'images pendant qu'on imprime au maxillaire des mouvements d'abaissement et d'élévation. Sur le photogramme se détachent nettement des lignes qui se coupent entre elles en des lieux qui représentent les centres instantanés de mouvement du maxillaire pour ses déplacements angulaires successifs.

Sur le vivant, l'expérience n'est guère plus difficile. Une petite planchette appuyée sur les dents de la mâchoire inférieure y est maintenue par des liens de caoutchouc passant sous le menton. Dans cette planchette, qui accompagne tous les mouvements du maxillaire, on implante un fil de métal brillant qu'on plie en lui faisant épouser la forme angulaire de la mâchoire, et que l'on coupe au niveau du condyle. Tous les mouvements du maxillaire sont reproduits par ce fil dont la branche montante, par ses intersections sur l'image, indique les centres de mouvement de l'articulation.

Les applications de la Chronophotographie à l'analyse des mouvements qui se passent dans le champ du Microscope seront probablement très importantes; les essais que nous avons faits à cet égard seront développés au chapitre prochain.

CHAPITRE XVII

CHRONOPHOTOGRAPHIE MICROSCOPIQUE

SOMMAIRE. — Variété des mouvements qui s'observent dans le champ du Microscope. — Applications de la Chronophotographie à l'étude de ces mouvements ; difficultés du sujet. — Disposition spéciale de l'appareil pour la Chronophotographie sur plaque fixe et sur pellicule mobile. — Rétraction du style des Vorticelles. — Mouvements du sang dans les vaisseaux capillaires. — Mouvement des Zoospores dans les cellules d'une Conferve. — Chronophotographie pratiquée avec le microscope solaire. — Facilité de l'application de cette méthode.

Les Sciences naturelles recourent chaque jour davantage à l'emploi du Microscope ; cet instrument, qui pénètre les détails intimes de la structure des organes, montre aussi dans certains de leurs éléments, des mouvements qui sont l'essence même de leur fonction.

Si Harvey, par un trait de génie, a compris que le sang des artères devait, par quelque chemin, revenir dans les veines, la démonstration de ce passage attendit pour se produire l'invention du Microscope. Tout apparut alors d'un seul coup aux yeux émerveillés de Malpighi : la présence des globules dans le sérum du sang, les ramifications capillaires des vaisseaux qui le contiennent, le courant infléchi qui, partant des artères, revient au système veineux.

La contraction des muscles restait inexplicable jusqu'à ce que l'emploi du Microscope montrât l'existence de la fibre musculaire, son raccourcissement par la condensation des disques dont elle est formée, et l'onde qui la parcourt après chaque excitation. Depuis lors, les physiologistes ne s'égarent

plus en de veines hypothèses ; c'est dans la fibre musculaire qu'ils cherchent l'origine du travail mécanique des animaux. Les faits s'accumulent, peu à peu la théorie se dégage et l'on sent que le moment approche où la contraction musculaire sera expliquée.

Ailleurs, le Microscope nous montre dans une goutte d'eau le mouvement et la vie des millions de petits êtres qui s'y agitent, avec des moyens étranges de locomotion dont il n'y a pas d'exemples chez les animaux supérieurs. Des larves transparentes laissent voir à leur intérieur le cœur qui bat, l'intestin qui se contracte ; ou bien ce sont les curieux phénomènes de la génération, les transformations lentes des ovules ou des embryons. Le chimiste lui-même, lorsqu'il voit se former sur la plaque du Microscope d'élegantes arborisations cristallines, essaie de suspendre les lois de cette mystérieuse architecture.

Tous ces mouvements, lents ou rapides, que le Microscope montre avec des caractères si variés, on en peut suivre les phases au moyen de photogrammes successifs.

Applications de la Chronophotographie à l'étude des mouvements dans le champ du Microscope. — Notre instrument est le seul, jusqu'ici, qui puisse s'appliquer à prendre des images successives d'objets microscopiques. En effet, comme il n'a qu'un seul objectif, on peut choisir celui-ci d'un foyer convenable pour former sur la plaque sensible des images agrandies à toutes dimensions. Les procédés de la Microphotographie ont été dans ces dernières années portés à un haut degré de perfection ; il semble donc qu'il n'y ait plus qu'à suivre les règles indiquées dans les traités spéciaux.

Mais, dans l'application, se rencontrent des difficultés dont la cause est facile à comprendre ; elles portent principalement sur les manières d'éclairer l'objet dont on veut prendre les images.

Les plus petits êtres ont en général des mouvements très rapides par rapport à leurs dimensions : un infusoire traverse

en un instant le champ du Microscope, et dans ce passage qui a duré si peu, il a exécuté un très grand nombre de mouvements que l'œil ne saurait suivre. Les cils vibratiles, par exemple, qui servent d'organes locomoteurs à beaucoup de ces êtres, sont animés de vibrations si vives, qu'ils deviennent tout à fait invisibles; ce n'est que sur l'animal mort qu'on arrive à les apercevoir avec quelque netteté.

Il faudra donc, pour obtenir des images nettes de ces mouvements, donner aux temps de pose une brièveté extrême. On a vu que, pour saisir les images des ailes d'un Insecte qui vole, la pose peut être réduite à $1/25000$ de seconde; mais à la condition de soumettre l'animal à un éclairage très vif : nous l'avons photographié, en silhouette, devant le disque même du soleil.

Pour les êtres microscopiques, cet éclairement serait encore insuffisant, avec les temps de pose si courts qui sont imposés par la rapidité de leurs mouvements. Il ne s'agit plus, en effet, d'en prendre les images avec leurs dimensions réelles, mais il faut les agrandir énormément. Or cet agrandissement entraîne une diminution proportionnelle de la quantité de lumière qui agit en chaque point de la plaque sensible: un agrandissement linéaire de 100 diamètres réduit 10 000 fois l'intensité lumineuse en chaque point. Il est vrai qu'avec de puissantes lentilles, on peut toujours arriver à concentrer la lumière solaire d'une manière suffisante, mais alors la chaleur qui accompagne cette lumière détruirait bien vite les êtres vivants qui se meuvent dans la préparation. L'emploi de cuves remplies de solution d'alun dans la glycérine, préconisé comme le meilleur moyen d'arrêter les rayons calorifiques, est insuffisant; nous avons recouru à une disposition spéciale.

Au lieu de faire agir la lumière d'une façon permanente sur la préparation microscopique, on ne l'y fait arriver que d'une manière intermittente, pendant des temps très courts, inférieurs en général à $1/1000$ de seconde. De cette façon, si

forte que soit la concentration de la chaleur, elle est incapable de nuire aux animaux qu'on étudie.

Le Chronophotographe se prête aisément à ces éclaircements instantanés : il suffit de placer l'objet qu'on examine derrière les disques obturateurs. Ces disques ont, dès lors, pour fonction de couper le faisceau lumineux en avant de la

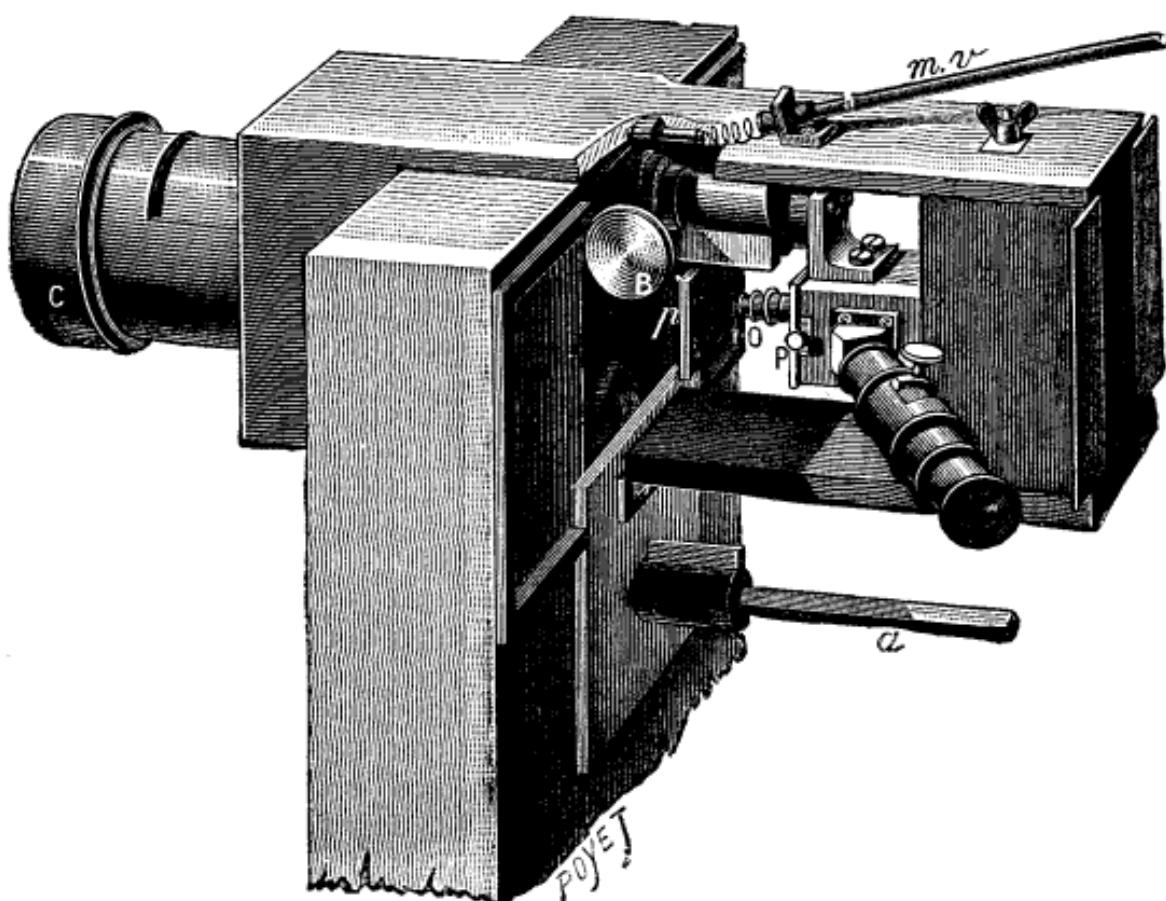


Fig. 210. — Pièce spéciale qui s'ajoute au Chronophotographe pour étudier les mouvements des êtres microscopiques.

préparation, et de n'éclairer celle-ci que pendant les courts instants de la coïncidence des fenêtres.

La figure 210 montre, dans ses principaux détails, la pièce spéciale qui s'adapte au Chronophotographe pour l'analyse des mouvements microscopiques. Une caisse de bois, ouverte à sa partie centrale, s'adapte à glissement sur l'avant-corps de notre appareil, à la façon des boîtes à objectifs déjà

décrivées. Cette caisse porte, en avant, un objectif C qui ne sert qu'à condenser la lumière envoyée par un héliostat. Le foyer de ce condensateur vient se former sur la platine p, à l'endroit même où sera placée la préparation. Pour la mise au point, on règle la position de la platine porte-objet, d'abord au moyen du bouton B qui commande une crémaillière, puis avec la longue tige mv qui actionne la vis micrométrique.

L'objectif microscopique O est braqué sur la préparation ; en arrière de cet objectif, les rayons qui portent l'image traversent une boîte cubique de métal, puis, continuant à travers la caisse de bois et le soufflet qui s'y adapte, arrivent enfin sur la glace dépolie de la *chambre aux images* (1).

Sur le côté de la caisse métallique, est obliquement implanté un tube de Microscope avec son oculaire. Une disposition imaginée par M. Nachet permet d'envoyer à volonté l'image, soit sur le verre dépoli, soit dans le Microscope ; elle consiste dans l'emploi d'un prisme à réflexion totale que l'on met en mouvement au moyen du bouton P. En pressant sur le bouton, on avance le prisme et on rejette l'image de la préparation dans le Microscope ; en tirant sur le bouton, on éloigne le prisme et l'image va se former directement sur le verre dépoli ou sur la plaque sensible.

Comme il serait impossible de rechercher les points intéressants de la préparation lorsqu'on est placé à l'arrière de l'appareil pour regarder l'image sur le verre dépoli, cette recherche se fait en regardant par l'oculaire du Microscope qu'une lentille de correction permet de régler de telle sorte, que les images soient exactement au point dans le Microscope et sur la plaque sensible.

Pour faire cette mise au point, il est indispensable de placer au-devant du condensateur un écran de papier assez épais. La lumière qui le traverse n'échauffe pas la prépara-

(1) Voir ci-dessus la description de cette chambre, p. 114, fig. 84.

tion, et l'œil qui l'examine par le Microscope en peut sans danger soutenir l'éclat (1).

Dès que la mise au point est faite, et lorsqu'on a constaté que les mouvements se produisent dans des conditions convenables, on tourne les disques obturateurs de manière à faire cesser l'éclairage continu; on enlève l'écran, on tire le prisme et l'on manœuvre l'appareil de façon à prendre les images.

Ici, comme dans les autres expériences, il serait utile de recueillir les images, tantôt sur plaque fixe, tantôt sur pellicule mobile.

L'obtention d'images successives *sur plaque fixe* exige que l'objet en mouvement soit fortement éclairé devant un champ obscur. Pour les faibles grossissements M. Nachet a construit un condensateur de lumière en forme de cône à base sphéroïdale. Cette base est creusée à son centre d'une capsule remplie d'un vernis noir opaque. Si l'on fait arriver la lumière sur le sommet de ce cône de cristal, celle-ci, réfléchie à la base sous forme de rayons convergents, éclaire vivement la préparation; les objets qu'elle contient se détachent en lumière sur le fond noir central. Mais cette disposition n'est applicable qu'aux faibles grossissements, elle ne nous a donné jusqu'ici que des résultats de peu d'intérêt, nous ne désespérons pas cependant d'avoir, par quelque autre moyen, de bonnes séries d'images sur champ obscur et sur plaque fixe.

La Chronophotographie *sur plaque mobile* est plus facile à réaliser. Le premier objet que nous ayons soumis à cette étude, c'est le mouvement des Vorticelles. Ces infusoires sont formés d'une sorte d'entonnoir muni d'une couronne de cils vibratiles et porté sur un style contourné en spirale qui s'implante, par son autre extrémité, sur les ramuscules

(1) Il serait très imprudent de négliger l'emploi de l'écran, il faut même veiller avec soin à ce que personne ne l'enlève pendant qu'on fait la mise au point: la lumière vraiment aveuglante qu'on recevrait sur la rétine pourrait amener de graves accidents.

végétaux qui lui servent d'appui. De temps en temps ce style se rétracte brusquement en rapprochant les tours de sa spirale; l'entonnoir est vivement ramené jusqu'à son support. Puis la spirale s'allonge et ses enroulements s'effacent peu à peu jusqu'à la rétraction prochaine.

La figure 211 montre, à un grossissement assez considérable,

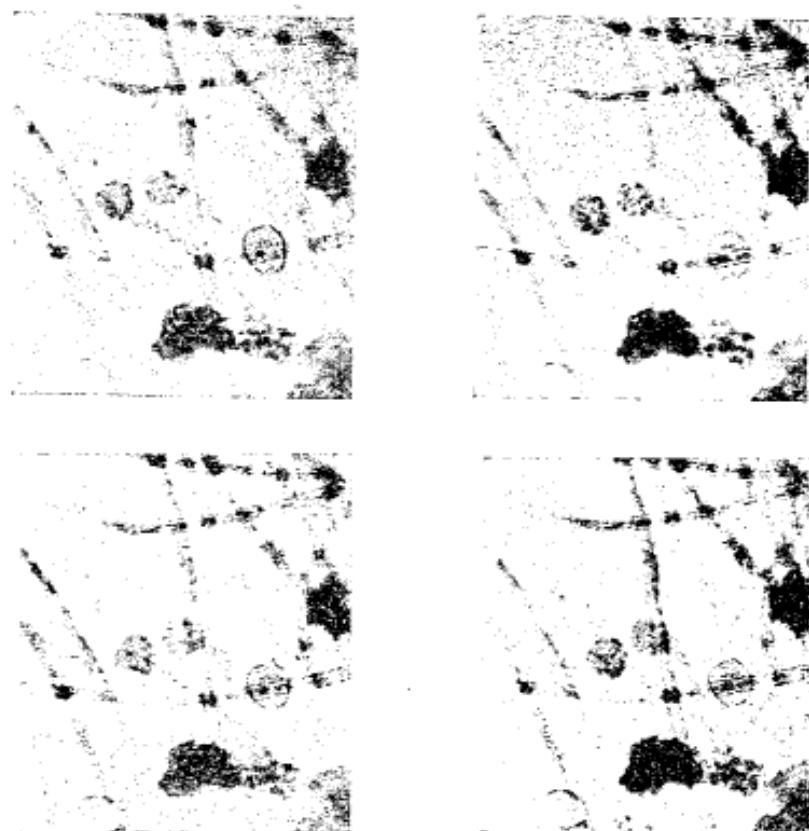


Fig. 211. — Montrant les mouvements de Vorticelles qui rétractent leur style en spirale. La succession des mouvements se lit de gauche à droite et en commençant par les deux images supérieures.

plusieurs de ces Vorticelles au milieu d'une intrication de filaments de Conferves. Pour assister à un mouvement, prenons pour points de repère les entre-croisements des filaments qui forment un réseau dans le champ du Microscope.

Dans la moitié supérieure gauche de chacune des images on voit, dans un rectangle irrégulier, deux Vorticelles inégaux en grosseur : la plus grosse, celle de gauche, est

située à un niveau voisin de celui de l'autre; dans les images suivantes elle s'abaisse graduellement, en même temps que son style présente des spires plus serrées.

Cet exemple n'est pas un des plus intéressants qu'on puisse choisir; en outre, le mode de reproduction (la simili-gravure) introduit une cause d'altération des images quand il s'agit d'objets de si petite dimension; il exige en effet, pour les besoins de la typographie, que les noirs soient formés d'une série de hachures qui en rendent les contours vagues et en interrompent la continuité. Aussi, pour la représentation d'images microscopiques, doit-on recourir de préférence à l'impression aux encres grasses.

La planche III montre la circulation du sang dans un vaisseau capillaire et les mouvements de Zoospores.

Mouvement du sang dans les vaisseaux capillaires. —

On a choisi les vaisseaux capillaires du mésentère du Triton. Le feuillet péritonéal est tendu sur une plaque de liège percée d'un trou au travers duquel arrive la lumière; on a amené dans le champ du verre dépoli un capillaire fin qui en occupe à peu près le centre. En dehors du vaisseau, des globules rouges et blancs extravasés sont immobiles, mais à l'intérieur du vaisseau, les globules sont entraînés par un courant rapide légèrement saccadé.

Si l'on compare entre elles ces différentes images, le mouvement s'y révèle par le changement qui s'est produit de l'une à l'autre dans l'arrangement des globules. En suivant la série de bas en haut, ce qui est l'ordre de succession véritable, on voit, par exemple, vers la droite de l'image inférieure, une interruption dans la colonne des globules rouges qui remplit le vaisseau et, entre deux globules rouges, un globulin qui se détache comme un petit cercle blanc. La seconde image montre encore la même interruption et les mêmes globules parfaitement reconnaissables et sensiblement à la même place (un temps d'arrêt s'était produit dans le mouvement du sang). Mais dans les images suivantes, le courant s'était rétabli et, se portant vers la gauche, y

avait entraîné le globulin en comblant, par l'arrivée de nouveaux globules rouges, l'interruption qui existait tout à l'heure dans leur colonne. Ce globulin que nous avons choisi comme point de repère se retrouve jusqu'à la sixième image; il est emporté vers la gauche suivant une ligne oblique qui exprime un mouvement à peu près uniforme de la circulation.

La vitesse du mouvement peut s'estimer d'après le chemin parcouru entre deux images, c'est-à-dire en un vingtième de seconde. L'espace parcouru sur 5 images est d'environ 4 centimètres, soit 20 centimètres par seconde. Mais c'est la vitesse apparente qu'on a ainsi mesurée, elle se trouve multipliée dans le même rapport que des dimensions linéaires de l'image. Dans le cas présent, le grossissement était d'environ 90 diamètres : la vitesse réelle était donc d'un peu plus de 2 millimètres par seconde. Ainsi, ce qu'on a appelé le torrent circulatoire et qui présente en effet pour l'œil une vitesse très grande, est en réalité un mouvement fort lent.

Mouvements des Zoospores. — La Physiologie végétale présentera sans doute un grand nombre de mouvements très curieux, il en est un qu'il nous a semblé intéressant de reproduire : c'est celui des Zoospores à l'intérieur des cellules de Conferves.

Ces plantes aquatiques sont composées de filaments formés de cellules placées en séries linéaires et susceptibles de se ramifier plus ou moins. Certaines de ces cellules, à un moment donné, sont entièrement pleines de protoplasma qui, sur nos images (pl. III), se détachent en noir et sont entourées d'un contour formé par la membrane de cellulose qui est transparente. Plus tard les cellules se vident plus ou moins complètement : on les voit alors réduites à leur membrane transparente qui est indiquée par un contour clair.

C'est ici que les botanistes ont découvert un des faits les plus extraordinaires de la vie des êtres organisés. Le protoplasma, d'abord homogène et amorphe, qui remplissait les cellules se condense : il se fragmente en

petites masses dont chacune acquiert à l'une de ses extrémités deux cils vibratiles et se met à se mouvoir. Tant qu'elles restent enfermées dans la cellule, ces petites masses n'offrent que des mouvements peu étendus; mais bientôt la cellule mère s'ouvre en un point de sa paroi, et par cette ouverture les petits corps s'échappent au dehors et se déplacent dans l'eau à l'aide de leurs cils vibratiles. Ces petites masses sont les Zoospores. C'est généralement le matin au lever du soleil qu'a lieu cette sortie des Zoospores, qui présentent, surtout dans les premières heures de leur liberté, des mouvements extrêmement actifs.

Dans la planche III, chaque image présente à sa partie supérieure un rameau de Conferves formé de plusieurs cellules. A droite elles paraissent noires, parce qu'elles sont remplies de protoplasma; à la gauche du filament elles sont vides et transparentes.

Entre ces deux sortes de cellules, il en est une dans un état intermédiaire (pour mieux la désigner on l'a marquée d'un petit trait vertical). Cette cellule est remplie de Zoospores munies de leurs cils. Ces petits êtres, qui renferment aussi de la chlorophylle, s'agitent en tous sens; leur mouvement se traduit dans la série des images par les positions différentes qu'ils occupent dans la cellule mère. Mais rien ne peut rendre, pour qui ne l'a pas vue, l'activité singulière qui règne à l'intérieur de cette cellule et qui ne cesse qu'alors que tous les Zoospores ont réussi à s'en échapper.

Chronophotographie pratiquée au moyen du Microscope solaire. — La méthode qui vient d'être décrite présente quelques difficultés d'application lorsqu'il s'agit de saisir les mouvements de certains infusoires qui parcourent le champ du Microscope. On a beau s'assurer par l'oculaire microscopique de la présence de l'animal dans le champ visible, il en pourra sortir pendant les manœuvres qui précèdent la prise de l'image: ainsi, pendant qu'on retirera le prisme qui fait passer l'image sur la pellicule sensible, et pendant qu'on mettra l'appareil en marche. L'exactitude de la mise

au point est elle-même difficile à apprécier, parce que l'égalisation de cette mise au point, et pour l'oculaire et pour la plaque sensible, est assez délicate. Ces difficultés sont supprimées par le procédé suivant, qui nous semble applicable à tous les cas.

Nous nous plaçons dans une chambre obscure où la lumière solaire réfléchie par un héliostat pénètre par le trou d'un volet. Le faisceau lumineux, après avoir traversé une cuve d'alun, est concentré par un condensateur sur la préparation, et l'image formée par l'objectif microscopique est reçue sur un écran. Dans cet écran est percé un trou de la forme et de la largeur de la fenêtre d'admission et derrière lequel on place l'appareil chronophotographique. Celui-ci est dépourvu de son avant corps, et muni de disques obturateurs qui passent devant la fenêtre d'admission.

On voit courir sur l'écran les images des animaux en mouvement et l'on saisit l'instant où ces images s'engagent dans l'ouverture de l'écran ; à ce moment, il est clair qu'elles se trouvent dans le champ de la plaque sensible qui est située en arrière ; on peut alors presser sur la gâchette et recueillir une série de photogrammes. Si l'on voyait l'image se dégager de l'ouverture et reparaitre sur l'écran, il faudrait cesser de presser sur la gâchette afin d'arrêter la prise des images, on la reprendrait quand l'animal se retrouverait dans une position favorable.

Les avantages de cette méthode sont multiples : elle comporte une mise au point plus rigoureuse, car l'opérateur peut apprécier directement la netteté de l'image au moment où il va la fixer par la Photographie ; elle permet de saisir des phénomènes fugitifs qui échapperait s'il fallait, avant d'en prendre les images, exécuter des manœuvres un peu compliquées ; enfin, elle met l'opérateur à l'abri des dangereuses actions de la lumière sur la rétine qui se produisent dans l'autre méthode si par oubli, on laisse arriver dans le tube du Microscope où il regarde la lumière de l'héliostat concentrée par le condensateur.

Nous avons obtenu de cette façon les images d'infusoires en mouvement, les contractions des organes internes chez différentes larves, l'action des membres et des appareils préhenseurs de toutes sortes d'espèces microscopiques. Il semble même possible de surprendre sur certaines larves transparentes de curieux détails de la contraction musculaire.

Cette méthode se prête aussi fort bien à l'étude de la cristallisation de différents sels. Lorsque la solution saline se concentre par évaporation, on voit apparaître des cristaux, de forme spéciale pour chaque sel, et de ces points de départ rayonnent des arborisations diversement ramifiées qui, avec une vitesse variable, envahissent tout le champ du Microscope. Le développement de ces cristallisations s'observe très bien sur l'écran; et dès qu'on voit l'extrémité d'une arborisation cristalline se propager dans l'*ouverture d'admission* de l'appareil, on recueille les images, et sur chacune d'elles on voit une phase différente du développement cristallin.

Les essais incomplets que nous avons pu faire jusqu'ici montrent que la Chronophotographie microscopique serait capable, entre des mains plus expérimentées que les nôtres, de donner d'importants résultats. Nous nous proposons de poursuivre ces applications.

CHAPITRE XVIII

SYNTÈSE DES MOUVEMENTS ANALYSÉS

par la Chronophotographie.

SOMMAIRE. — Méthode de Plateau ; son Phénakisticope. — Zootrope ; ses applications à l'étude des allures du Cheval et des relations qu'elles ont entre elles. — Application des Photographies instantanées au Zootrope : Muybridge, Anschütz. — Applications scientifiques de la méthode de Plateau ; conditions que doit remplir un bon appareil. — Perfectionnements apportés par différents auteurs. — Essai de construction d'un Projecteur chronophotographique.

Lorsque la Chronophotographie traduit les attitudes successives d'un objet en mouvement, elle nous le montre tout autre que nos yeux nous le font voir. En chacune de ses attitudes, l'objet paraît être immobile, et les actes qui se sont produits à des instants successifs sont réunis en une série d'images comme s'ils étaient simultanés. Ces images s'adressent donc plus à l'esprit qu'aux sens. Elles nous préparent, il est vrai, à mieux observer la Nature et à chercher par exemple, sur un animal en mouvement, des attitudes que nous n'avions pas encore aperçues. Mais cette éducation de notre œil peut être rendue plus complète encore si, en lui présentant les images d'une certaine manière, on lui rend l'impression du mouvement dans des conditions où il est habitué à le saisir.

Tel est l'objet de la *Stroboscopie*, méthode d'une grande portée scientifique et dont les principes ont été posés par Plateau.

Cette méthode est basée sur une propriété physiologique de notre rétine, par laquelle les images qui viennent s'y peindre persistent pendant un instant. On estime à 1/10 de seconde la durée de cette persistance rétinienne. Il en résulte que si, dix fois par seconde, on fait apparaître une image devant notre œil, nous perdons la notion de la discontinuité et nous voyons cette image continuellement présente. Si les images qu'on nous montre représentent les positions successives qu'a prises un objet en mouvement, nous avons l'impression d'un mouvement continu sans intermittences ni saccades.

Or, on a vu que la Chronophotographie peut saisir, en une seconde, non seulement 10 images, mais 20, 40, 60 même. Si donc on faisait apparaître sous nos yeux, à raison de 10 par seconde, les 60 images recueillies dans un pas de galop du Cheval, la durée de ce pas serait portée à 6 secondes et nous aurions tout le temps de suivre les mouvements des membres, si difficiles à observer dans les conditions réelles. De même, on montrerait un oiseau qui vole avec des coups d'ailes ralenti, et ainsi des différents phénomènes qui nous échappent par leur rapidité trop grande.

Inversement, quand un phénomène, par sa lenteur excessive, échappe à l'observation, les images en seraient prises à longs intervalles et seraient présentées avec une succession assez rapide pour que les changements soient nettement perceptibles.

Dans d'autres cas enfin, les images seraient présentées avec le même intervalle de temps qui a séparé les photographes successifs, le mouvement apparaîtrait alors avec ses caractères naturels.

Tel est l'objet de la Stroboscopie; nous allons exposer les développements successifs de cette méthode.

Phénakistope de Plateau. — Tout le monde connaît l'ingénieux appareil que Plateau a inventé au commencement de ce siècle et auquel il a donné le nom de *Phénakistope*. Cet instrument, dans sa forme première, était un jouet

charmant dont s'est amusée notre enfance; il devait se prêter un jour à des études d'un grand intérêt.

Voici en quoi consistait le Phénakisticope. Un disque de carton était percé, près de ses bords, d'une couronne de

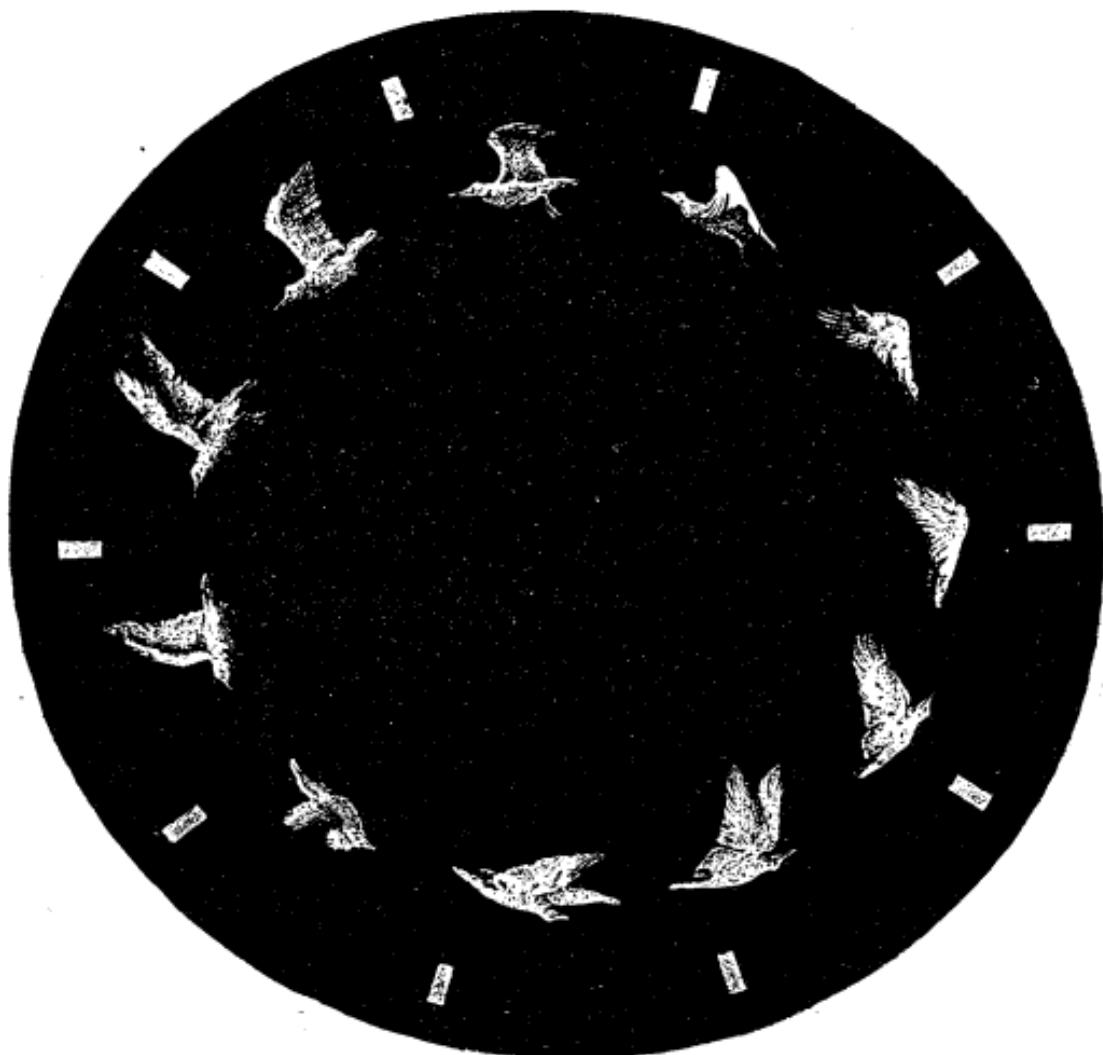


Fig. 212. — Disque d'un Phénakisticope montrant les différentes phases du coup d'aile d'un Goëland.

petites fenêtres équidistantes; l'une de ses faces était noircie et l'autre portait une série d'images représentant un homme ou un animal à des attitudes qui correspondaient aux phases successives d'un mouvement. On faisait tourner le disque sur son axe en face d'un miroir, et en appliquant l'œil, contre la face noircie, au niveau des fenêtres tournantes, on

apercevait successivement par réflexion les images correspondant à des attitudes différentes. Cela donnait l'illusion d'un mouvement véritable.

La figure 212 représente le disque d'un Phénakisticope sur lequel sont disposées en cercle les images successives d'un Goéland qui vole. En tournant cette face devant le miroir et en appliquant l'œil au niveau des petites fenêtres circulairement percées dans le disque, on voit le Goéland battre des ailes, d'autant plus vite que la rotation du disque est plus rapide.

Il est indispensable de faire tourner l'appareil dans un sens déterminé, sans quoi les images se succéderaient dans l'ordre inverse et le mouvement serait renversé.

Du Zootrope. — L'industrie s'empara de ce jouet et lui donna des formes plus commodes. L'une d'elles reçut le nom de *Zootrope*: elle consiste en une sorte de coupe cylindrique tournant autour d'un axe vertical. A leur partie supérieure, les bords de cette coupe sont percés de fentes étroites verticalement dirigées. A l'intérieur des parois cylindriques, on étale une bande de papier qui porte la série des images répondant aux attitudes successives d'un Homme ou d'un animal en mouvement. Ces images, vues par les trous pendant que le Zootrope tourne, donnent la même illusion que le Phénakisticope.

Cette disposition, que beaucoup de constructeurs ont adoptée, présente déjà un avantage : elle permet à plusieurs personnes placées autour de l'appareil d'observer en même temps les images en mouvement.

Application du Zootrope à l'étude des allures du Cheval. — En 1867, nous nous sommes servi du Zootrope pour représenter les mouvements du Cheval à diverses allures et pour montrer comment ces allures diffèrent les unes des autres par un simple changement dans les rapports des mouvements de l'avant-main avec ceux de l'arrière-main. C'était la démonstration concrète des relations exprimées par la notation chronographique.

Mais, à cette époque, il n'était pas encore question de Photographie instantanée, nous eûmes donc recours à de simples dessins où les attitudes successives étaient représentées d'après les notations et les pistes.

Choisisson d'abord l'allure la plus simple, celle du Cheval à l'amble, où les membres du même côté ont un action simultanée, on dessina sur une longue bande de papier douze images, dont six représentaient les phases du levé des pieds antérieur et postérieur droits, pendant que les pieds gauches étaient à l'appui, les six autres correspondant au contraire à l'appui des pieds droits, les gauches étant au levé.

En plaçant cette bande dans le Zootrope, on voyait, par les fenêtres, un Cheval marchant à l'amble.

Il s'agissait de montrer comment les autres allures dérivent de l'amble. A cet effet, on tira des lignes verticales coupant les images du Cheval par le milieu du corps, puis on traça une fenêtre rectangulaire comprenant, sur chaque image, l'arrière-main de l'animal; enfin, découvant le papier suivant ce contour, on détacha tous les morceaux qui correspondaient à l'arrière-main. On avait ainsi une bande représentant une série d'avant-mains de Chevaux dans des attitudes différentes et, derrière chacun de ces fragments d'image, une large fenêtre rectangulaire était ouverte. On appliqua cette bande de papier sur une autre de même dimension, et reprenant les arrière-mains qu'on avait découpées, on les colla en plein, et chacune à son rang, sur la bande de dessous découverte au niveau des fenêtres de celle de dessus. Cela fait, les deux bandes superposées reproduisaient l'aspect primitif, c'est-à-dire les attitudes successives d'un Cheval à l'amble pendant la durée d'un pas.

Faisons maintenant glisser la bande de dessous vers l'avant, de telle sorte que les avant-mains de la bande de dessus se trouvent réunies aux arrière-mains de la bande de dessous avec une anticipation de ces dernières images, égale à $1/12$ de la durée du pas. La série, ainsi

disloquée, donnait au Zootrope l'aspect de l'*amble rompu*, dans lequel les membres postérieurs se meuvent un peu avant les membres antérieurs. Un glissement plus grand encore donnait l'allure du *pas*. En glissant encore dans le même sens, on arrivait au *trot désuni*, puis au *trot franc*. C'était la représentation objective des relations exprimées chronographiquement dans le tableau (fig. 128).

Cette méthode permettait aux personnes familiarisées avec les allures du Cheval de reconnaître chacune de ses allures marchées et de bien saisir la manière dont elles dérivent les unes des autres.

Nous avons été fort habilement secondé dans ces études par M. Mathias Duval, aujourd'hui professeur à la Faculté de médecine et à l'École des Beaux-Arts. Ce savant comprenait tout le parti qu'on peut tirer de cette méthode pour l'enseignement de mouvements compliqués et rapides, que les spécialistes seuls apprennent à connaître au prix de grands efforts.

De son côté, M. Zecky, professeur à l'École des Beaux-Arts de Vienne, a adopté notre manière de représenter les allures du Cheval. Nous possédons encore des bandes très soigneusement dessinées qu'il nous a envoyées.

Applications de la Photographie instantanée au Zootrope. — Cette méthode ne donnait aux allures représentées que le degré de vérité que le dessinateur y avait pu mettre. La Photographie devait amener à la perfection la représentation zootropique du mouvement. Aussi, du jour où M. Muybridge réussit à photographier des séries d'attitudes de l'Homme et des animaux en action, s'empressa-t-il de recourir à la méthode de Plateau pour réaliser la synthèse des mouvements dont il avait fait l'analyse.

L'appareil dont se servait M. Muybridge était une sorte de Phénakisticope à projection. Des images de Chevaux peintes sur des disques de verre d'après les photogrammes de l'auteur tournaient au foyer d'une lanterne à projection. Des fenêtres percées dans un disque tournant produisaient les

éclairements aux moments convenables. Un nombreux public pouvait voir, sur un écran, des silhouettes de Chevaux courant en sens divers et à toutes les allures.

Zootropes de Muybridge et de Anschütz. — Nous disons que ces images étaient peintes: en effet, un inconvénient de l'appareil de Muybridge et du Zootrope lui-même est de déformer les images en les raccourcissant dans le sens trans-

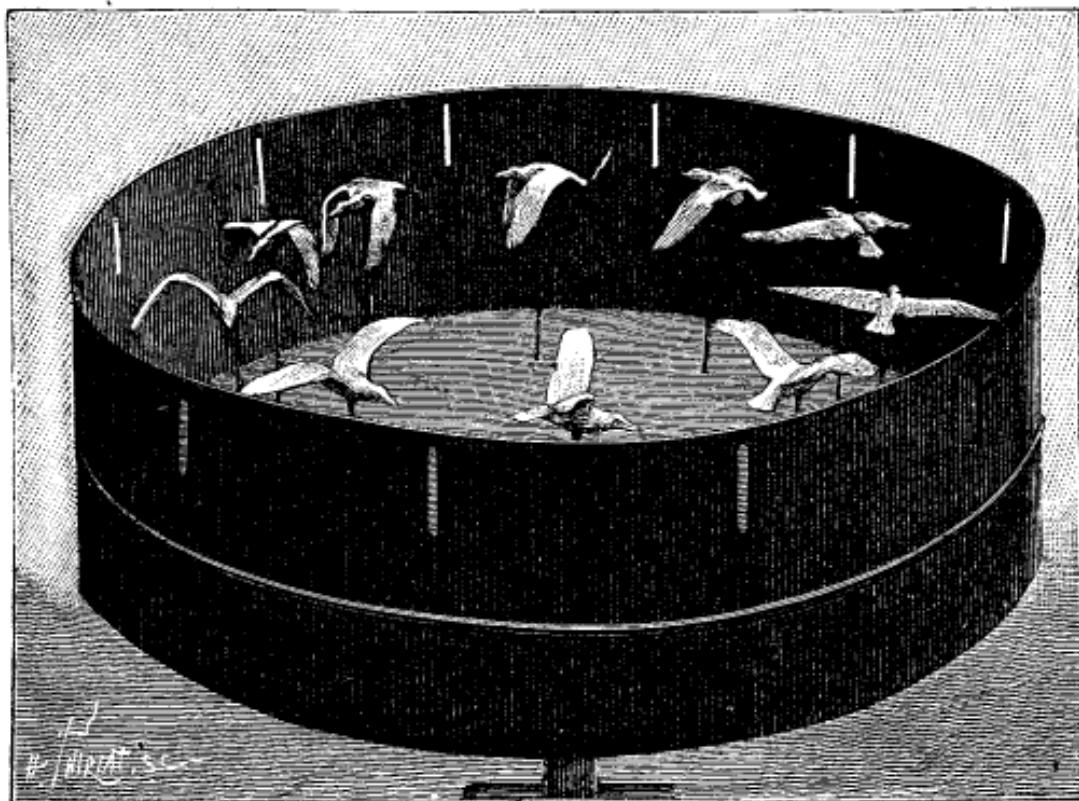


Fig. 213. — Zootrope dans lequel sont disposées dix images en relief d'un Goéland dans les attitudes successives du vol.

versal, de sorte que les Chevaux peints sur les glaces tournantes devaient être allongés pour apparaître avec leurs proportions réelles dans les projections.

M. Anschütz a fait pour le Zootrope ordinaire des bandes de papier couvertes d'images photographiques représentant des Hommes et des animaux en mouvement. Ici encore, les images sont légèrement déformées et les Chevaux surtout présentent une diminution de longueur assez sensible.

Zootrope à figures en relief. — Nous avons également appliqué le Zootrope à l'étude des mouvements de l'aile de l'Oiseau. Mais pour cela nous avons recouru à une disposition particulière. Au lieu d'une bande de papier recouverte d'images, nous avons introduit dans le Zootrope une série de figurines en cire, peintes à l'huile, et représentant l'Oiseau à toutes les phases successives du coup d'aile (fig. 243). L'illusion est alors complète et l'on voit tourner dans l'appareil, des Oiseaux qui volent en cercle et qui, d'abord semblent s'éloigner, puis passer en travers, et revenir sur l'observateur (1).

Applications scientifiques de la méthode de Plateau. — Toutes ces tentatives seraient puériles si elles se bornaient à reproduire ce que l'œil voit quand on regarde un animal vivant. Elles ramèneraient en effet toutes les incertitudes et toutes les difficultés que présente l'observation du phénomène réel. Sur un Oiseau, par exemple, les ailes n'apparaîtraient que d'une manière très confuse, comme on les voit dans la Nature. Mais l'emploi du Zootrope combiné à la Chronophotographie a une tout autre portée : il permet de voir, ralenti à un degré quelconque, un mouvement trop rapide pour être observé directement. Nous avons dit, en effet, qu'on peut prendre, dans la durée d'un coup d'aile qui serait de $\frac{1}{5}$ de seconde, une série de 12 images, soit un intervalle de $\frac{1}{60}$ de seconde entre chacune d'elles. Or, les 12 images qui correspondent à une seule révolution de l'aile peuvent passer devant l'œil en une seconde entière. Cette fréquence suffit largement pour donner l'impression d'un mouvement continu. Dans ces conditions, le mouvement est ralenti cinq fois ; aussi, l'œil peut-il en suivre toutes les phases, tandis que, sur l'Oiseau vivant, il ne voyait qu'une agitation confuse des ailes.

De même, pour les allures du Cheval, le ralentissement de leurs phases au moyen du Zootrope en rend l'ana-

(1) Ce Zootrope avec figures en relief existe encore à la Station physiologique.

lyse beaucoup plus facile que sur l'animal lui-même.

Mais ce n'est pas seulement par leur trop grande vitesse que certains mouvements échappent à l'observation ; il en est que leur lenteur extrême rend inaccessibles à nos sens, tels sont l'accroissement des animaux et des plantes. Ces mouvements deviendraient nettement visibles si, en en prenant les phases à des intervalles un peu éloignés, on faisait repasser toutes ces images sous les yeux, en un temps très court, au moyen du Zootrope.

Le professeur Mach (de Vienne) trace à ce sujet le programme d'une curieuse expérience. Il imagine qu'on ait recueilli, à des intervalles de temps égaux et pendant une longue suite d'années, les portraits d'un individu, à partir de sa première enfance jusqu'à son extrême vieillesse, et qu'on dispose la série d'images ainsi obtenues dans le Phénakistoscope de Plateau. Pendant la durée de quelques secondes, cette série de changements, qui ont mis en réalité si longtemps à s'accomplir, passera sous les yeux de l'observateur ; et celui-ci verra, sous forme d'un mouvement étrange et merveilleux, se dérouler devant ses yeux toutes les phases d'une existence humaine.

Ainsi, la méthode imaginée par Plateau semble destinée à étendre beaucoup nos connaissances sur toutes sortes de phénomènes. Mais l'avenir de cette méthode est lié aux perfectionnements qu'elle recevra, d'une part en vue de corriger la déformation des images, d'autre part pour projeter devant un nombreux public les figures en mouvement, enfin pour accroître le nombre des images successives, de façon à représenter un acte d'assez longue durée.

Perfectionnements apportés par différents auteurs. —
 Pour projeter des images sans déformations, on a recouru à des objectifs multiples disposés en couronne et, au foyer de chacun d'eux, on a placé une image positive représentant une des phases du mouvement. Tous ces objectifs sont braqués sur un même point de l'écran, de telle sorte que, en éclairant successivement chacun des clichés disposés der-

rière eux, on projette successivement, en un même lieu, les attitudes correspondant aux diverses phases du mouvement représenté. Pour obtenir ces éclairements successifs des clichés, on a proposé de faire tourner la source lumineuse, une lampe de Drumont.

Les images projetées de cette façon doivent être parfaites. Mais la mise au point de chacune d'elles et le réglage de la direction des objectifs doivent être fort laborieux. En outre, le nombre des objectifs est nécessairement réduit à cinq ou six ; il s'ensuit que le mouvement, qui se reproduit périodiquement à chaque tour de la lampe, est forcément très court.

Praxinoscope de M. Raynaud. — Une disposition fort ingénieuse a été imaginée par M. Raynaud sous le nom de *Praxinoscope*. Les images sont disposées, comme dans le Zootrope ordinaire, à l'intérieur d'un cylindre ; puis elles sont réfléchies par un prisme de glaces placé au centre de l'appareil, et de là, renvoyées dans l'œil de l'observateur. L'appareil offre cette particularité, que la substitution d'une image à une autre se fait sans éclipse intermédiaire, de sorte que ces images paraissent extrêmement lumineuses, grâce à la continuité de leur éclairement.

En disposant un objectif photographique sur le trajet de ces images réfléchies, M. Raynaud les projette sur un écran, en les agrandissant aux dimensions désirées. Enfin, en substituant à la bande circulaire étalée dans le Praxinoscope une longue bande qui se déroule d'un cylindre pour s'enrouler sur un autre, l'auteur peut faire passer sous les yeux des spectateurs une scène d'assez longue durée.

Jusqu'ici, M. Raynaud ne s'est servi que d'images dessinées ou peintes à la main ; il n'est pas douteux qu'avec de longues séries d'images chronophotographiques il n'obtienne des effets remarquables.

Un léger défaut de cet appareil, c'est que le plan des images qu'il projette est, par le fait de la construction même, légèrement oblique par rapport à l'axe principal de l'objectif.

Il en résulte qu'on ne peut faire une mise au point exacte pour toutes les parties de l'image, ce qui enlève un peu de netteté aux projections.

Photophone de M. Demeny. — Une autre méthode a été employée par M. Demeny pour reproduire les mouve-

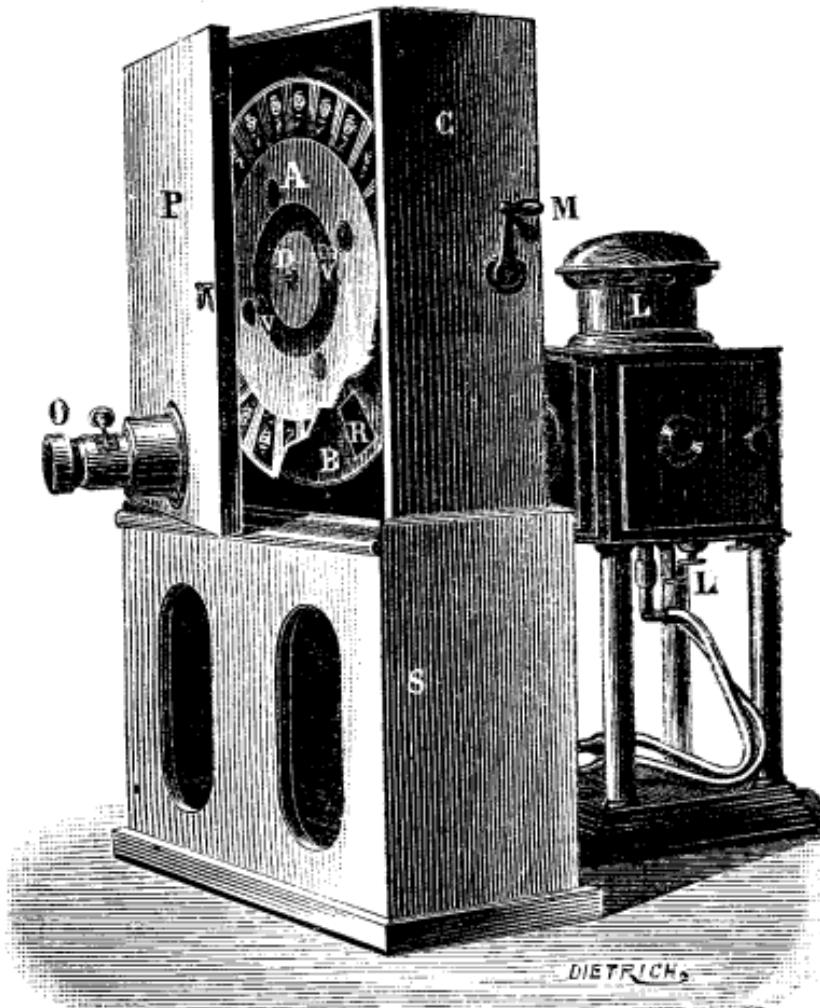


Fig. 214. — Photophone de M. Demeny.

ments du visage, de la langue et des lèvres qui accompagnent la parole. Notre préparateur à la Station physiologique recueillit, avec le Chronophotographe à bande pelliculaire, une série de vingt-quatre portraits d'un Homme qui prononçait certaines paroles. Puis, reportant cette série d'images sur la circonference d'un disque de verre, il plaça

ce disque au foyer d'un objectif photographique. Les images étaient fortement éclairées en arrière et des disques fenêtrés, analogues à ceux du Chronophotographe, laissaient voir successivement les images pendant des temps très courts. La brièveté des poses et la parfaite exécution de cet appareil font que les images, malgré la rotation du disque qui les porte, semblent immobiles et se montrent toutes exactement à la même place (1).

Quant à l'illusion que donnent ces photogrammes du parlant, elle est telle, que des sourds-muets habitués à lire sur le mouvement des lèvres ont su reconnaître les paroles qu'avait prononcées le sujet dont on leur montrait les images.

Il est douteux qu'on puisse atteindre un plus haut degré de perfection dans la construction d'un appareil zootropique. Les seuls défauts qu'on y puisse signaler, c'est que le nombre des images contenues sur la circonference du disque est nécessairement borné, à moins qu'on ne donne à l'appareil des dimensions énormes; en outre, la netteté des mouvements n'étant obtenue que grâce à la brièveté extrême des instants où chaque image est démasquée, il s'ensuit que la quantité de lumière émise est trop faible pour donner des projections agrandies bien claires, même avec une source lumineuse puissante.

Cette énumération des différents appareils employés pour la synthèse des mouvements est certainement incomplète; elle suffit cependant pour faire connaître les avantages et les inconvénients de chaque système, et pour guider ceux qui voudraient faire de nouveaux essais dans cette direction.

Des conditions que doit remplir un bon appareil. — Dans les appareils où chacune des images se déplace en tournant d'un mouvement continu, on ne peut faire paraître cette image immobile qu'à la condition de rendre la durée de l'éclairement si courte, que le déplacement pendant cette durée soit négligeable. Or, la brièveté de l'éclairement

(1) Cet instrument a été désigné par M. Demeny sous le nom de *Photophone* (*C. R. de l'Académie des Sciences*, 27 juillet 1891).

entraîne une perte considérable de lumière, et quand l'image est projetée en grandes dimensions, elle est peu visible.

Veut-on au contraire obtenir des projections très lumineuses, il faut que la durée des éclairements soit aussi longue que possible; mais alors, pendant cette durée, l'image placée au foyer de l'objectif doit être immobile. On conçoit qu'il est impossible d'obtenir avec des disques ou d'autres pièces massives tournant à grande vitesse de fréquentes alternatives de marche et d'arrêt; la solution qui s'impose est donc celle que nous avons adoptée pour le Chronophotographe.

Cet appareil, qui sert à l'analyse des mouvements, est réversible, en principe du moins, et pourrait servir à les recomposer. Supposons qu'une bande pelliculaire chargée d'images positives passe au foyer de l'objectif, et que cette bande soit fortement éclairée par derrière; les images seraient projetées, en grandeur réelle, sur un écran placé à la distance même où se trouvait l'objet dont on a photographié le mouvement. Chaque fois que les disques obturateurs ouvriraient l'objectif, une image apparaîtrait, et les contours de cette image seraient parfaitement nets, parce qu'à ce moment la pellicule serait immobilisée par le compresseur.

En pratique, toutefois, il vaut mieux donner à l'appareil qui fera la projection d'images en mouvement une disposition spéciale. Voici les raisons qui nous ont conduit à construire un nouvel instrument que nous appelons le *Projecteur chronophotographique*.

Du Projecteur chronophotographique. — Dans un appareil projecteur l'éclairage doit être le plus long possible et la plaque transparente qui porte les images doit être arrêtée pendant tout le temps où elle va se peindre sur l'écran : ce sont là, a-t-on vu, les conditions nécessaires pour avoir des images très lumineuses et bien nettes.

Dans l'appareil analyseur, au contraire, les temps de pose doivent être aussi courts que le permet l'éclairage de l'objet dont on prend les images. Pour l'aile d'un Insecte par

exemple, la pose doit être réduite à $1/25000$ de seconde. Or, avec un éclairage aussi court, une image projetée en grandes dimensions serait invisible, quelque puissante que soit la source lumineuse employée pour l'éclairer.

Le premier soin, dans la construction du Projecteur, sera donc de rendre aussi longue que possible l'ouverture de l'objectif. Si, par exemple, on donne 10 images par seconde, il faudra rendre l'image visible pendant la moitié ou le tiers de ce temps : c'est-à-dire pendant $1/20$ ou $1/30$ de seconde, au lieu de $1/1000$ qui est la durée habituelle du temps de pose pour l'appareil analyseur. A la place des petites fenêtres des disques obturateurs, il faudra de longues fentes occupant le tiers de leur circonférence. Pendant ce long éclairage la pellicule devra être arrêtée ; cela exige aussi une forme spéciale de la came du compresseur.

D'autre part, pour bien faire saisir la nature d'un mouvement, il est avantageux de le reproduire un certain nombre de fois. Cela s'obtient naturellement avec les appareils à disques tournants. Mais comme nous devons nous servir pour produire les images d'une bande pelliculaire, il faut que celle-ci soit refermée sur elle-même pour tourner sans fin et faire repasser continuellement la série des images au foyer de l'objectif. Une telle bande ne pourrait s'introduire dans le Chronophotographe.

Nous avons donc construit un instrument spécial dans lequel une pellicule sans fin, pouvant porter quarante ou soixante images positives et même davantage, passe continuellement au foyer de l'objectif et, vivement éclairée en arrière, soit par l'électricité, soit par la lumière solaire, projette ces images sur un écran. L'instrument donne des images très lumineuses, mais il est bruyant et les images projetées n'ont pas la fixité parfaite qui doit être obtenue.

Arrivé à ce point de nos recherches, nous avons appris que notre préparateur avait obtenu d'une autre façon une solution immédiate du problème, il nous a paru convenable de surseoir à de nouveaux essais.

TABLE DES MATIÈRES



CHAPITRE PREMIER DU TEMPS

Sa représentation graphique ; mesure du temps par la Photographie.

Représentation graphique du temps. — De la Chronographie ; principes de la méthode : transmission du mouvement au style qui en inscrit la durée. — Notation chronographique des appuis et levés des pieds du Cheval à différentes allures. — Notation du doigté d'un pianiste. — Applications de la Photographie à l'inscription du temps. — Mesure de la durée de l'éclairement produit par un obturateur photographique. — Mesure des intervalles de temps qui séparent des éclairements successifs

1

CHAPITRE II DE L'ESPACE

Sa mesure et sa représentation par la Photographie.

La Photographie tend à remplacer les dessins, les plans et les figures en relief. — Elle retrace les lieux de l'espace qu'un mobile a parcourus. — Trajectoire photographique des mouvements d'un point dans l'espace ; formes solides qu'elle engendre : cylindre, hyperboleïde, cône, etc. — Déplacements d'une courbe dans l'espace ; photographie des formes qu'elle engendre : sphère, ellipsoïde, etc. — Images stéréoscopiques des figures à trois dimensions. — Formes engendrées par le déplacement de corps solides ; effets de la lumière et des ombres.....

18

CHAPITRE III

LE MOUVEMENT

**Sa mesure, sa représentation graphique, son analyse
par la Chronophotographie.**

La connaissance d'un mouvement implique la double notion de l'espace du temps. — Représentation graphique d'un mouvement : graphique de la marche des trains sur les voies ferrées. — La courbe d'un mouvement prolongé doit être tracée par fragments successifs. — Inscription du mouvement par le mobile lui-même. — Amplification ou réduction proportionnelle du mouvement qu'on veut inscrire. — De l'Odographe. — Inscription photographique des mouvements : Photographie des mouvements de l'électromètre de Lippmann. — Détermination par la Chronophotographie du mouvement de la chute des corps. — Construction des courbes du mouvement d'après les images chronophotographiques : Courbe des espaces parcourus en fonction du temps; courbe des vitesses; courbe des accélérations.....

33

CHAPITRE IV

CHRONOPHOTOGRAPHIE SUR PLAQUE FIXE

Objet de la Chronophotographie ; principes de la méthode ; mesure des temps et des espaces. — Influence de la surface couverte par l'objet dont on prend l'image ; influence de la vitesse de son mouvement. — Chronophotographie géométrique. — Chronophotographie stéréoscopique. — Moyens d'augmenter le nombre des images sans en produire la confusion : images alternantes, dissociation des images sur la plaque photographique ; dissociation par déplacement de l'appareil ; dissociation par l'emploi d'un miroir tournant.....

54

CHAPITRE V

**DESCRIPTION ET EMPLOI DU CHRONOPHOTOGRAPHE
SUR PLAQUE FIXE**

Construction de l'appareil : châssis, objectif, disques obturateurs. — Établissement du champ obscur à la Station physiologique. — Champ obscur pour la Photographie dans l'eau. — Photographie d'objets brillants dans l'obscurité ou dans la lumière

TABLE DES MATIÈRES.

313

rouge. — Couleur des objets et manière de les éclairer. — Réglage et préparation du champ obscur. — Choix de l'objectif. — Mise au point, prise des images.....	67
---	----

CHAPITRE VI

**APPLICATIONS DE LA CHRONOPHOTOGRAPHIE A LA CINÉMATIQUE
ET A LA DYNAMIQUE**

Chute des corps dans l'air. — Expériences de balistique. — Résistance de l'air aux surfaces diversement inclinées. — Applications de la Chronophotographie à l'hydrodynamique : veines fluides; changement du profil du liquide dans les ondes. — Mouvements intérieurs du liquide dans les ondes. — Courants et remous. — Influence de la forme des corps immergés dans les courants. — Oscillations et vibrations. — Roulis des navires. — Vibrations des ponts métalliques.....	82
--	----

CHAPITRE VII

CHRONOPHOTOGRAPHIE SUR PLAQUE MOBILE**Principes et historique de la méthode.**

Revolver astronomique de Janssen. — Expériences de Muybridge; champ lumineux; appareils photographiques disposés en série; déclenchement électrique des obturateurs. — Fusil photographique; disposition intérieure de l'instrument; manière de changer les plaques sensibles. — Principes de la Chronophotographie sur plaque mobile. — Emploi du Chronophotographe. — Nécessité des arrêts de la pellicule au moment de chaque pose. — Choix de l'instant où l'on veut prendre les images. — Forme et dimension des images. — Réglage du nombre et de la dimension des images. — Reproduction, agrandissement et réduction des images chronophotographiques.....	101
--	-----

CHAPITRE VIII

MOUVEMENTS DE L'HOMME — CINÉMATIQUE

Des mouvements de l'Homme; leur étude par la Méthode graphique. — Vitesse des allures de l'Homme; rapports de la fréquence à la longueur des pas. — Durée des appuis et levés du pied dans la marche et dans la course. — Trajectoire d'un point du corps	
---	--

à une allure quelconque; son inscription mécanique. — Mouvements de l'Homme étudiés par la Chronophotographie sur plaque fixe; saut en longueur, saut à la perche; Chronophotographie du saut en longueur. — Mouvements professionnels; escrime, etc. — Saut en profondeur. — Oscillations de la jambe dans la marche.	124
--	-----

CHAPITRE IX

MOUVEMENTS DE L'HOMME — DYNAMIQUE

Objet de la dynamique. — Mesure des forces qui agissent dans la locomotion de l'Homme. — Dynamographe de traction. — Dynamographe exprimant les valeurs de la pression des pieds sur le sol. — Combinaison de l'emploi du Dynamographe avec l'inscription mécanique des mouvements. — Les lois la balistique se retrouvent dans le mécanisme du saut. — Combinaison de l'emploi du Dynamographe avec la Chronophotographie. — Mesure du travail accompli dans le saut, d'après les chronophotogrammes géométriques. — Du travail mécanique effectué dans la locomotion de l'Homme : travail suivant la verticale; travail suivant l'horizontale; travail dépensé pour le déplacement de chacun des membres inférieurs pendant sa suspension. — Valeurs relatives du travail dépensé à diverses allures. — Applications pratiques.....	142
---	-----

CHAPITRE X

LOCOMOTION DE L'HOMME AU POINT DE VUE ARTISTIQUE

Influence de la Photographie sur l'Art. — Caractères différents des œuvres anciennes et des œuvres modernes. — La Photographie saisit la vérité des attitudes. — Importance de la correction des reliefs musculaires dans la représentation des différents actes.— Images prises de différents points de vue: photogrammes pris d'en haut. — Recherche des attitudes les plus visibles dans un mouvement. — Importance des séries d'images pour choisir les attitudes les plus expressives de l'acte qu'on veut représenter. — Analyse des expressions du visage. — Choix du procédé pour recueillir des documents artistiques.....	165
---	-----

CHAPITRE XI

LOCOMOTION DES QUADRUPÈDES

La Chronophotographie montre la succession des appuis et levés du pied du Cheval aux différentes allures. — Transition ou pas-

sage d'une allure à une autre. — Représentation des attitudes du Cheval à toutes les allures, d'après la Chronographie et les pistes. — Comparaison des figures dessinées d'après ces documents avec celles que donne la Photographie instantanée. — Application de la Chronophotographie à la représentation du Cheval en mouvement. — Représentation artistique du Cheval dans l'antiquité. — Locomotion du Cheval au point de vue de la physiologie des mouvements. — Chronophotographie géométrique des mouvements d'ensemble; mouvements partiels du pied et du boulet.....	183
--	-----

CHAPITRE XII

LOCOMOTION DANS L'EAU

Des différents types de la locomotion dans l'eau. — Manière de prendre les images des animaux aquatiques : Méduse ; Comatule. — Locomotion par ondulations latérales : Anguille. — Disposition qui se prête à l'étude du mouvement. — Locomotion par ondulations verticales : Raie. — Disposition propre à étudier les ondulations verticales sous différents aspects; ondes de la Raie vues de côté; ondes de la Raie vues de face. — Hippocampe ; Tortues d'eau. — Mouvements lents des Astéries. — Locomotion des petits animaux marins.....	208
---	-----

CHAPITRE XIII

LOCOMOTION DANS L'AIR

Vol des Oiseaux

Théorie de Borelli sur le mécanisme du vol des Oiseaux. — Chronographie appliquée à la détermination de la fréquence des coups d'aile et des durées relatives de l'élévation et de l'abaissement. — Myographie : inscription des phases de la contraction et du relâchement des muscles moteurs de l'aile. — Inscription de la trajectoire de l'humérus de l'Oiseau et des changements d'inclinaison de la surface de l'aile. — Photographie de la trajectoire de la pointe de l'aile. — Chronophotographie montrant les attitudes successives de l'Oiseau aux différentes phases d'un coup d'aile. — Images de l'Oiseau pris sous différents aspects. — Chronophotographies simultanées	222
--	-----

CHAPITRE XIV
LOCOMOTION DANS L'AIR
Vol des Insectes

Fréquence des coups d'aile des Insectes évaluée d'après le son que produit leur vol. — Inscription mécanique des coups d'aile; leur fréquence chez les différentes espèces. — Synchronisme de l'action des ailes; changement d'inclinaison de leur surface. — Trajectoire de l'aile d'un Insecte; son interprétation. — Expérience qui démontre le sens dans lequel se fait le parcours de l'aile et ses changements de plans. — Insecte artificiel; théorie du vol des Insectes. — Application de la Photographie à l'étude du vol des Insectes; expériences de Lendenfels. — Trajectoire de l'aile pendant la translation de l'animal. — Photographie sur pellicule mobile: disposition de l'expérience; types divers d'Insectes au vol : Abeilles, Mouches, Tipules. — Confirmation de la théorie mécanique du vol.....	236
--	-----

CHAPITRE XV
LOCOMOTION COMPARÉE

Locomotion comparée chez différents Mammifères terrestres : Homme, Cheval, Éléphant. — Locomotion comparée chez les différents Oiseaux. — Classement des différents types de locomotion. — Locomotion comparée des Tortues et des Lézards. — Grenouilles, Crapauds et Têtards. — Serpents, Anguilles et Poissons. — Insectes et Arachnides.....	254
---	-----

CHAPITRE XVI
APPLICATIONS DE LA CHRONOPHOTOGRAPHIE
à la physiologie expérimentale

Multiplicité des applications de la Chronophotographie; elle complète les renseignements donnés par la Méthode graphique. — Étude des mouvements du cœur par la Méthode graphique. — Photographie des phases successives de l'action d'un cœur de Tortue soumis à la circulation artificielle. — Changements de forme et de capacité des oreillettes et des ventricules pendant une révolution du cœur. — Mécanisme de la pulsation du cœur étudié par la Chronophotographie. — Valeurs comparées de l'ins-	
---	--

TABLE DES MATIÈRES.

317

cription mécanique et de la Chronophotographie. — Déterminations de centres de mouvements articulaires.....	269
---	-----

CHAPITRE XVII

CHRONOPHOTOGRAPHIE MICROSCOPIQUE

Variété des mouvements qui s'observent dans le champ du Microscope. — Application de la Chronophotographie à l'étude de ces mouvements; difficultés du sujet. — Disposition spéciale de l'appareil pour la Chronophotographie sur plaque fixe et sur pellicule mobile. — Rétraction du style des Vorticelles. — Mouvements du sang dans les vaisseaux capillaires. — Mouvement des Zoospores dans les cellules d'une Conferve. — Chronophotographie pratiquée avec le Microscope solaire. — Facilité de l'application de cette méthode.....	284
---	-----

CHAPITRE XVIII

SYNTHÈSE DES MOUVEMENTS ANALYSÉS**PAR LA CHRONOGRAPHIE**

Méthode de Plateau; son Phénakistiscope. — Zootrope; ses applications à l'étude des allures du Cheval et des relations qu'elles ont entre elles. — Application des Photographies instantanées au Zootrope : Muybridge, Anschütz. — Applications scientifiques de la méthode de Plateau. — Perfectionnements apportés par différents auteurs. — Praxinoscope de M. Raynaud. — Photophone de M. Demeny. — Conditions que doit remplir un bon appareil. — Essai de construction d'un projecteur Chronophotographique.....	298
--	-----

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

TABLE DES GRAVURES

A

	N ^o s des fig.
Abeille volant.....	188
Appareil pour la transmission et l'inscription des signaux.....	1
— chronophotographique.....	38-47
— pour la Chronophotographie microscopique.....	210
— pour photographier les Insectes au vol (disposition théorique).....	185
— pour photographier les insectes au vol (disposition réelle).....	186
— pour démontrer le mécanisme de la pulsation du cœur.....	209
— contentif de la Raie.....	161
Anguille nageant.....	199
— mesure du mouvement de ses ondes.....	160
Aquarium marin.....	156
Araignée : sa locomotion.....	203
Astérie : ses mouvements.....	164

B

Bateau à rames : 15 images par seconde.....	Pl.II
Batraciens (locomotion des).....	197
Bobine avec sa bande pelliculaire.....	87
Bobines du Chronophotographe.....	86
— avec enroulement de la bande.....	88
Boxeur dans deux attitudes	42
Bras ; ses reliefs musculaires dans l'extension.....	120
— dans la flexion.....	119
— dans un mouvement alternatif.....	121
— dans l'extension complète.....	122

C

Cadran chronométrique pour mesurer les durées d'éclairement... ..	10
— — — pour mesurer les intervalles entre les éclairements.....	11

	Nos des fig.
Canard au vol.....	170
Chambre aux images.....	84
— à lumière rouge.....	53
Champ d'expériences de Muybridge.....	76
— obscur de la Station physiologique.....	51
— — pour trois séries d'images sous des aspects différents.....	175
— — pour la locomotion dans l'eau.....	52
Châssis à verre dépoli.....	49
— négatif.....	50
Cheval muni des appareils chronographiques.....	6
— ses pistes.....	133
— notation des allures (Voy. <i>Notation</i>).....	134
— au pas, dessiné d'après la notation.....	134
— préparé pour la Chronophotographie sur plaque fixe.....	151
— chronophotographié sur plaque fixe; galop.....	40
— épure des mouvements d'ensemble.....	152
— — des mouvements des pieds.....	153
— — — du boulet.....	154
— — — du membre postérieur.....	192
— chronophotographié sur plaque mobile; au pas.....	137
— — — images agrandies.....	138-139
— — — au petit galop.....	140
— — — changement de main au galop.....	142
— — — passage du galop au trot.....	141
— — — représentation artistique: amble.....	143-144
— — — pas.....	145-146-147
— — — trot.....	148-149
— — — galop.....	150
Chien de mer (natation du).....	200
Chronophotographe sur plaque fixe.....	38
— sur plaque mobile.....	47
— détails intérieurs.....	84
Chronophotographie géométrique.....	44
Chronophotographiques (épures) (Voy. ce mot).	
Chronophotogrammes de la course et du saut, etc. (Voy. ces mots).	
Chute des corps.....	35-36
Circulation artificielle du cœur.....	206
— série d'images.....	207
— capillaire.....	Pl.III
Cœur, graphique de ses mouvements.....	205
— avec circulation artificielle.....	206

TABLE DES GRAVURES.

321

	N ^o s des fig.
Cœur (aspects successifs dans une révolution du).....	208
— mécanisme de sa pulsation.....	209
Couleuvre (locomotion de la).....	198
Coup d'épée	125
— de poing.....	42
— de bâton.....	Pl.I
Courant qui rencontre un plan incliné	68
— — — un parallélépipède rectangle.....	69
— — — un corps pisciforme.....	70-71
— — — franchissant un obstacle.....	72
Courbés des pressions des pieds.....	107
— myographiques de l'Oiseau.....	167
— dynamiques de la locomotion (Voy. <i>Graphique</i>). .	
Coureur chronophotographié sur plaque fixe.....	118
— — — pris d'un lieu élevé.....	123
Coléoptère : sa marche.....	201
Crevette : ses mouvements.....	165

D

Danse grecque, série d'images.....	126
— — — mouvement des draperies	712
Durée d'un éclairement : sa mesure.....	10-26
Dynamographe de traction.....	104
— de pression, plate-forme.....	105
Dynamographiques courbes.....	107

E

Électromètre (photographie de l').....	77
Épure géométrique de la marche de l'Homme.....	111
— — — de la course.....	44
— — — du saut en longueur.....	89
— — — — en hauteur.....	110
— — — — en profondeur.....	100-101
— — — des mouvements de la jambe, dans la marche.....	191
— — — dans la course.....	102
— — — des mouvements de claudication	54
— — — du Cheval au pas.....	152
— — — du pied antérieur droit.....	154
— — — du pied postérieur droit.....	153
— — — du boulet	155
— — — du membre postérieur de l'Eléphant.....	193

MABEY. — Le Mouvement.

24

	N ^o des fig.
Épure de la chute des corps.....	36
Escrime à l'épée	99
— au sabre	90
Explorateur (appareil) des appuis du pied de l'Homme.....	2
— — — du Cheval.....	5

F

Fenêtre d'admission.....	82
Fusil photographique.....	78
— — détails extérieurs.....	79
— — détails intérieurs.....	80
— — sa boîte à plaques.....	81
— — (un cliché positif du).....	82
— — une épreuve agrandie.....	83

G

Gecko ; sa locomotion.....	196
Géométrique (Chronophotographie) (Voy. <i>Épures</i>).	
Géométriques figures.....	102-108-111
— cylindre	14
— hyperboloidé.....	15
— hyperboloidé et son cône asymptote.....	16
— conoïde.....	17
— sphère.....	18
— — avec lumière et ombre.....	21
— — forme paradoxale.....	23
— figures stéréoscopiques.....	19-20
— sphère engendrée par un fil fin.....	19
— — — par une surface blanche.....	22
— — — par un fil brillant.....	23
— — hyperboloidé.....	20
Goéland au vol vu de côté.....	169
— — vu de face.....	172
— — sous trois aspects simultanément.....	176
Graphiques du pouls.....	28
— des mouvements du cœur.....	205
— d'un mouvement uniforme.....	25
— discontinus d'un mouvement très prolongé.....	27
Graphique de la marche des trains de chemin de fer (méthode d'Ibry).	26
— de l'Odographe fixe.....	93
— de l'Odographe appliqué à un train express.....	33

TABLE DES GRAVURES.

323

N^o
des fig.

Graphique des vitesses de la marche et des longueurs du pas....	94
— des oscillations de la tête et des longueurs du pas....	113
— des éléments du travail à diverses allures.....	114
— des pressions sur le sol et des hauteurs du saut.....	107

H

Homme vêtu de noir avec des lignes brillantes pour la Chrono-photographie géométrique.....	43
Homme courant, Chronophotogramme sur plaque fixe.....	41
— marchant.....	117
— sautant.....	96
— saut à la perche.....	97
— épures (Voy. ce mot).	
— assis s'étendant sur le sol.....	Pl.I 171
Héron aigrette au vol.....	171

I

Images alternantes sur plaque fixe.....	45
— nettes et floues suivant que la pellicule s'arrête ou non à chaque pose.....	89
Inscription simultanée de l'appui des pieds et des mouvements de la jambe dans la marche.....	108-109
Inscription simultanée de la pression des pieds et des mouvements de la tête dans le saut.....	186
Inscriptions chronographiques (Voy. <i>Notation</i>).	
— des battements des ailes du Bourdon	117
— — — du Macroglosse.....	178
— des muscles des Oiseaux.....	166
Insecte volant en manège.....	183
— espèces diverses (Voir leurs noms).	

L

Lézard (Locomotion du).....	195
Locomotion comparée (Voy. au nom de chacune des espèces).	

M

Marcheur conduisant l'Odographe.....	30
— muni d'appareils chronographiques.....	3
— chronophotographié sur plaque fixe.....	38

	N ^o s des fig.
Marcheur chrouophotographié sur plaque mobile.....	47
Méduse (mouvements de l'ombrelle de la).....	157
Microphotographique (appareil).....	219
Miroir tournant pour dissocier les images.....	46
Mouche courant et volant.....	187
Mulet au pas.....	147bis
Muscles des Oiseaux (inscription des).....	166

N

Natation de l'Anguille.....	160
— de la Comatule.....	159
— de l'Hippocampe	163
— de la Méduse.....	157-158
— de la Raie vue de côté.....	162
— — — vue de face.....	162 bis
Notation chronologique.....	1
— chronographique des allures de l'Homme.....	4
— — — du Cheval.....	7-8-128
— du doigté d'un pianiste.....	9

O

Objectif du Chronophotographe.....	48
Ocydromes (leurs attitudes).....	115
Odographe fixe.....	92
— conduit par un marcheur.....	30
— vu d'avant.....	31
— vu d'arrière.....	32
Oiseau, courbes myographiques.....	166
— trajectoire de l'humérus.....	168
— photographié de côté.....	169-170-171
— — — de face.....	172
— — — d'en haut.....	173
— — — sous trois aspects.....	176
— dans le Phénakisticope.....	212
— en relief dans le Zootrope.....	213
— 60 attitudes par seconde.....	174
Onde de clapotis.....	61
— chronophotographiée.....	62
— clapotis, période courte.....	63
— avec translation.....	64
— clapotis, mouvements intérieurs.....	66

TABLE DES GRAVURES.

325

	No ^e des fig.
Onde clapotis à courte période.....	66
— avec translation; mouvements intérieurs.....	67
— franchissant un obstacle.....	72
Orthoptère (sa locomotion).....	202
Oscillation d'un pendule articulé.....	73
— de la tête dans la marche.....	112
— de la jambe dans la course.....	102

P

Pendule articulé oscillant.....	73
Perspective des variations avec la distance.....	55
Pigeon vu d'en haut.....	173
— 60 images par seconde.....	174
Pistes du Cheval.....	133
Plateforme dynamographique.....	105
— (homme monté sur la).....	106
Phénakisticope.....	212
Photogramme de Janssen.....	75
Photophone de Demeny.....	214
Pulsion du cœur (mécanisme de la).....	209

R

Réduction d'un mouvement par un fil de caoutchouc.....	29
--	----

S

Saut en longueur.....	96
— à la perche.....	97
Scorpion (sa locomotion).....	204
Spirale dynamographique.....	103
Statuette d'après la Chronophotographie.....	124
Stéréoscopiques figures (Voy. <i>Figures</i>).	

T

Tableau comparatif des attitudes de l'Oiseau vu sous trois aspects différents.....	175
Tableau comparatif des attitudes du Cheval dessiné d'après la notation chronographique.....	135
Tableau comparatif d'après les photogrammes de Muybridge.....	136
Tipule au repos et au vol.....	189
— attitudes de l'aile.....	190

TABLE DES GRAVURES.

	N ^o des fig.
Tortue nageant.....	194
Tracé des battements des ailes du Bourdon.....	177
— du Macroglosse.....	178
— dynamographique dans le saut.....	109
— dans la marche	179
Trajectoire simple et chronophotographique d'un mobile.....	37
— d'un bâton qui tournoie.....	57
— de sphères conjuguées.....	58
— d'un appareil planeur.....	60
Trajectoire stéréoscopique d'un point du corps dans la course...	13
— en relief.....	95
— de l'aile d'une Corneille.....	12
— de l'humérus d'une Buse	168
— de l'aile d'un Insecte, d'après Marey.....	181
— — d'après Pettigren.....	180
— sens du mouvement.....	182
— (photographie de la) d'une aile de Libellule.....	184
— d'un projectile rapporté à deux axes.....	59
Transitions ou passages dans les allures du Cheval.....	129-132
— du pas au trot.....	129
— du trot au pas.....	130
— du trot au galop.....	131
— du galop au trot.....	132

V

Vague (images successives d'une).....	91
Vibrations d'une verge élastique.....	74
Vol des Insectes ; appareils pour la Photographie, disposition théorique.....	185
Vol des insectes ; appareils pour la photographie, disposition réelle. 186	186
— types divers du vol.....	187-190
Vorticelles (photographie des).....	211

Z

Zoospores ; leurs mouvements.....	Pl. III
Zootrope à figures en relief.....	213

FIN DE LA TABLE DES GRAVURES.

TABLE ANALYTIQUE

DES MATIÈRES CONTENUES DANS CE VOLUME.

A

Ailes des Oiseaux ; fréquence des battements.....	225
— durée des élévations et des abaissements.....	223
— trajectoire de la pointe.....	226
— attitudes photographiées.....	229
Aile des Insectes ; fréquence des battements.....	249
— (trajectoire de l').....	239
— changements d'inclinaison.....	240
— synchronisme des deux.....	238
— sens de leur mouvement.....	242
— leur aspect dans le vol.....	242
Aires d'impulsion dans le saut.....	148-169
Allures de l'Homme.....	6-168
— du Cheval (photographie du).....	196
— — (chronographie des).....	10-185
Anguille (locomotion de l').....	213-264
Arrêt de la pellicule dans le chronophotographe.....	118
Arachnides (locomotion des).....	266
Astéries (mouvements des).....	229
Attitudes particulièrement visibles.....	173

B

Balistique étudiée par la Chronophotographie	85
Batraciens (locomotion des).....	262
Bobines du Chronophotographe.....	116

C

Cadence, ses relations avec la longueur du pas.....	164
Caractère expressif des actions musculaires.....	170

TABLE ANALYTIQUE.

Caractère expressif des formes du Cheval.....	195
— des mouvements du visage.....	175
Centres de mouvements articulaires.....	283
Champ obscur de la Station physiologique.....	71
— préparation et réglage.....	79
— pour la photographie dans l'eau.....	74
Chemins de fer (graphique des).....	37
Cheval ; notation chronographique.....	185
— (chronographie du).....	191
— empreintes ou pistes.....	187
— transition des allures.....	184
— épure des mouvements.....	286
— sa représentation artistique.....	191
— (mouvements des pieds du).....	207
— (physiologie des mouvements du).....	199
Chronologie graphique.....	2
Chronographie.....	3
Chronographique (notation).....	6
Chronophotographie sur plaque fixe.....	54
— géométrique	60
— stéréoscopique.....	61
— dans la lumière rouge.....	76
— dans l'obscurité.....	76
— en projection horizontale.....	171
— sur plaque mobile.....	102
— méthode de Janssen.....	102
— — de Muybridge....	104
— — de Marey.....	54-104
— applications aux arts.....	164
— à l'Hydrodynamique.....	89
— à la locomotion dans l'eau.....	202
— à la Mécanique.....	83
— à la Pathologie.....	77
— à la Physiologie expérimentale..	270
— à la Physiologie comparée.....	256
— aux phénomènes microscopiques.	285
— au vol des Insectes.....	246
— — au vol des Oiseaux.....	288
Circulation artificielle.....	274
— capillaire	292
Clapotis.....	91
Cœur étudié par la Chronographie.....	270
— — par la Chronophotographie,.....	271
— mécanisme de sa pulsation.....	280

TABLE ANALYTIQUE. 329

Comatule (locomotion de la).....	212
Couleuvre (locomotion de la).....	263
Courants et remous.....	95
Courbes myographiques des Oiseaux.....	224
— des vitesses et longueurs de pas.....	128
— des éléments du travail aux différentes allures de l'Homme.	161
— des relations de la fréquence du pas avec les oscillations	
de la tête.....	160
du Dynamographe.....	148
Course (représentation artistique de la).....	166
— (éléments du travail dans la).....	157
Crevette (mouvements de la).....	221
Cylindre; sa génération chronophotographique.....	25

D

Dissociation des images dans la Chronophotographie sur plaque	
fixe.....	63
Documents artistiques.....	181
Draperies (mouvements des).....	179
Durée des éclairements en Chronophotographie.....	14-247
Dynamique ; mouvements de l'Homme.....	141
Dynamographe.....	142
— de pression.....	144
— combiné avec la Chronophotographie.....	149
Dynamographique spirale.....	143
— plate-forme.....	145
— tracé	148

E

Éclairage des objets en mouvement pour la Chronophotographie.	78
— dans le champ du Microscope.....	287
Électromètre de Lippmann : Photographie de ses indications....	48
Empreintes du Cheval, pistes.....	187
Épure de la marche.....	153
— de la course.....	61
— du saut en hauteur.....	151
— du saut en longueur.....	136
— des mouvements du pied du Cheval.....	207
— du pas du Cheval.....	206
— des membres postérieurs chez divers animaux.....	267
Escrime à l'épée.....	137
— au sabre.....	120
Espace; sa mesure.....	18

Explorateur des appuis du pied de l'Homme.....	6
— du Cheval.....	8
— des muscles de l'Oiseau.....	224
Expressions du visage (photographie des).....	175

F

Figures géométriques en relief	29
— paradoxales.....	29
Forces (inscription des).....	142
Formes des muscles en action.....	168
— du Cheval ; leur représentation.....	195
Fréquence des coups d'aile de l'Oiseau.....	225
— — — de l'Insecte.....	238
— — — des éclairements en Chronophotographie.....	16

G

Gecko ; sa locomotion.....	260
Graphiques des battements du pouls.....	41
— de la marche des trains.....	37
— des mouvements du cœur.....	270
— de l'Odographie.....	47
— des pressions du pied sur le sol dans la marche.....	149
— — — — — dans le saut.....	148

H

Hippocampe ; sa natation.....	218
Homme ; son mouvement cinématique.....	123
— (locomotion de l').....	165
— vitesse de ses allures.....	125
— sa représentation artistique.....	165
— travail dépensé à différentes allures.....	152
Hydrodynamique étudiée par la Chronophotographie.....	90

I

Images chronophotographiques sur plaque fixe.....	53
— leur dissociation.....	63
— leur agrandissement.....	123
— leur forme et dimension.....	121
— leur reproduction typographique..	123
— prises suivant les trois dimensions	
simultanément	23
Images chronophotographiques prises d'en haut.....	232

TABLE ANALYTIQUE. 331

Images chronophotographiques stéréoscopiques.....	27
Inscription mécanique des mouvements.....	146
— de la marche.....	130
— de la trajectoire de l'aile d'un Oiseau.....	226
— du coup d'aile d'un Insecte.....	237
— des forces.....	142
Insectes (théorie du vol des).....	243
— photographie du vol.....	244
— (inscription mécanique du vol des).....	237
— (locomotion des).....	267
Intervalle entre les images chronophotographiques.....	16

L

Lézards ; leur locomotion.....	260
Locomotion (types divers de).....	259
— comparée des Mammifères.....	255
— — des Oiseaux.....	257
— — des Poissons.....	263
— — des Articulés.....	266
— — des Reptiles.....	259
— de l'Homme cinématique.....	124
— — dynamique.....	142
— — artistique.....	164
— dans l'eau.....	208
— dans l'air ; Oiseaux.....	222
— — Insectes.....	267
— du Cheval.....	182

M

Mach ; son programme de synthèse des mouvements.....	305
Marche de l'Homme analysée par la Chronophotographie.....	165
— représentation artistique.....	165
— (travail dans la).....	152
Mammifères (locomotion comparée des).....	254
Mécanique étudiée par la Photographie.....	83
Méduse (natation de la).....	210
Microscopique (Chronophotographie).....	293
— — par le microscope solaire.....	294
Mise au point du Chronophotographe.....	81
Mouvement d'un corps qui tombe.....	56
— des draperies.....	179
— des liquides.....	93
— (amplification et réduction du).....	40

Mouvements (inscription mécanique des).....	35-145
— (chronophotographie des).....	32
— (épure des).....	205
— du cœur (graphique des).....	273
— — (chronophotographie des).....	274
— — (synthèse des).....	297
Muscles; leurs reliefs.....	170
— inscription de leur action.....	226
Muybridge; sa méthode.....	226
— son Zootrope	304
Myographie sur l'Oiseau qui vole.....	226

N

Natation de l'Anguille.....	213
— des Batraciens.....	262
— de la Comatule.....	212
— de l'Hippocampe.....	218
— de la Méduse.....	210
— de la Raie.....	215
Notation chronographique.....	6
— — des appuis des pieds de l'Homme.....	7
— — — du Cheval.....	8
— — des diverses allures.....	10
— — du doigté d'un pianiste.....	11

O

Obturateur d'avant.....	82
Odographe.....	42
— ses courbes.....	47
— fixe.....	126
— — allures de l'Homme.....	127
Oiseaux; leur vol étudié par l'inscription mécanique.....	224
— avec le fusil photographique.....	311
— par la Chronophotographie.....	227
— images simultanées.....	234
— (locomotion comparée des).....	257
— types divers	227-230
Ondes liquides.	91
Ondulations de l'Anguille.....	215-365
— de la Raie	216
— des Serpents.....	263
Oscillations des verges vibrantes.....	98

P

Pas de l'Homme; rapport de la longueur à la fréquence.....	127
— de la longueur à la vitesse de l'allure.....	129
Phénakistoscope	298
Photographie des trajectoires.....	19
— de l'électromètre de Lippmann.....	48
— sur champ obscur.....	20
— des Oiseaux.....	228
— des Insectes.....	244
— des Animaux aquatiques, prise d'en haut.....	306
Physiologie (application de la Chronophotographie à la).....	269
Pendule articulé	99
Pigeon ; images vues d'en haut.....	232
Plate-forme dynamographique.....	145
Perspective suivant la distance.....	79
— ses changements pour des objectifs multiples.....	112
Poissons (locomotion des)	264
Praxinoscope	307
Projecteur chronophotographique.....	309
Pulsion du cœur.....	280

Q

Quadrupèdes (locomotion des).....	183
-----------------------------------	-----

R

Raie (natation de la).....	215
— (moyens de contention de la).....	215
Rapport des oscillations verticales à la longueur des pas.....	159
Reliefs musculaires ; leur photographie.....	170
Représentation du Cheval.....	199
Résistance de l'air.....	87
Roulis des navires.....	100

S

Saut en hauteur	150
— en longueur.....	138
— en profondeur.....	138
— à la perche.....	134
— (travail dans le).....	150
Scorpion ; sa locomotion.....	269
Sculpture d'après la Chronophotographie.....	172

Serpents (locomotion des).....	264
Sphère ; photographie de sa génération.....	27
Stéréoscopiques images.....	28
Stroboscopie.....	297
Stylographie ; transmission des signaux.....	4
Synthèse des mouvements.....	297

T

Temps ; sa représentation graphique.....	1
— son inscription mécanique.....	4
— sa mesure photographique.....	14
Tonalité du son de l'aile des Insectes.....	236
Tortue ; sa locomotion.....	260
Tracé (Voy. <i>Graphique et Courbe</i>).	
Trajectoire photographiée.....	20
— — d'un appareil planeur.....	88
— — de l'aile d'un Insecte.....	239
— — d'un bâton lancé.....	85
— — de l'extrémité de l'aile d'une Corneille..	21
— — d'un point du corps de l'Homme à une allure quelconque.....	131
Trajectoire photographiée de sphères conjuguées.....	85
— — rapportée à deux coordonnées rectangu- aires.....	87
Trajectoire stéréoscopique.....	22
Transitions entre les allures du Cheval.....	184
Transmission d'un mouvement à un style.....	4
Travail dans la locomotion de l'Homme.....	152
— ses différents facteurs.....	154-156
— comparé à différentes allures.....	158
— application à la marche des troupes.....	163
— dans le saut en hauteur.....	150
Types divers de locomotion.....	259

V

Vibrations des ponts métalliques.....	101
— des tiges flexibles.....	99
Vol des Insectes.....	236
— fréquence des coups d'aile.....	238
— changements d'inclinaison de l'aile.....	239
— (théorie du).....	242
— appareils pour le photographier.....	246
Vol des Oiseaux.....	222

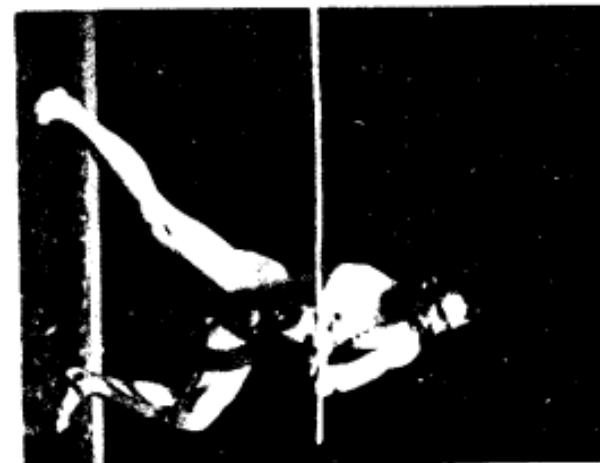
Z

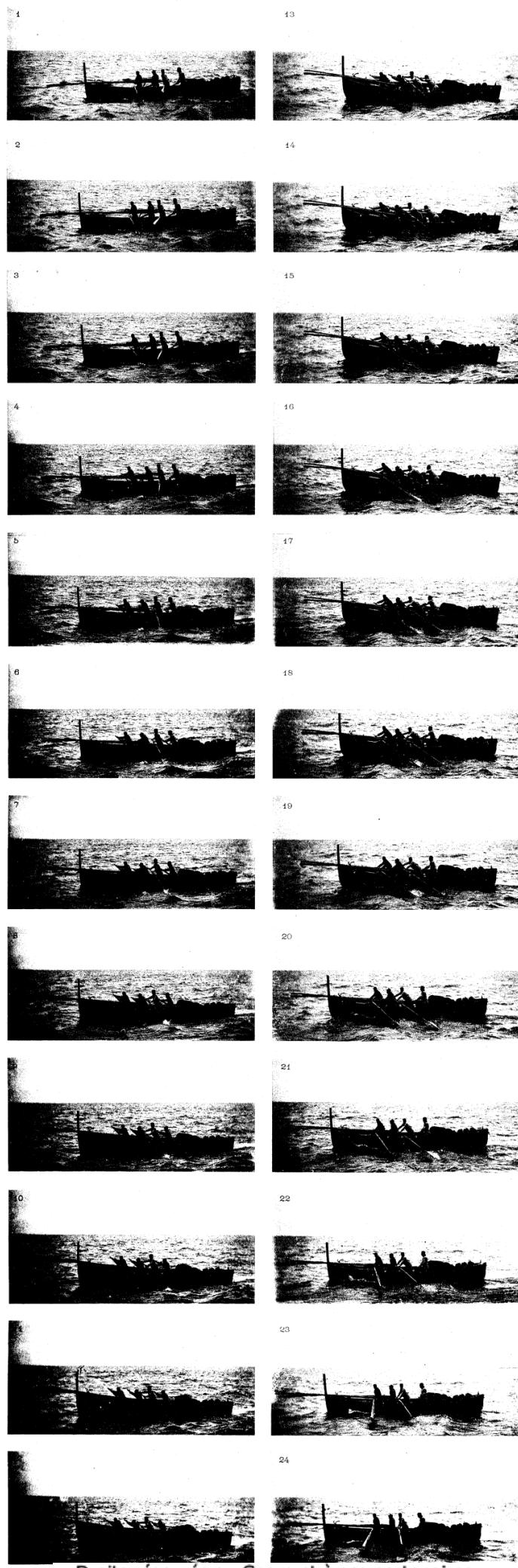
Zoospores ; leurs mouvements.....	293
Zootrope.....	300
— ses applications à l'analyse des allures du Cheval.....	301
— combiné à l'emploi de la Photographie instantanée.....	303
— de Muybridge.....	304
— de Zecky.....	303
— d'Anschütz.....	304
— appliqué à la Chronophotographie.....	292
— à figures en relief.....	203-299
— (perfectionnements du).....	306

FIN DE LA TABLE ANALYTIQUE.



Escrime au bâton.







Mouvements des Zoospores dans les cellules d'une Conferve.



Mouvements des globules rouges et des globules blancs du sang dans un vaisseau capillaire du mésentère d'un Triton.