

Bibliothèque numérique

medic@

**Marey, Etienne-Jules. - Marey / 1886 /
Station / physiologique / Méthodes et
appareils**

Paris, 1886 (circa).

Cote : Archives du Collège de France



Nous remercions le Collège de France, qui nous a généreusement autorisé à numériser et à mettre en ligne cet ouvrage issu de son fonds. Pour toute demande de reproduction, s'adresser au Collège de France, seul titulaire des droits.

Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/bist>

Étude des phénomènes mécaniques

Chez les êtres animés.

Méthodes de recherche inaugurées à la Station Physiologique

Fondée en 1882 et rattachée au Collège de France.

(Laboratoire de M. Marey)

COLLÈGE DE FRANCE

INSTITUT MAREY

N° 162

ACADEMIE DES SCIENCES

Projet des installations pour l'étude de l'écoulement du sang
dans le 25 juin 1886

Station Physiologique

Employé de 1882-1886, installées pour étudier la locomotion
de l'homme et des animaux;

Par M. MAREY

Bâtiments

et

Installations extérieures

Lorsqu'on prend sur la même plaque une série de photographies successives d'un mouvement, dans lequel la translation de l'objet n'est pas rapide, la fréquence des images est limitée par leur superposition et par la confusion qui en résulte. Chez un homme qui court, avec une vitesse modérée, pour être photographié dix fois par seconde, les images se confondent. Si, par suite, une jambe vient se poser sur la plaque ou une autre jambe vient s'appuyer sur son empressement, cette action n'altère point les images. Les mêmes mouvements se produisent aux endroits où la plaque a été mise. Son empressement, de sorte que les contours des deux images se distinguent encore aisément. Mais, quand l'homme marche lentement, les images présentent des superpositions nombreuses qu'il en résulte une grande confusion.

M. Marey directeur

M. Demany G. chef de laboratoire



N°138

Vue à Vol d'oiseau des Bâtiments principaux de la Station
Physiologique



N° 131

*Écran blanc de la Station Physiologique
destiné à prendre des images uniques en silhouette dans des
espaces de temps inférieurs au millième de seconde*

© Collège de France

Analyse cinématique des mouvements par la photographie

Images successives sur plaque mobile

Fusil photographique

Images successives sur une même plaque fixe

Chronophotographie

Photographies partielles

Images successives sur plaque tournante

Image unique au millième de seconde

Trajectoires stéréoscopiques

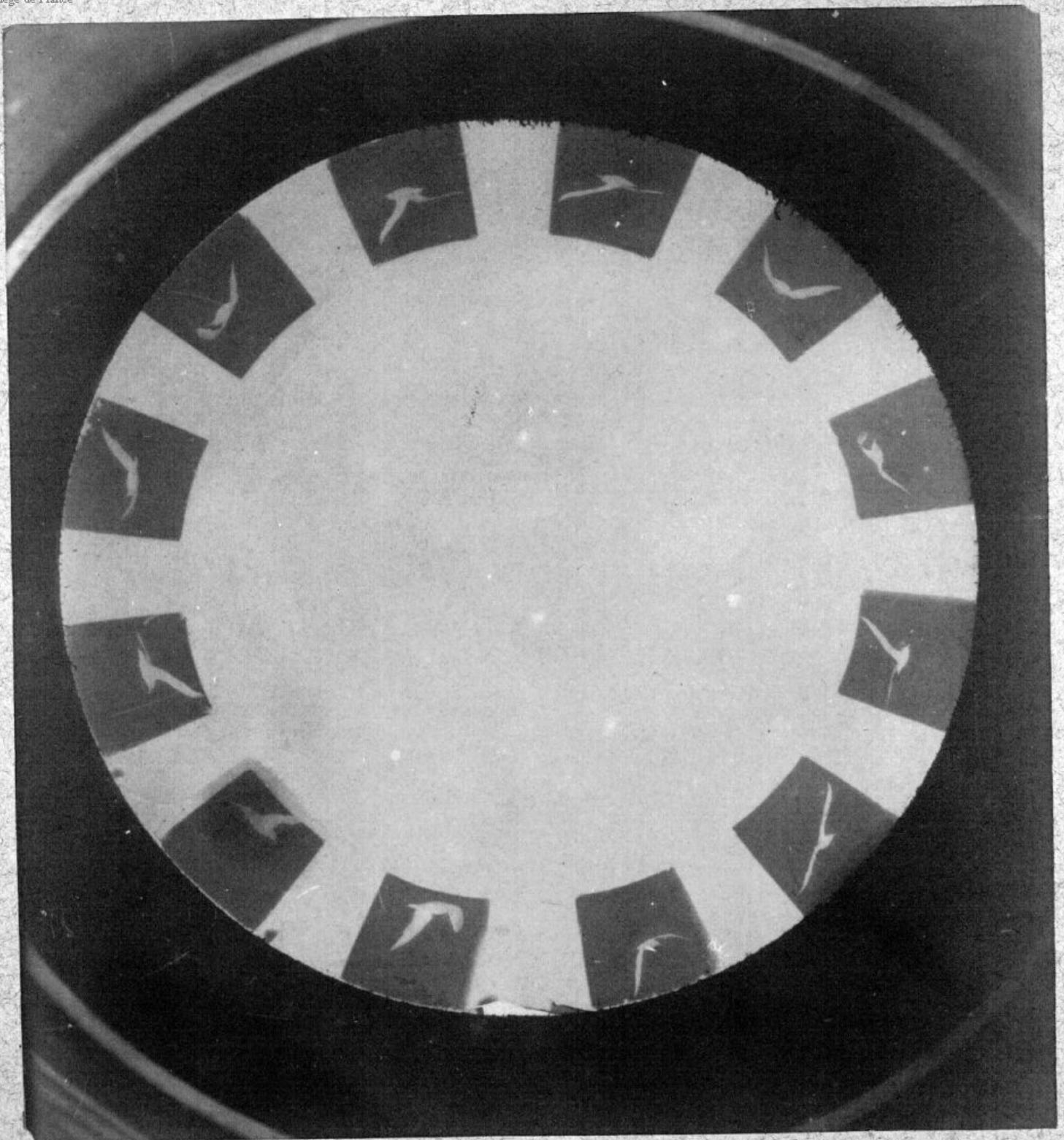
Contrôle du tir sur but mobile par la photographie

Mesure de la durée des éclairages des obturateurs instantanés



N°3

*Cartouchière du fusil photographique
permettant de faire passer dans le fusil une plaque sensible
et d'opérer sans le secours d'une chambre noire.*

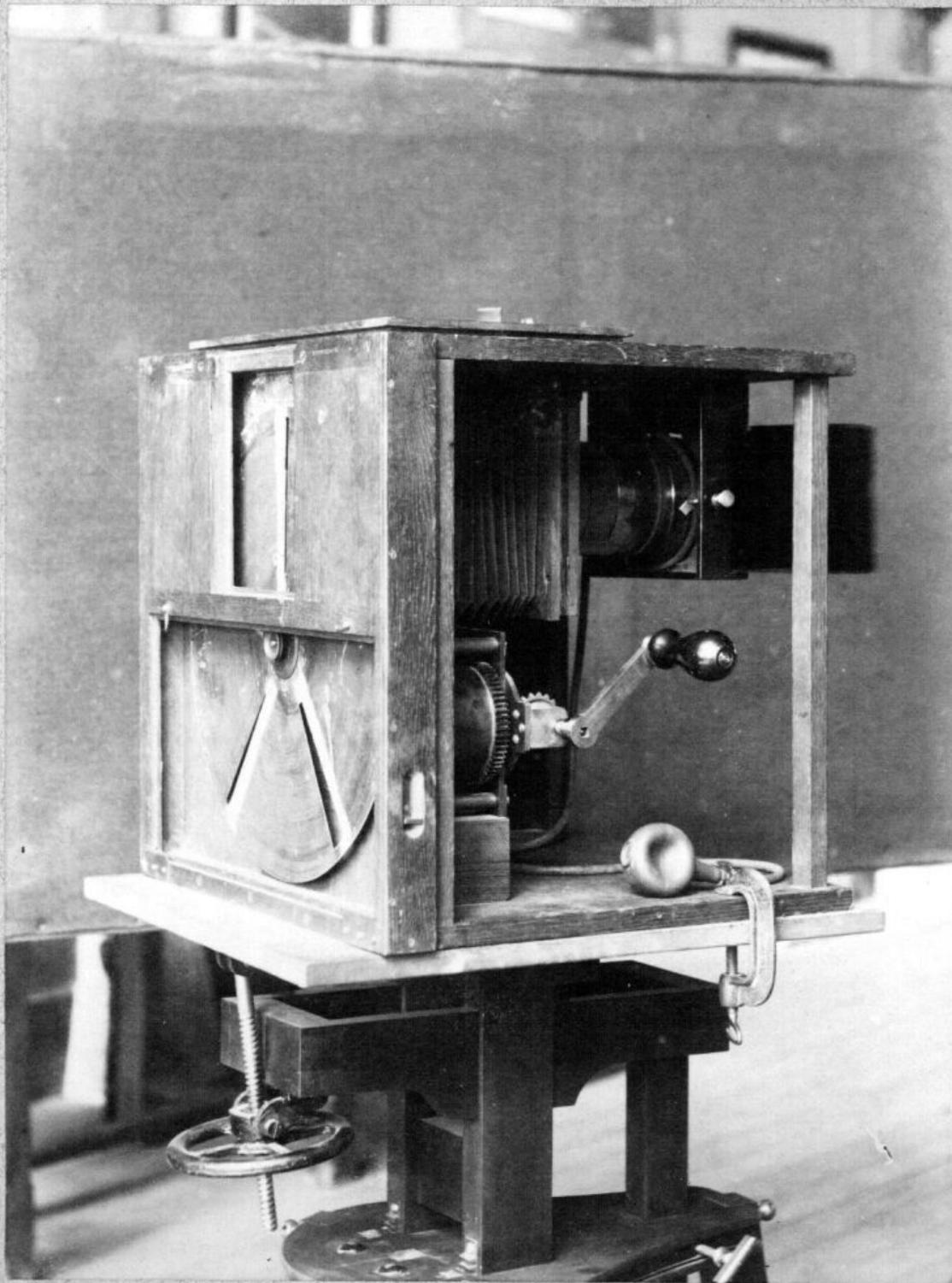


N° 4

12 Images négatives d'une mouette au vol
prises au moyen du fusil photographique.

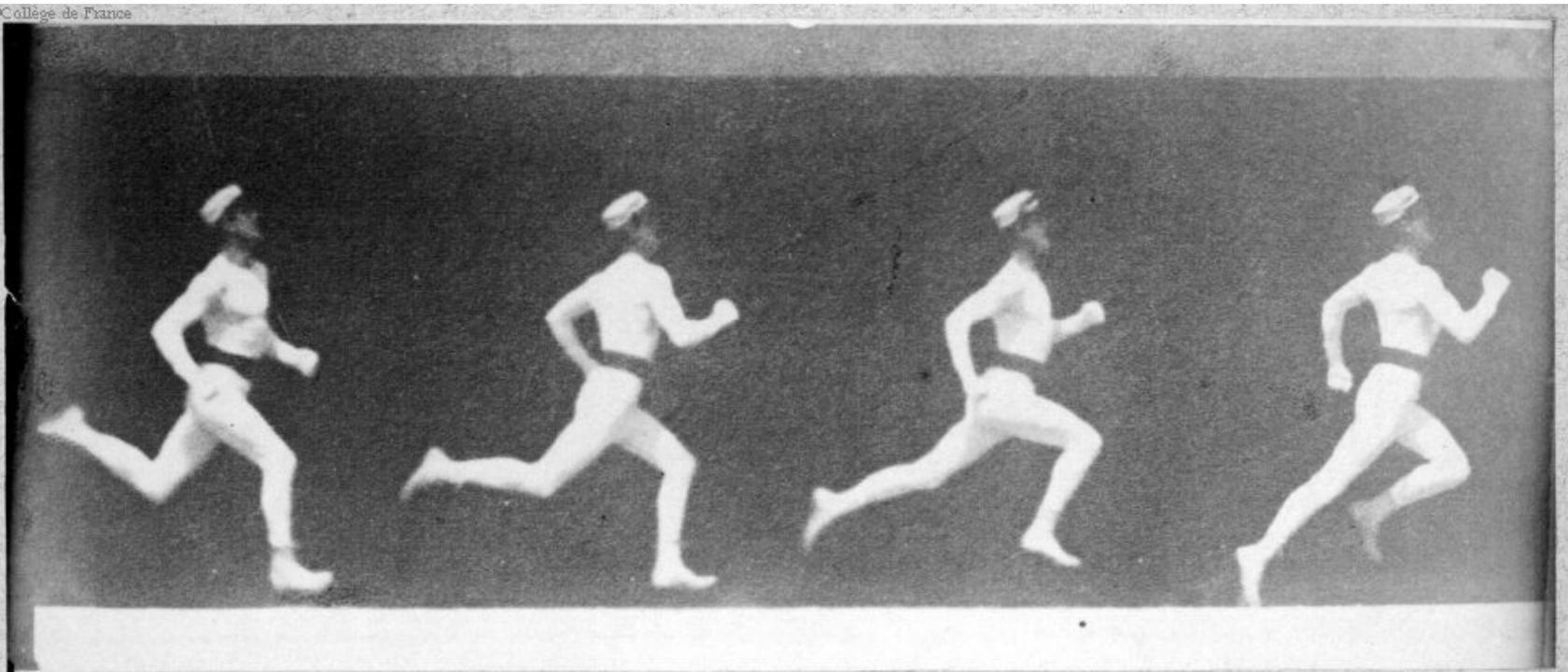
Chronophotographie

ou
Analyse cinématique du mouvement d'un système mobile
au moyen d'une série d'images photographiques prises sur une
même plaque à des intervalles de temps égaux.



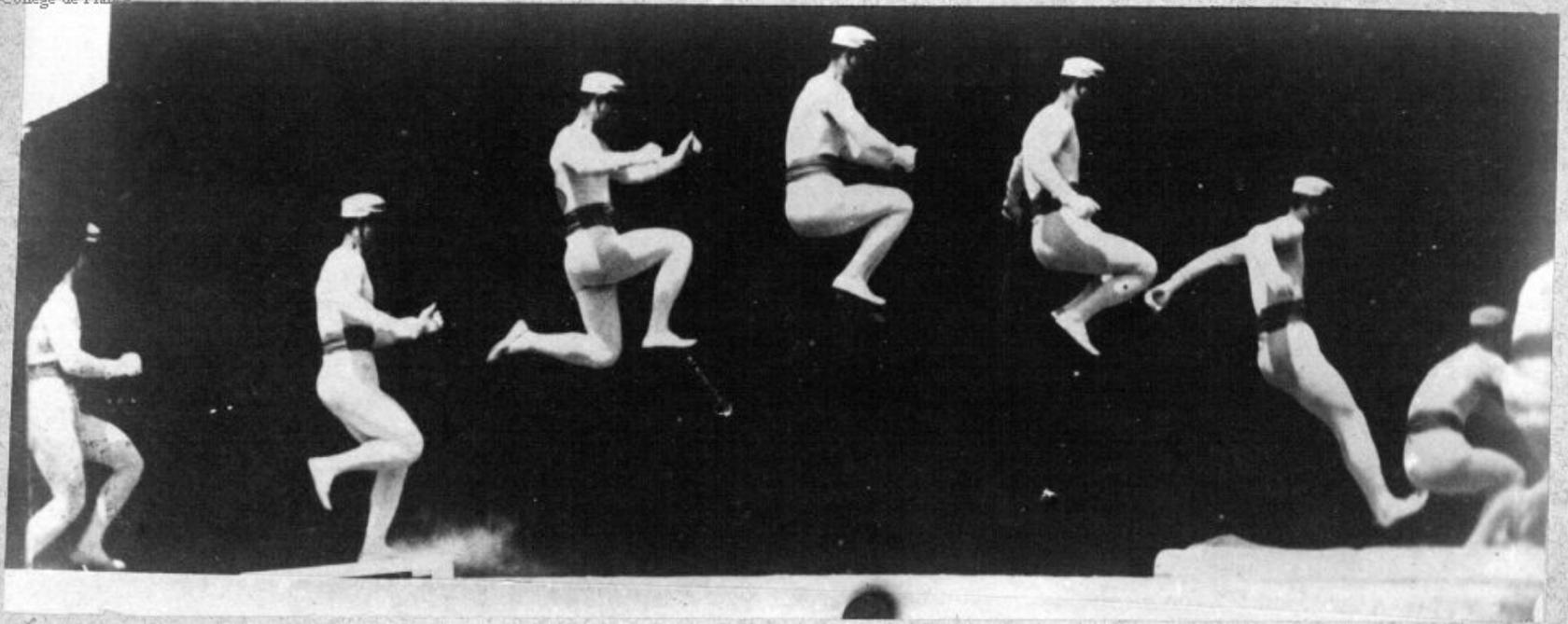
N°5

Appareil Chronophotographique
Laisant voir le disque fenêtré tournant au devant
de la plaque sensible avec une vitesse de 10 tours à la seconde
et laissant ainsi pénétrer la lumière pendant des temps très courts
et équi-distants.



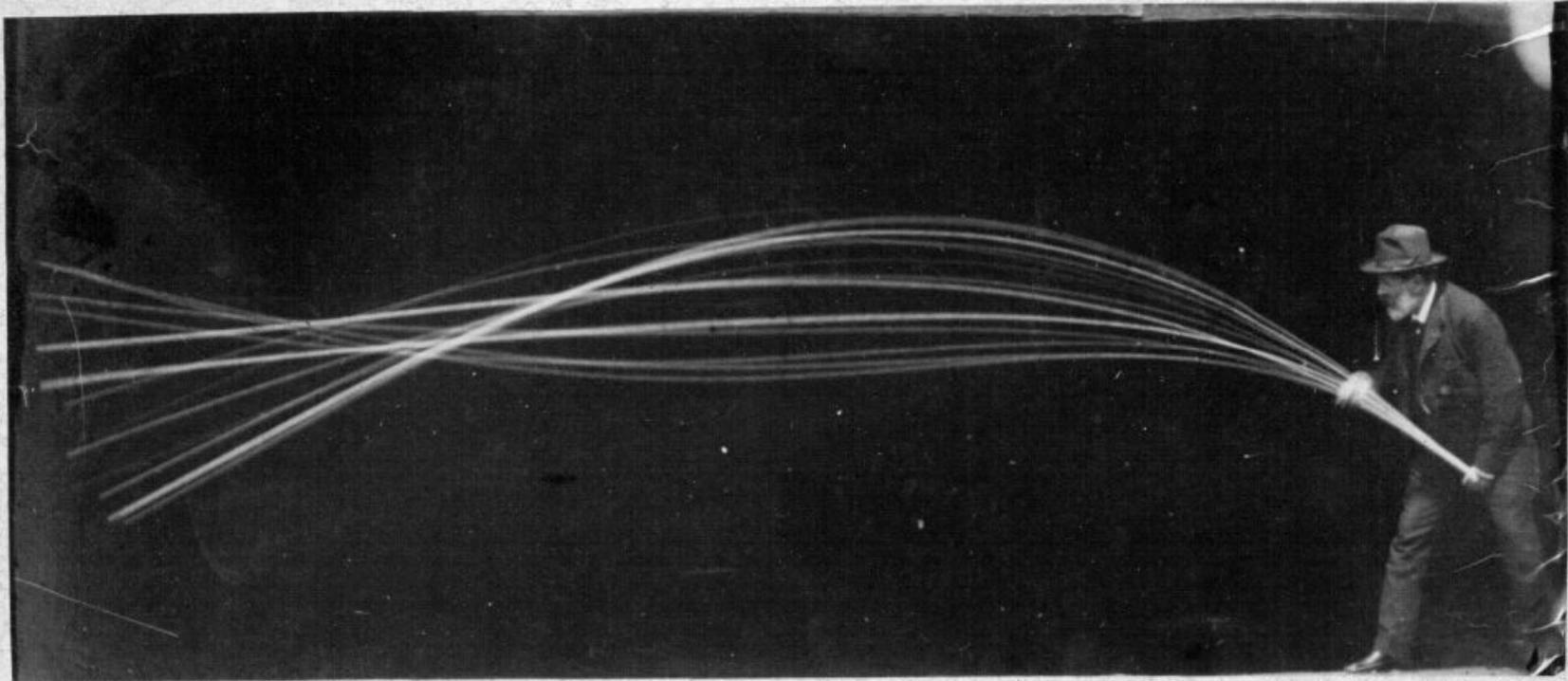
N° 112

Images successives d'un coureur prises au moyen de
l'obturateur chronophotographique tous les $\frac{1}{10}$ de seconde
chaque image ne passant qu'un millième de seconde



N° 127

*Images successives d'un homme exécutant un
Saut en longueur de précédé d'une course.
10 images par seconde*



N° 122

Vibrations d'une verge élastique

que l'on agite à la main

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCVI,
séance du 25 juin 1883.

*Emploi des photographies partielles pour étudier la locomotion
de l'homme et des animaux;*

PAR M. MAREY.

« Lorsqu'on prend sur la même plaque une série de photographies représentant les attitudes successives d'un animal, on cherche naturellement à multiplier ces images pour connaître le plus grand nombre possible de phases du mouvement. Mais, quand la translation de l'animal n'est pas rapide, la fréquence des images est bientôt limitée par leur superposition et par la confusion qui en résulte. Ainsi, un homme qui court, même avec une vitesse modérée, peut être photographié dix fois par seconde, sans que les images se confondent. Si, parfois, une jambe vient se peindre en un lieu où une autre jambe avait déjà laissé son empreinte, cette superposition n'altère point les images : les blancs deviennent seulement plus intenses aux endroits où la plaque a été deux fois impressionnée, de sorte que les contours des deux membres se distinguent encore aisément. Mais, quand l'homme marche lentement, les images présentent des superpositions si nombreuses qu'il en résulte une grande confusion.

» C'est pour remédier à cet inconvénient que j'ai eu recours à la *photo-*
M.

graphie partielle, c'est-à-dire que j'ai supprimé certaines parties de l'image pour que le reste fût plus facile à comprendre.

» Comme, dans la méthode que j'emploie, les objets blancs et éclairés impressionnent seuls la plaque sensible, il suffit d'habiller de noir les parties du corps qu'on veut retrancher de l'image. Si un homme revêtu d'un costume mi-partie blanc et noir marche sur la piste en tournant du côté de l'appareil photographique la partie blanche de son vêtement, la droite par exemple, on le verra dans les images comme s'il était réduit à la moitié droite de son corps.

» Ces images permettent de suivre dans leurs phases successives, d'une part le pivotement du membre inférieur autour du pied pendant le temps de l'appui, et d'autre part, pendant celui du levé, l'oscillation de ce même membre autour de l'articulation coxofémorale, en même temps que cette articulation se transporte en avant d'une manière continue.

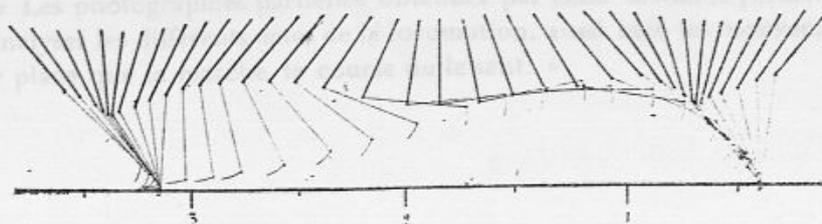
» Les photographies partielles sont utiles aussi dans l'analyse des mouvements rapides, parce qu'elles permettent de multiplier beaucoup le nombre des attitudes représentées. Toutefois, comme l'image d'un membre présente encore une assez grande largeur, on ne peut multiplier beaucoup ces photographies partielles, sous peine de les confondre par superposition. J'ai donc cherché à diminuer la largeur des images, afin de les répéter à des intervalles extrêmement courts. Le moyen consiste à revêtir le marcheur d'un costume entièrement noir, sauf d'étroites bandes de métal brillant qui, appliquées le long de la jambe, de la cuisse et du bras, signalent assez exactement la direction des rayons osseux de ces membres.

» Cette disposition permet de décupler aisément le nombre des images recueillies en un temps donné sur une même plaque : ainsi, au lieu de dix photographies par seconde, on en peut prendre 100. Pour cela, on ne change pas la vitesse de rotation du disque ; mais, au lieu de le percer d'une seule fenêtre, on en fait dix semblables et également réparties sur toute la circonférence (1).

» La figure que j'ai l'honneur de présenter à l'Académie est faite d'après un des clichés projetés à la lanterne magique ; les lignes ponctuées ont été

(1) Il est souvent avantageux de donner à l'une des fenêtres un diamètre double de celui des autres ; il en résulte une intensité plus grande de l'une des images et cela facilite l'estimation des temps, en même temps que cela fournit des points de repères pour comparer les mouvements des membres inférieurs à ceux des membres supérieurs. (Voir *Comptes rendus*, t. XCV.)

transformées en traits pleins. Cette figure montre les phases successives d'un pas de course. Le membre inférieur gauche y est seul représenté : des lignes pleines correspondent à la cuisse, à la jambe et au pied ; des points, aux articulations du pied, du genou et de la hanche.



Course de l'homme, attitudes successives du membre inférieur gauche.
Fréquence des images. 60 par seconde environ.

» Cette figure exprime déjà assez clairement les alternatives de flexion et d'extension de la jambe sur la cuisse, les trajectoires onduleuses du pied, du genou et de la hanche, et pourtant le nombre des images n'excède pas 60 par seconde. Un disque obturateur percé de fenêtres plus nombreuses donnerait avec bien plus de perfection les déplacements angulaires de la jambe sur la cuisse et les trajectoires des trois articulations.

» Plus on donne de finesse aux lignes ponctuées qui expriment la direction des membres, plus on peut multiplier le nombre des images; mais, dans les cas présents, il est plus que suffisant d'avoir soixante fois par seconde l'indication des déplacements du marcheur.

» On voit que, dans la méthode d'analyse photographique, les deux facteurs du mouvement, le temps et l'espace, ne peuvent pas être tous deux estimés d'une manière parfaite. La connaissance des positions que le corps a occupées dans l'espace suppose qu'on possède des images complètes et distinctes; or il faut, pour avoir de telles images, laisser un intervalle de temps assez long entre deux photographies successives. Veut-on, au contraire, porter à la perfection la notion du temps, on n'y peut arriver qu'en augmentant beaucoup la fréquence des images, ce qui force à réduire chacune d'elles à certaines lignes. On concilie autant que possible ces deux exigences opposées en choisissant pour les photographies partielles les lignes et les points qui renseignent le mieux sur les attitudes successives du corps.

» Il est curieux de voir que cette expression des attitudes successives

du corps et des membres, au moyen d'une série de traits exprimant la direction des rayons osseux, ait été précisément adoptée par d'anciens auteurs comme étant la plus explicite et la plus capable de faire bien comprendre les phases d'un mouvement. Ainsi, Vincent et Goiffon, dans leur remarquable Ouvrage sur le cheval ⁽¹⁾, ont essayé de représenter par des lignes diversement brisées les déplacements des rayons osseux des membres aux différents temps d'un pas ⁽²⁾.

» Il n'est pas nécessaire d'insister sur la supériorité que présente la Photographie, qui donne les positions véritables des membres, sur l'observation directe, incapable de saisir des actes si rapides et d'apprécier de si courtes durées.

» Au commencement de ce siècle, les frères Weber ont aussi eu recours au même mode de représentation pour exprimer les actes successifs qui se produisent dans la marche de l'homme. C'est en réduisant le marcheur à la figure d'un squelette que ces éminents observateurs ont réussi à juxtaposer, sans les confondre, un grand nombre d'images exprimant des attitudes différentes.

» La manière de construire les bandes brillantes qui, dans la photographie, expriment la position des leviers osseux mérite une mention spéciale. Comme le temps de pose doit être très court, il faut employer une matière d'un grand éclat. Des bandes de métal brillant ne sont pas également lumineuses dans toute leur étendue, parce qu'elles ne réfléchissent pas sous le même angle les rayons solaires; elles produisent sur les épreuves des lignes d'intensité inégale. J'ai obtenu de meilleurs résultats avec de petites bandes de bois noir sur lesquelles étaient plantés, suivant une ligne, des clous de métal brillant à têtes hémisphériques. Sur chacune de ces surfaces arrondies se formait une image du Soleil, image extrêmement petite, mais très brillante. Dans la photographie, cette série de clous brillants donnait naissance à une ligne ponctuée. Au niveau de la cheville du pied, du genou, du grand trochanter, des demi-sphères plus grosses que

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

⁽²⁾ Il est regrettable que ces savants aient eu recours à une méthode tout à fait artificielle pour exprimer le sens du mouvement. Au lieu de représenter les déplacements successifs des membres dans l'espace, ils supposent le cheval immobile et montrent les rayons osseux de ses membres oscillant en sens alternatif autour de l'articulation supérieure.

les autres signalaient dans les images les centres de mouvement par un point de grande dimension.

» Les photographies partielles obtenues par cette méthode permettent d'analyser les différents actes de la locomotion, aussi bien les mouvements sur place que la marche, la course ou le saut. »

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences.
Séances du 19 mai 1886.

Analyse cinématique de la marche;

PAR M. MAREY.

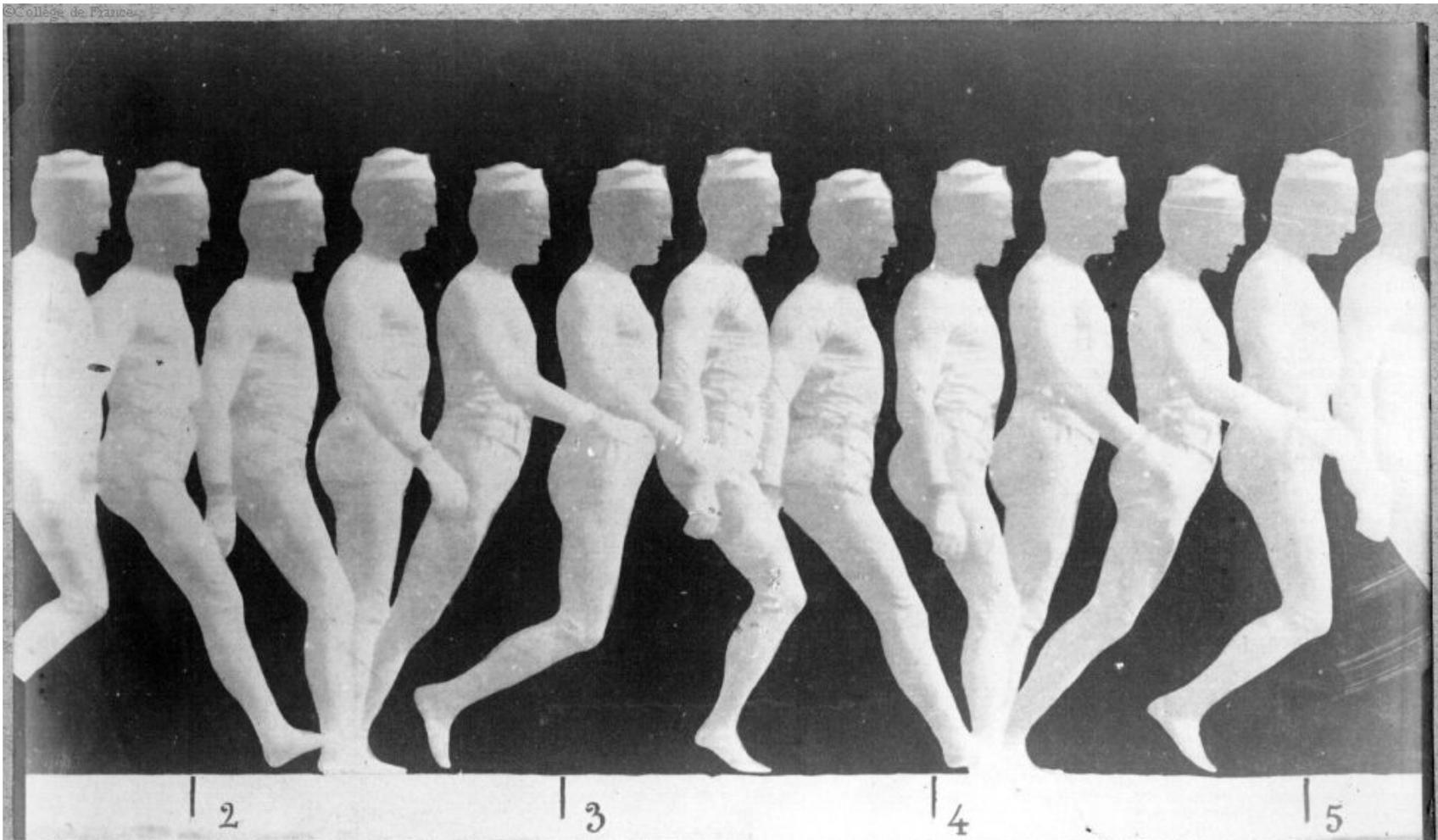
« Dans une Note du 25 juin de l'année dernière, j'ai décrit un procédé photographique par lequel on obtient, sur une même plaque, un grand nombre d'images instantanées représentant les différentes attitudes du corps pendant la marche, la course ou le saut. Sur chaque image est réduite à des lignes représentant la direction osseuse des membres et à des points correspondant aux centres de mouvement des articulations.

« La fig. 1 montre ainsi la série des attitudes des membres droit, avec les positions de la tête, chez un homme qui marche assez rapide. Les photographies ont été prises à des intervalles de 1/25^e de seconde.

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE DES COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.
9026 Paris. — Quai des Augustins, 55.

« Sur ces épreuves agrandies, on peut étudier, comme sur les originaux, la façon dont chacun d'eux s'engendre, ainsi que la part d'accent qui vient, dans la progression, à la pesanteur et à l'action musculaire.

« J'ai entrepris, avec M. G. Demeny, mon préparateur à la Sorbonne, de publier ces épreuves agrandies, et de les accompagner d'un texte explicatif.



N° 87

Images partielles d'un marcheur vêtu de laine.
à l'exception de la jambe gauche qui, noircie devient invisible
sur la photographie. Les images partielles mettent en saillie
le mouvement d'une partie bien déterminée du corps
en évitant la confusion des images

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCVIII,
séance du 19 mai 1884.

Analyse cinématique de la marche;

PAR M. MAREY.

« Dans une Note du 25 juin de l'année dernière, j'ai décrit une méthode photographique par laquelle on obtient, sur une même plaque sensible, un grand nombre d'images instantanées représentant les différentes attitudes du corps pendant la marche, la course ou le saut. Sur ces figures, chaque image est réduite à des lignes représentant la direction des rayons osseux des membres et à des points correspondant aux centres de mouvement des articulations.

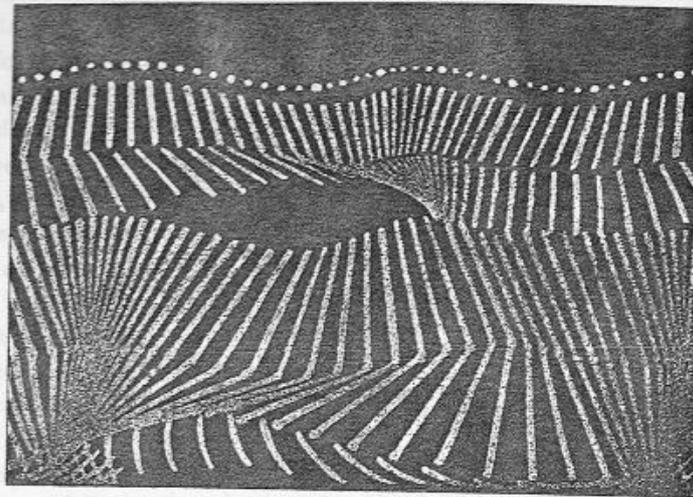
» La *fig. 1* montre ainsi la série des attitudes des membres du côté droit, avec les positions de la tête, chez un homme qui marche d'un pas assez rapide. Les photographies ont été prises à des intervalles de $\frac{1}{10}$ de seconde, la longueur d'un pas complet étant de 1^m,75, la vitesse de l'allure 6300^m à l'heure.

» Sur ces épreuves agrandies, on peut étudier, comme sur une épure, les lieux géométriques de chacune des articulations du membre inférieur, la façon dont chacun d'eux s'engendre, ainsi que la part d'action qui revient, dans la progression, à la pesanteur et à l'action musculaire.

» J'ai entrepris, avec M. G. Demy, mon préparateur à la Station phy-
M.

siologique, la double étude, cinématique et dynamique, de la locomotion, d'après les documents fournis par la photographie et par d'autres appareils, chronographes et dynamomètres inscripteurs (1).

Fig. 1.



» Comme cette étude est exclusivement basée sur les documents fournis par la méthode graphique, on ne s'étonnera pas de n'y point rencontrer l'exposé des théories ou des observations faites antérieurement sur la locomotion humaine.

ÉTUDE CINÉMATIQUE DE LA MARCHÉ DE L'HOMME.

» La *fig. 1* donne les trajectoires des différentes articulations des membres, les angles que font entre eux les différents leviers osseux, les variations de vitesse de chacune de ces parties aux différents instants de ses mouvements. Pour parler plus exactement, la *fig. 1* représente la projection de ces mouvements sur un plan vertical parallèle à la direction de la marche. Certains mouvements de moindre importance pour la locomotion devront être étudiés d'après leur projection sur d'autres plans; nous ne nous en occuperons pas ici.

» On a vu, dans la description de la méthode, que les photographies ne

(1) Nous ne nous occuperons aujourd'hui que de la marche, considérée au point de vue cinématique.

se compose d'une série de relations instantanées, prises à des instants très instantanés qui se marquent le long de la ligne de contact de la tête du premier métatarsien avec le sol, et qui s'approchent d'autant plus de

traduisent le mouvement que pour une moitié du corps, celle qui est tournée du côté de l'appareil; on peut toutefois suppléer à l'absence de renseignements sur les mouvements de la moitié opposée du corps, puisqu'on sait que, dans les allures régulières, les membres droits et gauches exécutent les mêmes actes d'une manière alternative. Ainsi, dans un pas complet, c'est-à-dire entre la position occupée sur la figure par le pied droit à l'un de ses appuis et la position occupée par le même pied à son appui suivant, il s'est fait un pas du pied gauche; or, si l'allure est régulière, le lieu occupé par le pied gauche au pas se trouvera précisément au milieu de l'espace qui s'étend entre les images des pas du pied droit.

» On pourrait donc, étant donnée une allure parfaitement régulière, obtenir les images des deux moitiés du corps en superposant deux figures transparentes, semblables à celle qui est représentée ci-dessus et en faisant glisser l'une de ces figures par rapport à l'autre d'une longueur égale à celle d'un demi-pas.

» Ces images expriment, mieux que toute description, les relations qui existent entre les mouvements des différentes parties du corps; elles montrent comment chacune des jambes concourt à imprimer au tronc et à la tête une translation presque uniforme et des oscillations dans un plan vertical correspondant chacune à l'action d'une des jambes. Grâce aux repères qu'on obtient en donnant une intensité plus grande à une image sur cinq, on peut déterminer pour chaque instant les positions relatives de la jambe, du bras et de la tête, et constater l'alternance des mouvements du bras et de ceux de la jambe d'un même côté. Enfin, sachant que deux images successives se sont produites à un intervalle de temps égal à $\frac{1}{10}$ de seconde, il suffit de porter la longueur qui sépare deux images consécutives sur une échelle métrique située au bas de la figure (1) pour connaître la valeur absolue de l'espace parcouru par un point, à l'instant considéré, et pour en déduire la vitesse de ce point.

» Nous attirerons toutefois l'attention sur les mouvements les plus importants, ceux des jambes pendant la marche; la plupart des actes que nous aurons à décrire se retrouveront dans les allures plus rapides avec de simples différences dans l'étendue et la vitesse des mouvements.

» *Etude cinématique des mouvements du membre inférieur pendant la marche.*
— On a tous les éléments du problème quand on connaît les mouvements

(1) Dans la reproduction de la fig. 1, le graveur a supprimé par erreur l'échelle métrique.

Il sera, pour les mouvements du membre inférieur, les mêmes que dans nos précédents travaux d'étude dans un autre travail.

(4)

de la jambe pendant la durée d'un pas complet, commençant à l'appui d'un pied sur le sol et finissant à l'appui suivant du même pied. La durée du pas sera divisée en deux périodes, celle qui correspond à l'appui du pied et celle qui correspond au levé.

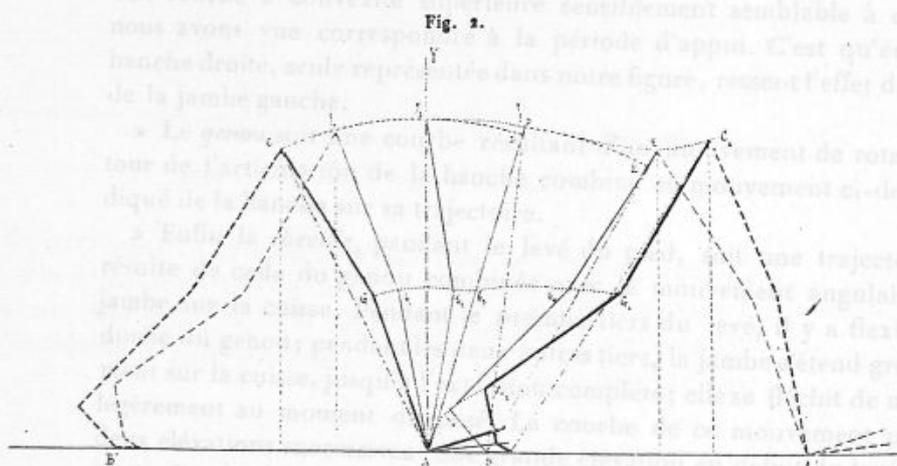
» A. *Mouvements du membre inférieur pendant la période d'appui du pied.*

— Les mouvements, pendant cette phase, sont représentés fig. 2. Chacune des articulations du membre inférieur : *cheville* (articulation tibio-tarsienne), *genou* (articulation tibio-fémorale), *hanche* (articulation coxo-fémorale), suit une trajectoire engendrée par les mouvements angulaires simultanés des segments : pied, jambe et cuisse.

» Le pied touche le sol par le talon en A, et presque aussitôt s'applique par toute l'étendue de sa face plantaire ; cette première phase occupe environ les trois cinquièmes de la durée totale de l'appui.

» A partir de ce moment le talon se détache du sol, et pendant la seconde phase, c'est-à-dire les deux cinquièmes de l'appui, le pied se déroule autour de sa pointe B, ou pour mieux dire de l'extrémité des métatarsiens.

» La *trajectoire de la cheville* est engendrée de la manière suivante. Après avoir été immobile pendant la première phase de l'appui, la cheville décrit



une courbe α , qui se confond sensiblement avec un arc de cercle ayant pour centre l'articulation métatarso-phalangienne. En réalité, le mouvement se compose d'une série de rotations infiniment petites autour de centres instantanés qui se meuvent le long de la ligne de contact de la tête du premier métatarsien avec le sol, et qui s'approchent d'autant plus de

l'extrémité antérieure de cet os que le déroulement du pied est plus complet ⁽¹⁾.

» *Trajectoire du genou.* — Cette trajectoire est plus complexe et résulte de la composition de deux mouvements indépendants.

» Dans la première phase de l'appui, c'est-à-dire lorsque le talon touche le sol, le genou G décrit un arc de cercle \mathcal{C}^1 , \mathcal{C}^2 , dont le centre serait à la cheville du pied; dans la seconde phase, \mathcal{C}^3 , \mathcal{C}^4 , G, ce mouvement se combine au déroulement du pied autour de l'extrémité des métatarsiens, mouvement dont la description a été donnée plus haut.

» L'angle que la jambe forme avec le pied change aux différentes phases de l'appui: pendant la première phase, celle de l'appui du talon et de la plante, la jambe se fléchit graduellement sur le pied; pendant la seconde, à partir du moment où le talon se soulève, le pied s'étend graduellement sur la jambe jusqu'à l'instant où il se détache du sol.

» Cette extension du pied augmente la distance qui sépare le genou du point d'appui, de sorte que la trajectoire du genou, au lieu de s'abaisser vers le sol à la fin de l'appui, comme cela arriverait s'il décrivait seulement un arc de cercle autour de la cheville, se relève et suit, dans son ensemble, une ligne légèrement sinueuse, parfois assez rapprochée de l'horizontalité.

» *Trajectoire de la hanche.* — La hanche subit toutes les influences qui engendrent la trajectoire du genou; mais, en outre, elle est soumise à l'effet des mouvements de la cuisse sur la jambe. Ceux-ci consistent en une flexion du genou au commencement du posé du pied G, \mathcal{C}^1 , \mathcal{C}^2 , après quoi le genou se redresse jusqu'au moment où le talon quitte le sol \mathcal{C}^3 ; enfin le genou se fléchit de nouveau pendant la dernière phase de l'appui.

» Ces mouvements de flexion et d'extension du genou produisent des changements dans la longueur des lignes qui joignent les différentes positions de la jambe à chacun des points d'appui du pied sur le sol. Nous appellerons ces lignes *rayons* du membre inférieur (on a représenté ces rayons dans la *fig. 2* par des lignes formées alternativement de points et de traits).

» Sous ces influences diverses, la trajectoire de la hanche C, γ_1 , γ_2 , γ_3 , C,

(1) Ce mouvement du pied autour de la tête des métatarsiens n'est vrai que pour la marche à pieds nus ou avec des semelles très souples. Si le marcheur porte des semelles épaisses et longues, le déroulement du pied se fera autour de l'extrémité de la chaussure; il en résultera, pour les mouvements du membre et pour la longueur du pas, des conséquences que nous nous proposons d'étudier dans un autre travail.

décrite pendant l'appui du pied est une courbe à convexité supérieure. Le maximum de hauteur de cette courbe au-dessus du plan horizontal ne correspond pas au moment où l'articulation de la hanche passe en Y, verticalement au-dessus de la base de sustentation formée par le pied, mais se projette un peu en avant de cette base, dans le sens de la progression.

» Lorsque le pied droit s'est posé sur le sol en A, le pied gauche était encore appuyé par sa pointe; le corps reposait donc sur les deux pieds à la fois, et ce *double appui* a duré jusqu'au moment où la hanche est représentée en γ , et le genou en ζ' . De même, à la fin de la *fig. 2*, lorsque le pied droit est en B et la hanche en E, le pied gauche se pose sur le sol; un double appui se produit encore et dure jusqu'au moment où la hanche est en C_1 .

» B. *Mouvement du membre inférieur pendant le levé du pied.* — Aussitôt que le pied a quitté le sol, le centre de mouvement du membre inférieur passe à l'articulation de la hanche. Dans ce mouvement, que les auteurs classiques ont comparé à l'oscillation d'un pendule dont le point de suspension éprouverait un déplacement dans le sens horizontal, nous aurons à considérer la trajectoire de chacune des articulations en particulier. Le détail de ces mouvements se voit aisément sur la *fig. 1*.

» Pendant la période de levé du pied, la *trajectoire de la hanche* décrit une courbe à convexité supérieure sensiblement semblable à celle que nous avons vue correspondre à la période d'appui. C'est qu'en effet la hanche droite, seule représentée dans notre figure, ressent l'effet de l'appui de la jambe gauche.

» Le *genou* suit une courbe résultant d'un mouvement de rotation autour de l'articulation de la hanche combiné au mouvement ci-dessus indiqué de la hanche sur sa trajectoire.

» Enfin la *cheville*, pendant le levé du pied, suit une trajectoire qui résulte de celle du genou combinée avec le mouvement angulaire de la jambe sur la cuisse. Pendant le premier tiers du levé, il y a flexion graduelle du genou; pendant les deux autres tiers, la jambe s'étend graduellement sur la cuisse, jusqu'à l'extension complète; elle se fléchit de nouveau légèrement au moment du posé. La courbe de ce mouvement présente deux élévations successives : une grande élévation au début du levé; elle se raccorde avec la courbe ascendante engendrée par le déroulement du pied à l'appui; la cheville s'abaisse ensuite et rase le sol jusqu'à l'instant du posé; enfin elle se relève de nouveau très légèrement à l'instant où le pied va s'appuyer sur le sol.

» L'ensemble de tous ces mouvements exécutés tour à tour par les deux membres inférieurs concourt pour produire le mouvement de la hanche; or ce mouvement est d'autant plus important à considérer qu'il correspond sensiblement à celui du centre de gravité du corps lui-même placé assez près de l'articulation de la hanche. Toutefois, comme les hanches sont situées en dehors du plan vertical médian qui passerait par le corps, d'avant en arrière, l'action des membres sur le tronc s'exerce toujours plus ou moins obliquement. Il en résulte une inégalité des effets des deux jambes sur la trajectoire de la hanche : celle-ci n'offre pas, dans ses inflexions, la périodicité régulière qu'on observe, par exemple, dans la trajectoire de l'épaule et surtout dans celle du sommet de la tête.

» Si l'on examine, dans son ensemble, la courbe décrite par la hanche pendant la durée d'un pas, on y observe deux maxima dont chacun se produit pendant la période d'appui de l'un des pieds. Les minima correspondent aux moments où chacun des pieds commence son posé (instant du double appui). Ces deux ondulations de la courbe de la hanche, dont chacune est produite par l'action d'une des jambes, ne sont pas égales entre elles, avons-nous dit. Cela tient à des oscillations du bassin autour de deux axes, l'un vertical, l'autre horizontal et parallèle à la direction de la marche ⁽¹⁾.

» Les oscillations du bassin autour de son axe horizontal interfèrent avec les ondulations de la trajectoire de la hanche; elles ont pour effet de rendre fort inégaux les deux minima de cette trajectoire. Pour la hanche droite, le minimum qui se produit après le levé du pied droit est le plus bas, parce qu'il coïncide avec l'oscillation descendant du côté correspondant du bassin; le minimum suivant, qui correspond au levé du pied gauche, est atténué, au contraire, parce qu'il correspond à l'oscillation ascendante du bassin.

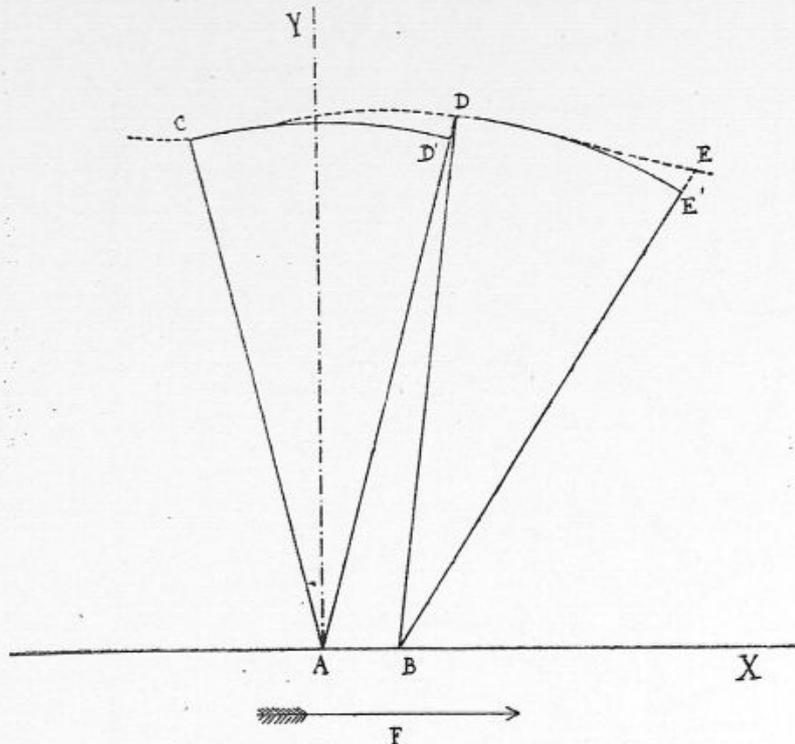
» Enfin, les oscillations du bassin autour de son axe vertical se traduisent par des mouvements de la hanche, tantôt dans le sens de la progression, tantôt en sens inverse; il en résulte une inégalité dans la vitesse de la hanche, au moment des deux maxima de sa trajectoire. Cette inégalité de vitesse se traduit par la plus grande condensation du ponctué de la trajectoire de la hanche pendant l'élévation qui correspond à l'appui du pied.

⁽¹⁾ Ces oscillations ont été graphiquement déterminées par M. Carlet [*Étude sur la marche* (*Annales des Sciences naturelles : Zoologie*, 1872)].

8)

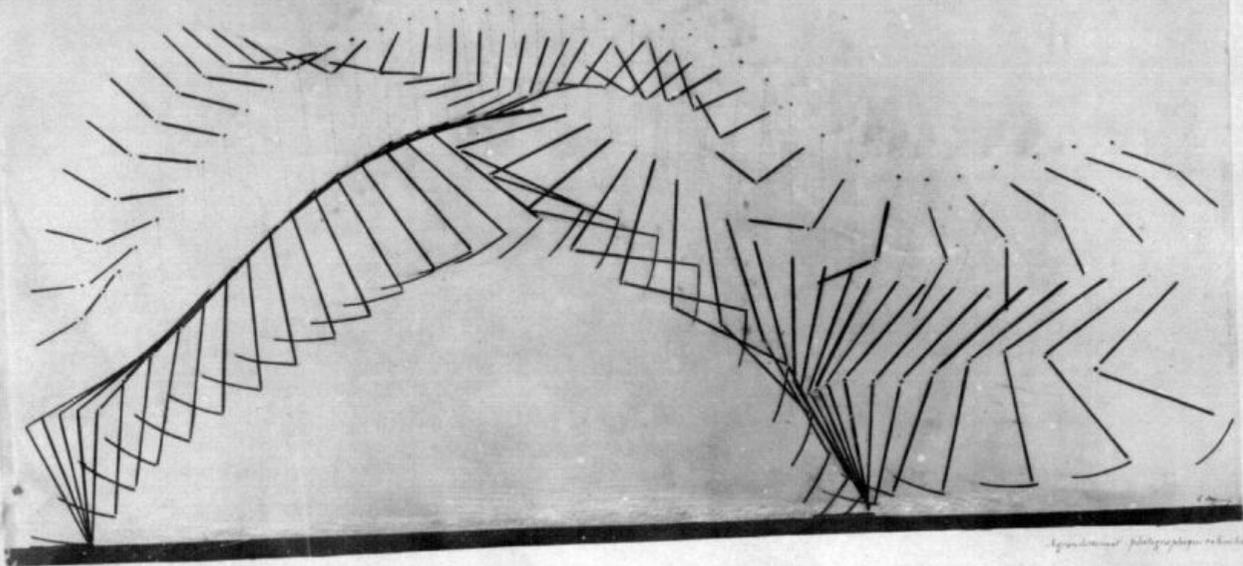
» Si l'on voulait réduire à son expression cinématique la plus simple le mouvement de la hanche et, par conséquent, du tronc sur sa trajectoire, pendant l'appui du pied correspondant, on caractériserait ce mouvement par la *fig. 3*. Dans cette figure, pendant une première phase, le membre tourne autour du point A ; la trajectoire CD de la hanche s'écarte de l'arc

Fig. 3.



de cercle CD', parce que l'extension de la cuisse sur la jambe accroît graduellement la longueur du rayon du membre. Pendant la seconde phase, le centre du mouvement est en B, et la trajectoire DE diffère de l'arc DE' parce que l'extension du pied allonge à son tour le rayon du membre inférieur. »

Locomotion de l'Homme

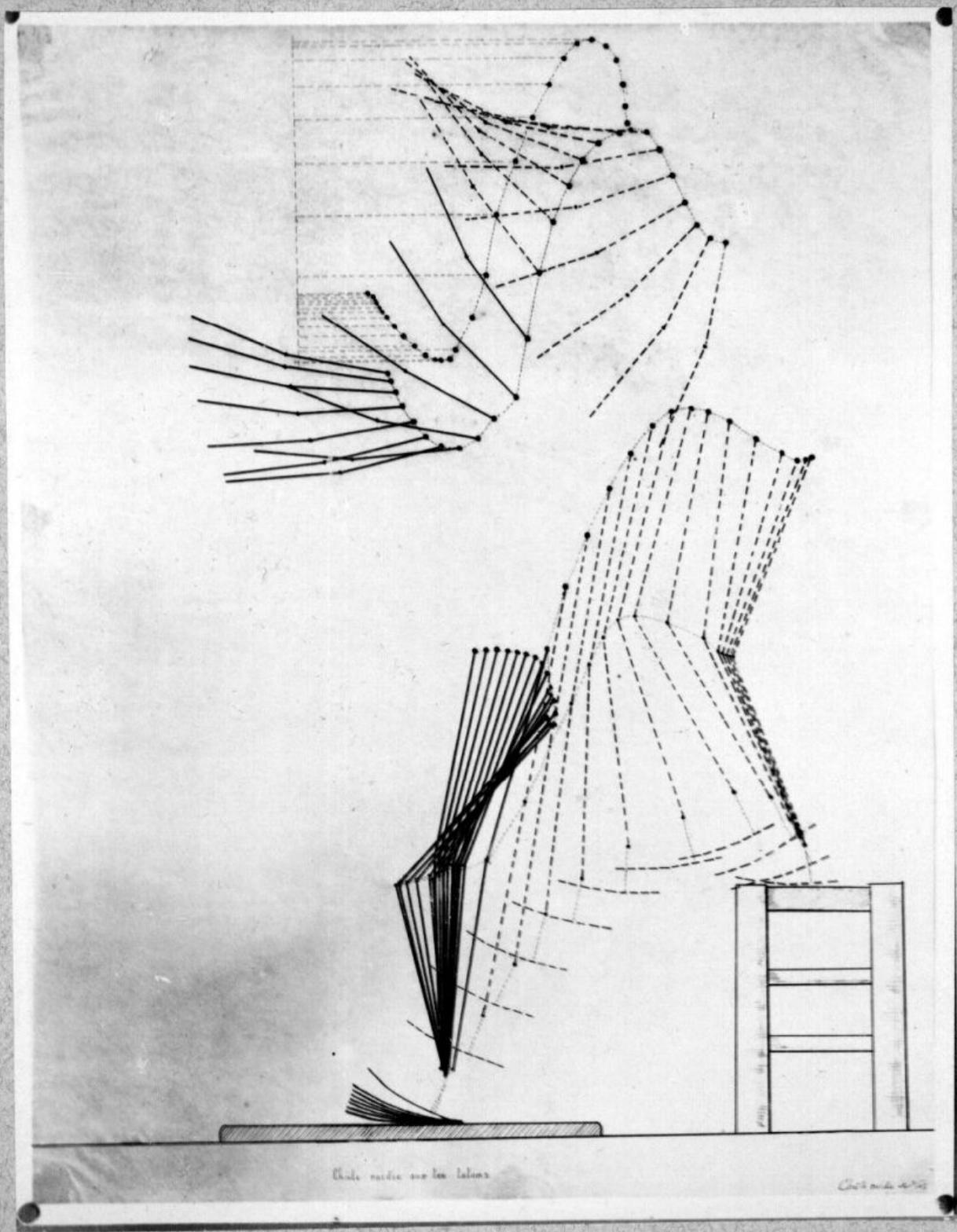


Saut en hauteur précédé d'une course

Appareil photographique rétro

N° 21

*Esquisse dessinée au moyen des documents de la
 Chronophotographie et donnant l'analyse des mouvements de la partie gauche
 d'un sauteur exécutant un saut en hauteur précédé
 d'une course.*



N°24

Figure représentant l'analyse du mouvement
de la jambe gauche d'un homme sautant d'un haut
d'un tabouret et tombant sur les talons
les jambes raidies.

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CIII;
séances des 20 septembre et 4 octobre 1886.

Analyse cinématique de la course de l'homme ⁽¹⁾. *Parallèle de la marche et de la course, suivi du mécanisme de la transition entre ces deux allures;*

PAR MM. MAREY ET DEMENY.

« Dans la figure ci-jointe sont représentées les attitudes successives du membre inférieur droit dans un pas complet. Deux accolades divisent le pas en période d'appui A et période de lever L. Cette durée est subdivisée à son tour en quatre phases inégales dont les trois dernières appartiennent au lever du pied.

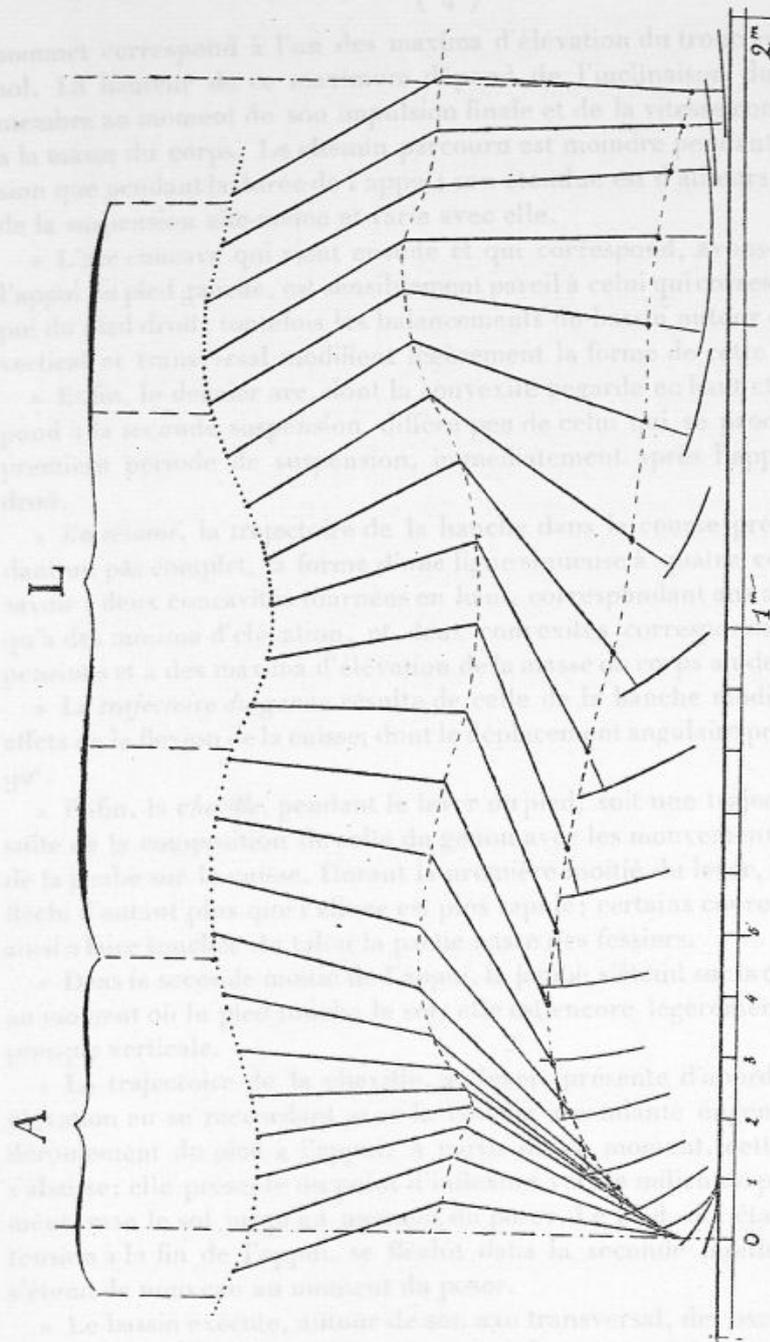
» A. *Mouvements du membre inférieur pendant la période d'appui du pied.* — En général, le pied s'appuie par la plante, quelquefois par le talon, rarement par la pointe; dans ce dernier cas, le pas subit un raccourcissement.

» Dès qu'elle a touché le sol, la plante du pied y reste appliquée pendant un peu moins de moitié de l'appui; elle pivote ensuite autour de

(1) Dans la présente Note, nous suivrons le même plan que dans celle du 19 mai 1884 « sur l'analyse cinématique de la marche ».

GENÉTIQUE DE LA COURSE.

MOUVEMENTS DU MEMBRE INFÉRIEUR DROIT.



A, période d'appui du pied droit; le pied, qui avait été immobile dans la première partie de cette phase, pivote autour de sa pointe. — L, période de lever du pied; elle se divise en trois phases : la première et la dernière correspondent à des suspensions du corps au-dessus du sol; la trajectoire de la hanche y est convexe par en haut; la phase moyenne correspond à l'appui du pied gauche; la trajectoire de la hanche y est concave par en haut.

Dans ces épreuves chronophotographiques, les vitesses se mesurent d'après l'écartement des images qui sont prises à des intervalles de temps égaux. Un ralentissement se traduit donc par un rapprochement des points sur la trajectoire, une accélération par l'écartement de ces points.

l'extrémité des métatarsiens, et, dans ce déroulement, l'angle décrit peut être de 90° , de sorte que la face plantaire du pied soit à peu près verticale.

- L'emploi de semelles plus ou moins rigides et plus ou moins longues reporte le centre de déroulement du pied en avant des métatarsiens et même au delà de l'extrémité des orteils.

» *Trajectoire de la cheville.* — Immobile pendant l'appui de la plante du pied, la cheville entre en mouvement dès que le talon se détache; elle décrit alors sensiblement un arc de cercle autour de la pointe du pied; le rayon de ce cercle est accru par la longueur et par la rigidité des semelles.

» *Trajectoire du genou.* — Dans la première phase de l'appui, alors que la cheville est immobile, le genou décrit un arc de cercle engendré par la flexion de la jambe sur le pied. Mais, dès que le talon se détache, la trajectoire du genou présente un point de rebroussement et s'élève brusquement, car l'extension de la jambe sur le pied, qui se produit alors, a le double effet de diminuer la vitesse angulaire de la jambe et d'allonger la distance qui sépare le genou du point d'appui sur le sol.

» *Trajectoire de la hanche.* — Elle résulte de la trajectoire du genou modifiée par les mouvements de la cuisse sur la jambe. La cuisse se fléchit d'abord sur la jambe pendant la première phase de l'appui; elle s'étend au contraire pendant la seconde, c'est-à-dire pendant que le pied s'étend lui-même.

» Les changements dans la longueur du membre et les angles sous lesquels ils se produisent donnent à la trajectoire de la hanche, dans la course, une forme concave par en haut, inverse de celle qui existe dans la marche.

» B. *Mouvement du membre inférieur pendant le lever du pied.* — Le pied quitte le sol aussitôt que la vitesse communiquée au corps, suivant le prolongement du rayon du membre inférieur, l'emporte sur celle de l'allongement de ce rayon. Le membre est alors plus ou moins étendu; il est en extension complète dans la course vive. Pendant le lever du pied, le membre inférieur exécute des mouvements angulaires autour de la hanche, dont nous étudierons avant tout la trajectoire.

» *Trajectoire de la hanche.* — Cette courbe se divise d'une façon fort nette en trois arcs, alternativement convexes et concaves par en haut. Les arcs convexes correspondent aux périodes de suspension; l'arc concave intermédiaire coïncide avec l'appui du pied gauche.

» Le premier arc convexe est décrit pendant la suspension qui succède à l'impulsion du pied droit; il est sensiblement parabolique ⁽¹⁾; son

(1) Dans la Note sur le saut (24 août 1885), on a montré l'influence de l'attitude pendant la suspension sur la forme de la trajectoire d'un point du corps.

(4)

sommet correspond à l'un des maxima d'élévation du tronc au-dessus du sol. La hauteur de ce maximum dépend de l'inclinaison du rayon du membre au moment de son impulsion finale et de la vitesse communiquée à la masse du corps. Le chemin parcouru est moindre pendant la suspension que pendant la durée de l'appui; son étendue est d'ailleurs liée à celle de la suspension elle-même et varie avec elle.

» L'arc concave qui vient ensuite et qui correspond, avons-nous dit, à l'appui du pied gauche, est sensiblement pareil à celui qui correspond à l'appui du pied droit; toutefois les balancements du bassin autour de ses axes vertical et transversal modifient légèrement la forme de cette trajectoire.

» Enfin, le dernier arc, dont la convexité regarde en haut et qui correspond à la seconde suspension, diffère peu de celui qui se produit dans la première période de suspension, immédiatement après l'appui du pied droit.

» *En résumé*, la trajectoire de la hanche dans la course présente, pendant un pas complet, la forme d'une ligne sinueuse à quatre courbures, à savoir : deux concavités tournées en haut, correspondant aux appuis, ainsi qu'à des minima d'élévation, et deux convexités correspondant aux suspensions et à des maxima d'élévation de la masse du corps au-dessus du sol.

» La *trajectoire du genou* résulte de celle de la hanche modifiée par les effets de la flexion de la cuisse, dont le déplacement angulaire peut atteindre 90°.

» Enfin, la *cheville*, pendant le lever du pied, suit une trajectoire qui résulte de la composition de celle du genou avec les mouvements angulaires de la jambe sur la cuisse. Durant la première moitié du lever, le genou est fléchi d'autant plus que l'allure est plus rapide; certains coureurs arrivent ainsi à faire toucher du talon la partie basse des fessiers.

» Dans la seconde moitié de l'appui, la jambe s'étend sur la cuisse; mais, au moment où le pied touche le sol, elle est encore légèrement fléchie et presque verticale.

» La trajectoire de la cheville, au lever, présente d'abord une grande élévation en se raccordant avec la courbe ascendante engendrée par le déroulement du pied à l'appui. A partir de ce moment, cette trajectoire s'abaisse; elle présente un point d'inflexion vers le milieu du pas et, finalement, rase le sol jusqu'au moment du poser. Le pied, qui était dans l'extension à la fin de l'appui, se fléchit dans la seconde moitié du pas et s'étend de nouveau au moment du poser.

» Le bassin exécute, autour de son axe transversal, des oscillations peu prononcées; mais il a des mouvements de rotation plus étendus autour

d'un axe vertical qui passerait par la tête fémorale du membre à l'appui. L'effet de cette rotation est d'augmenter la vitesse de la hanche au lever.

» On a vu plus haut comment ces oscillations amènent dans la trajectoire de la hanche certaines dissemblances, suivant que l'on considère les inflexions correspondant à l'appui du pied droit ou celles qui concordent avec l'appui du pied gauche.

» Ces irrégularités ne se produisent pas dans la trajectoire du centre de gravité, non plus que dans celle du sommet de la tête et, en général, de tous les points situés dans le plan médian et qui reçoivent de l'action de chacun des membres des impulsions alternatives mais identiques.

» On doit encore noter que le poser du pied se fait toujours en avant de la verticale qui passe par l'articulation de la hanche, et que la distance qui sépare deux appuis du même pied, distance qui constitue la longueur du pas, dépend du degré d'extension du membre et de son inclinaison au moment de l'impulsion finale, beaucoup plus que de son degré d'allongement au moment du poser.

» Les appuis du pied se font symétriquement de part et d'autre d'une ligne moyenne dans la direction de la progression. Plus la course est rapide et plus les empreintes se rapprochent de cette ligne, sur laquelle les talons finissent par se poser. En même temps, l'angle d'ouverture du pied diminue et la pointe se porte en dedans, à des degrés divers qui semblent dépendre de la structure anatomique du sujet observé et probablement aussi à l'exagération des mouvements de torsion du bassin.

» Quelle que soit la vitesse de la course, la forme des différentes trajectoires que nous venons d'étudier conserve ses principaux caractères. Celle du centre de gravité du corps est de plus en plus tendue à mesure que la course est plus rapide; elle tend à s'approcher d'une ligne droite parallèle au plan du terrain. »

« Les Notes que nous avons publiées sur la cinématique et sur la dynamique de la marche et de la course ont pour complément nécessaire un parallèle entre ces deux allures. De nombreuses différences existent entre la marche et la course, et si, dès longtemps, l'observation a montré que cette dernière se caractérise par des instants de suspension où le corps est entièrement détaché du sol, il y a d'autres caractères non moins importants à connaître, mais que l'œil ne pouvait guère saisir, tandis qu'ils se révèlent clairement par les chrono-photographies ou par l'emploi du dynamographe. De cet ordre sont les inflexions diverses des trajectoires de chaque point du corps, les accélérations et ralentissements de sa masse,

M. et D.

1.

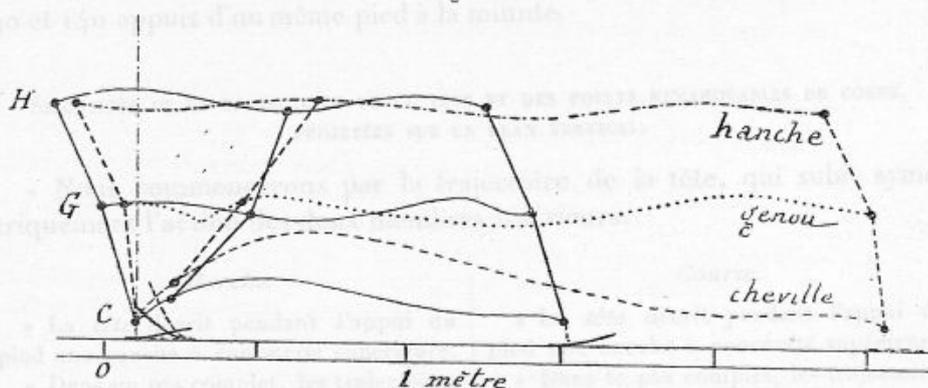
(6)

la durée des doubles appuis des pieds ou des temps de suspension. Ces différences ont leur raison d'être dans les conditions mécaniques de la locomotion, dans la force musculaire du sujet en expérience, dans les proportions des différentes parties de son corps, dans l'importance de sa masse ou des charges qu'il porte. Elles dépendent aussi de la nature et de l'inclinaison du terrain; mais nos expériences n'ont été faites, jusqu'ici, que sur un sol ferme, lisse et parfaitement horizontal.

» Ces comparaisons ont une très grande importance pratique, aussi devra-t-on les étendre non seulement au parallèle de la marche et de la course, mais aux différents types de marche et de course : car il est nécessaire, au point de vue de la gymnastique, de savoir définir les allures qui donnent le maximum d'effet utile, c'est-à-dire la plus grande vitesse avec la moindre dépense de travail. Les artistes, de leur côté, trouveront dans ces études le moyen de représenter les attitudes qui expriment la lenteur ou la vitesse des allures, le calme ou l'énergie des mouvements.

» Dans le parallèle qui va suivre nous n'aurons que peu d'expressions nouvelles à introduire, et nous userons autant que possible des termes consacrés par l'usage ou de ceux que nous avons définis dans les Notes précédentes. Ainsi, nous distinguerons les pressions du pied sur le sol en *pression normale* et *pression tangentielle*; cette dernière pourra être positive si elle s'exerce d'avant en arrière, de façon à accélérer la progression, et négative quand elle s'exercera d'arrière en avant, de manière à ralentir la vitesse du marcheur.

Fig. 1.



Attitudes, longueur de pas et angle de déroulement du membre inférieur droit dans la marche et dans la course. Les lignes ponctuées correspondent à la course.

» Nous appellerons *angle d'appui* celui que le rayon du membre fait avec la verticale qu'on élèverait du sol en avant de la jambe; l'*angle de lever*

sera celui que fait le rayon du membre avec la même verticale située en arrière de la jambe quand elle va quitter le sol. La somme de ces deux angles sera désignée sous le nom d'*angle de déroulement* du membre inférieur.

A. PÉRIODE D'APPUI DU PIED. ATTITUDES ET DÉROULEMENT DU MEMBRE INFÉRIEUR.

Marche.

Le *pied* touche le sol par le *talon* , quelle que soit la longueur du pas.

La *jambe* , au moment du poser, est *oblique* en avant et presque étendue.

Le *genou* , au moment où le rayon du membre passe par la verticale, est *étendu* dans la marche lente, peu *fléchi* dans la marche rapide.

L' *angle d'appui* est plus grand que dans la course et reste constant, pour un même sujet, aux différentes vitesses de la marche.

L' *angle de lever* est plus petit que dans la course.

L' *angle de déroulement* (50° environ) varie dans le même sens que la longueur du pas.

Course.

Le *pied* touche le sol par la *pointe* , si le pas est court; par la *plante* , si le pas est plus long; par le *talon* , si le pas est d'une grande longueur.

La *jambe* , au moment du poser, est *verticale* et *fléchi* sur la cuisse.

Le *genou* , au moment où le rayon du membre passe par la verticale, est toujours *fléchi* , et cela d'autant plus que la course est plus rapide.

L' *angle d'appui* est plus petit que dans la marche et reste constant aux différentes vitesses de l'allure.

L' *angle de lever* est plus grand que dans la marche, surtout quand le pas est allongé.

L' *angle de déroulement* est sensiblement le même que dans la marche; mais, en raison du temps de suspension pendant lequel le corps progresse, il n'y a pas de relation entre cet angle et la longueur du pas.

B. PÉRIODE DE LEVER DU PIED. ATTITUDES ET OSCILLATIONS DU MEMBRE INFÉRIEUR.

» Dans la marche comme dans la course, les membres sont d'autant plus *fléchis* que leur période d'oscillation doit être plus brève; il y a là une condition de moindre travail qu'on observe également pour l'oscillation du bras. Dans les deux allures, la vitesse du pied présente les mêmes phases de variation: elle atteint son maximum au dernier tiers de la phase d'oscillation; mais des différences apparaissent quand on compare, dans ces deux allures, la vitesse moyenne du pied à celle du corps.

Marche.

La *vitesse moyenne du pied* est *supérieure* au double de la vitesse de progression du corps.

Dans la marche, en effet, la *durée du double appui* doit se retrancher de celle du demi-pas pour constituer la période d'oscillation.

» On s'explique alors comment, pour une même vitesse de progression, la *vitesse relative* du pied par rapport à celle de la masse du corps est plus petite dans la course que dans la marche, puisque, à cadence égale, la durée de l'oscillation est plus grande dans la course que dans la marche.

» Ces différences deviendront facilement intelligibles si l'on se reporte à la *fig. 2*.

DURÉE RELATIVE DES APPUIS ET LEVERS DANS LA MARCHÉ ET DANS LA COURSE.

» Nous aurons à considérer des actes communs aux deux allures, les appuis et levers proprement dits, et des actes propres à chacune d'elles. La marche seule présente le *double appui*, et la course seule offre des *instants de suspension*. La *fig. 2* montre comment varient ces éléments de la durée du pas dans les deux allures, avec des rythmes croissant de 5 en 5 pas, entre 40 et 140 appuis d'un même pied à la minute.

SINCOSITÉS DE LA TRAJECTOIRE DE LA TÊTE ET DES POINTS REMARQUABLES DU CORPS, PROJÉTÉES SUR UN PLAN VERTICAL.

» Nous commencerons par la trajectoire de la tête, qui subit symétriquement l'action des deux membres inférieurs.

Marche.

» La *tête* décrit pendant l'appui du pied une courbe à *convexité* supérieure.

» Dans un pas complet, les trajectoires produites par l'appui alternatif des pieds se suivent *sans intervalle*.

» Le *ralentissement* de la progression, lié à chaque appui des pieds sur le sol,

Course.

La *vitesse moyenne du pied* est *inférieure* au double de la vitesse de la progression du corps.

Dans la course, en effet, la *durée de la suspension du corps* s'ajoute à la durée du demi-pas pour constituer celle de l'oscillation.

Course.

» La *tête* décrit pendant l'appui du pied une courbe à *concavité* supérieure.

» Dans le pas complet, les trajectoires produites par l'appui alternatif des pieds sont *séparées* par un arc parabolique représentant la suspension, et qui se produit suivant les lois du saut.

» Le *ralentissement* de la progression, liée à chaque appui des pieds sur le sol,

(9)

coïncide avec la *convexité* de trajectoire de la tête.

» Le *niveau* moyen des oscillations de la tête dans le plan vertical est plus haut.

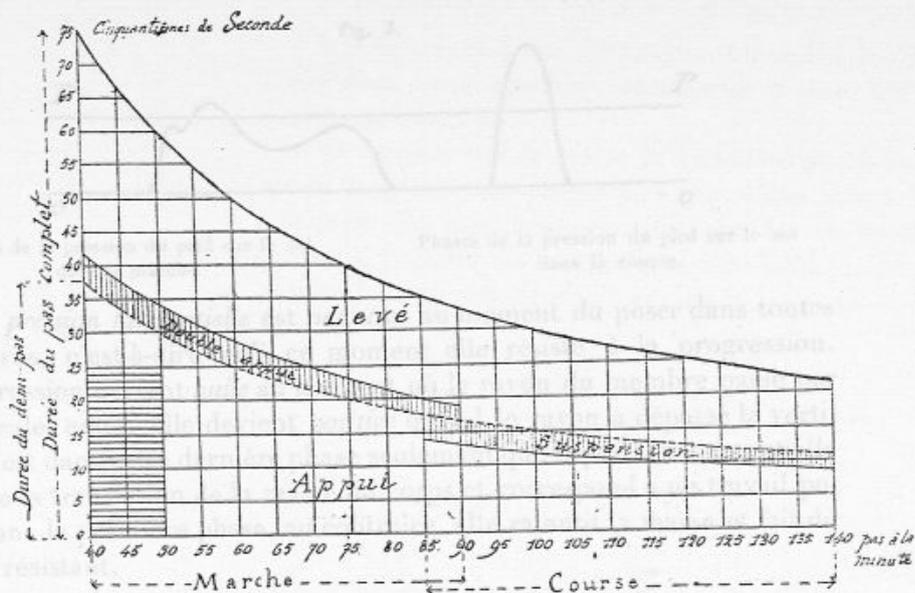
» La *longueur du pas* règle l'amplitude des oscillations verticales; ces oscillations croissent avec cette longueur.

coïncide avec la *concavité* de la trajectoire de la tête.

» Le *niveau* moyen des oscillations de la tête dans le plan vertical est plus bas.

» La *longueur du pas* est indépendante de l'amplitude des oscillations verticales; celles-ci tendent plutôt à diminuer d'amplitude quand le pas s'allonge.

Fig. 2.



Les ordonnées totales représentent en cinquantièmes de seconde la durée totale du pas complet; celle du demi-pas est limitée par une courbe ponctué. La durée des appuis est limitée en haut par une ligne formée de traits successifs. On voit que, dans la marche, la durée de l'appui excède le demi-pas de toute la longueur du double appui. Dans la course, au contraire, la durée de l'appui est inférieure à celle du demi-pas de toute la durée de la suspension.

» L'instant du maximum de l'oscillation correspond à l'appui d'un pied.

» La verticale qui passe par le point d'appui est toujours située en arrière du maximum de l'oscillation de la hanche.

» A mesure que la vitesse augmente, la trajectoire de la hanche porte son maximum plus en avant de la verticale élevée du point d'appui.

» L'instant du maximum de l'oscillation correspond à la suspension.

» La verticale qui passe par le point d'appui est toujours située en arrière du minimum de l'oscillation de la hanche.

» A mesure que la vitesse augmente, la trajectoire de la hanche porte son minimum plus en avant de la verticale élevée du point d'appui.

SINUOSITÉS DE LA TRAJECTOIRE DU SOMMET DE LA TÊTE ET DU MILIEU DU BASSIN, PROJETÉES SUR UN PLAN HORIZONTAL. — PISTES ET EMPREINTES DES PIEDS.

» A toutes les allures, l'alternance des appuis des membres droit et gauche oblige le tronc à sortir du plan vertical de progression; l'écartement des empreintes des pieds sur le sol est en rapport avec les oscillations horizontales du corps. Mais l'amplitude de ces oscillations varie inversement pour la marche et pour la course, à mesure que la vitesse de progression augmente.

Marche.

Plus la marche est rapide et plus les pas sont longs, plus les oscillations latérales de la tête et du bassin *augmentent* d'amplitude.

Course.

Plus la course est rapide et le pas allongé, plus les trajectoires de la tête et du bassin *perdent leurs oscillations* et tendent à se rapprocher d'une ligne droite.

» Quant à l'écartement des empreintes, il diminue, dans les deux allures, avec la longueur du pas. En même temps, l'angle que forme l'axe du pied avec la ligne moyenne de progression, ou angle d'ouverture du pied, tend à diminuer aussi.

LOI DES LONGUEURS DE PAS ET DES VITESSES DE PROGRESSION.

» Dans toutes les allures, les deux moitiés d'un pas complet sont souvent de longueurs inégales : la plus longue correspond à l'action de la jambe dont les muscles sont le plus exercés. On sait en effet que chaque sauteur, pour prendre son élan, se sert de préférence de l'une des jambes.

» La rapidité de la cadence des pas influe sur leur longueur, dans la marche comme dans la course; elle influe aussi sur la vitesse de la progression, mais agit diversement dans ces deux allures.

Marche.

La longueur du pas *croît* avec la cadence *jusqu'à un maximum* qui correspond à 75 pas complets à la minute, puis diminue pour des cadences plus rapides.

La vitesse de progression augmente avec la rapidité de la cadence *jusqu'au nombre de 85 pas complets* à la minute; elle diminue ensuite si la cadence s'accélère ⁽¹⁾.

Course.

La longueur du pas croît toujours à mesure que la cadence s'accélère.

La vitesse de progression augmente *indéfiniment* avec la rapidité de la cadence, et tend vers une limite qui semble voisine de 10^m par seconde.

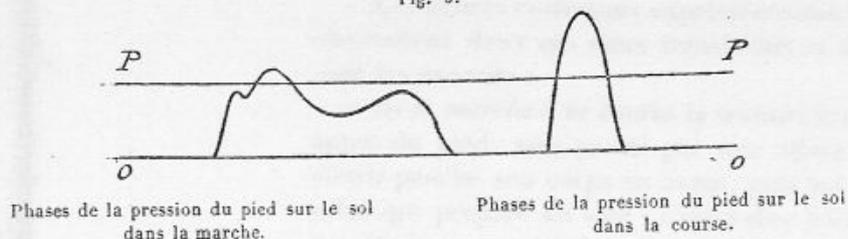
(1) Voir la Note du 3 novembre 1884.

LOI DES PRESSIONS NORMALE ET TANGENTIELLE DU PIED SUR LE SOL.

La courbe de la pression normale du pied *oscille de part et d'autre* de la ligne du poids ⁽¹⁾, qu'elle dépasse au début d'autant plus que la cadence est plus rapide, et au-dessous de laquelle elle tombe pour se relever à la fin de l'appui. Ce dernier maximum décroît à mesure que la cadence s'accélère.

La courbe de la pression normale n'a *qu'une seule courbure* et un seul maximum toujours supérieur à la ligne du poids, et d'autant plus élevé que la cadence est plus rapide.

Fig. 3.



» La *pression tangentielle* est *négative* au moment du poser dans toutes les allures, c'est-à-dire qu'à ce moment elle résiste à la progression. Cette pression devient *nulle* au moment où le rayon du membre passe par la verticale; enfin, elle devient *positive* quand le rayon a dépassé la verticale. C'est dans cette dernière phase seulement que la pression tangentielle accélère la translation de la masse du corps et correspond à un travail positif; dans la première phase, au contraire, elle ralentit la masse et fait du travail résistant.

VARIATIONS DU TRAVAIL MÉCANIQUE DÉPENSÉ DANS LA MARCHÉ ET DANS LA COURSE.

» La méthode de calcul du travail dépensé dans la locomotion humaine a été exposée dans une Note précédente ⁽²⁾; elle est fondée sur la mesure des oscillations verticales imprimées à la masse du corps, sur celle des variations de sa vitesse horizontale, enfin sur le calcul de l'énergie nécessaire pour produire l'oscillation de la jambe pendant la durée de la suspension. On notera que les deux premiers éléments du travail sont fonctions de la longueur des pas et fonctions plus compliquées de la vitesse

⁽¹⁾ Voir les Notes des 8 et 15 octobre 1885.

⁽²⁾ Note du 9 novembre 1885.

(12)

de progression. En comparant les deux allures au point de vue du travail dépensé, on constate les différences suivantes :

Marche.

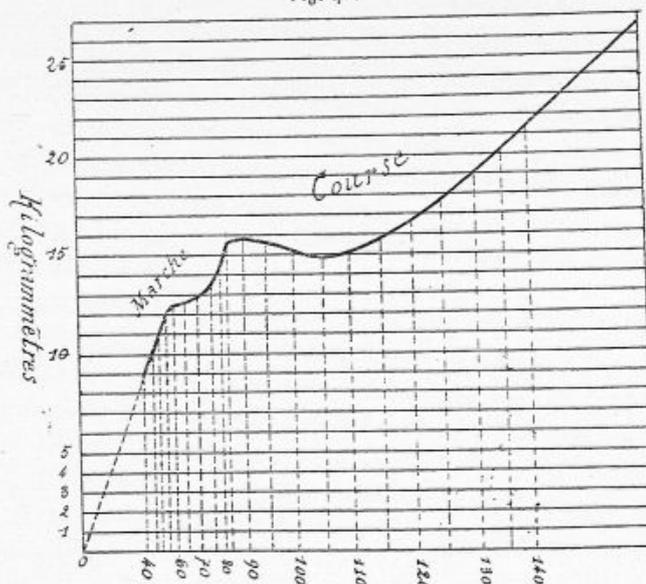
La dépense de travail croît toujours avec la vitesse de progression, et cet accroissement est très grand pour les allures qui dépassent les cadences normales de 55 à 65 doubles pas à la minute.

Course.

La dépense de travail pour une vitesse de progression peu supérieure à celle de la marche dépense plus de travail, mais la dépense *décroit* pour une course plus rapide et s'élève ensuite dans les limites indiquées par le Tableau suivant.

» C'est pour ces raisons que nous avons distingué dans les allures de l'homme des rythmes avantageux et des rythmes défectueux au point de

Fig. 4.



Courbe des variations du travail mécanique dépensé dans la marche et la course de l'homme en fonction de la vitesse de progression.

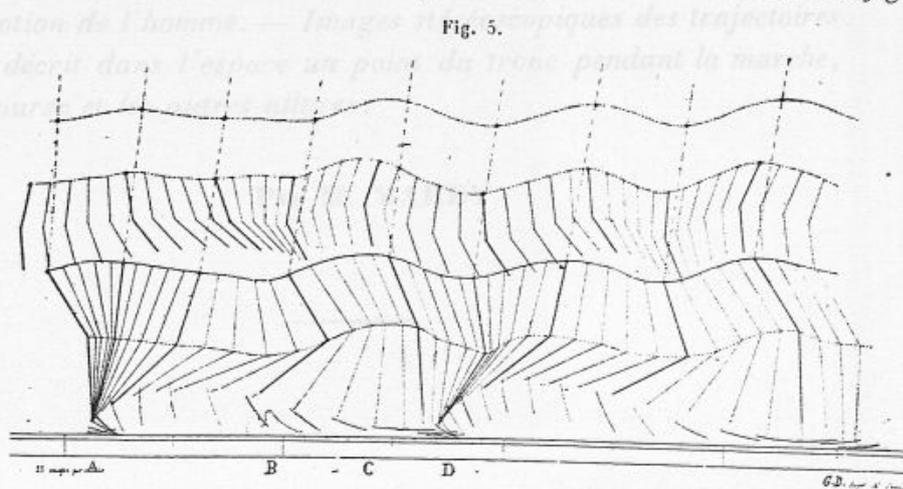
Les ordonnées indiquées entre la figure correspondent aux vitesses de progression qui s'observent à des cadences croissant de 5 en 5 pas à la minute entre 40 et 85 pas pour la marche et entre 85 et 140 pour la course.

vue de l'utilisation économique de la force musculaire, utilisation qui est le but final de nos études sur la locomotion.

TRANSITIONS DE LA MARCHÉ A LA COURSE ET DE LA COURSE A LA MARCHÉ.

» Les figures ci-dessous expriment tous les détails des mouvements qui s'exécutent dans ces deux transitions et dont les principaux caractères sont les suivants :

» *De la marche à la course* la transition se fait directement pendant un appui du pied, sans passer par une allure mixte. Le marcheur qui veut courir penche son corps en avant, puis fait un *appel* du pied semblable à celui qui prépare un saut : c'est-à-dire fléchit la jambe à l'appui et l'étend ensuite brusquement jusqu'à ce que le corps se détache du sol. La *fig. 5*



Transition de la marche à la course. Modifications qui s'observent dans les sinuosités des trajectoires en B au moment de la transition.

ne montre que les mouvements de la moitié droite du corps ; la transition se fait en B sur le pied gauche invisible, mais dont les réactions se font suffisamment sentir sur la moitié droite du corps. On voit que la flexion de la jambe au moment de son appui modifie immédiatement les trajectoires de la hanche et de la tête, en leur donnant les caractères propres à la course, c'est-à-dire la forme concave par en haut à la place de la convexité qui s'observait en A dans la marche. A la fin de cet appui, la brusque détente de la jambe projette le corps comme dans un saut, la suspension est obtenue en C ; un autre appui s'observe en D ; le régime de la course est régulièrement établi.

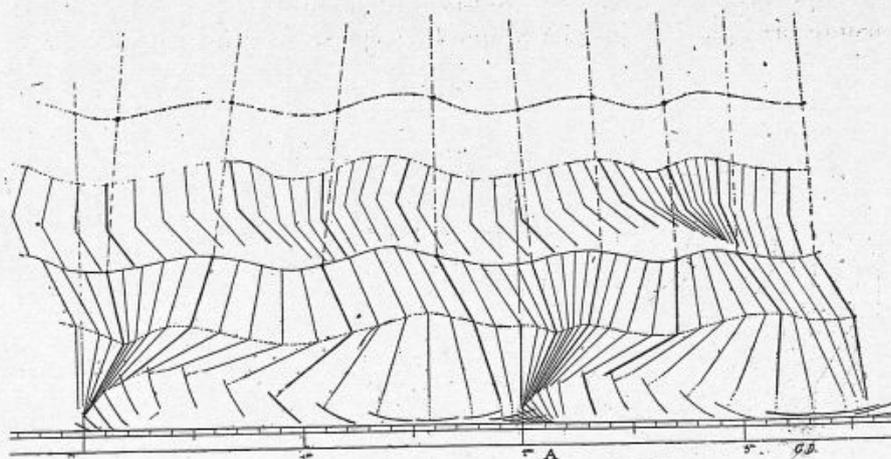
» *De la course à la marche* la transition est inverse (*fig. 6*) : le coureur ralentit sa vitesse en penchant le corps en arrière. L'appui prochain A est

(14)

un peu plus prolongé, le membre inférieur plie en faisant un travail résistant pour atténuer la vitesse; il se redresse ensuite sans brusquerie comme dans la marche.

» Pendant cet appui, la trajectoire de la hanche offre une forme mixte: concave d'abord comme dans la course, puis convexe comme dans la marche.

Fig. 6.

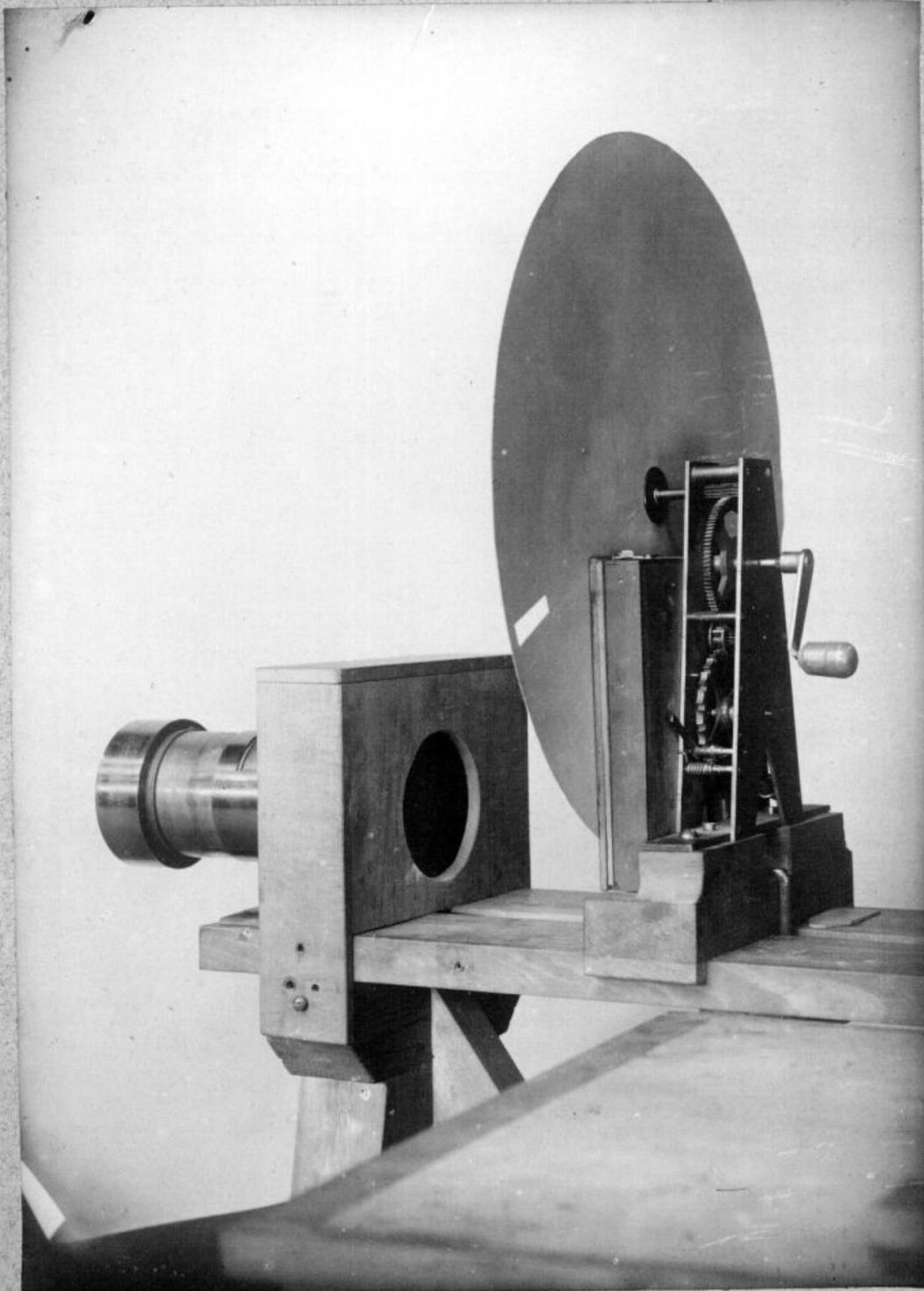
sans changement de rythme

Transition de la course à la marche; les sinuosités des trajectoires se modifient au moment de la transition A.

» A partir de ce moment, les actes qui se succèdent sont ceux de la marche ordinaire: le lever du pied droit correspond à un minimum des trajectoires de la tête et de la hanche, il se produit au moment où le pied gauche vient de toucher le sol; enfin le corps reprend l'inclinaison propre à l'allure de la marche.

» La série des actes exécutés dans cette transition est semblable à celle qui s'observe dans la chute qui suit un saut en longueur. »

Analyse des mouvements par la photographie

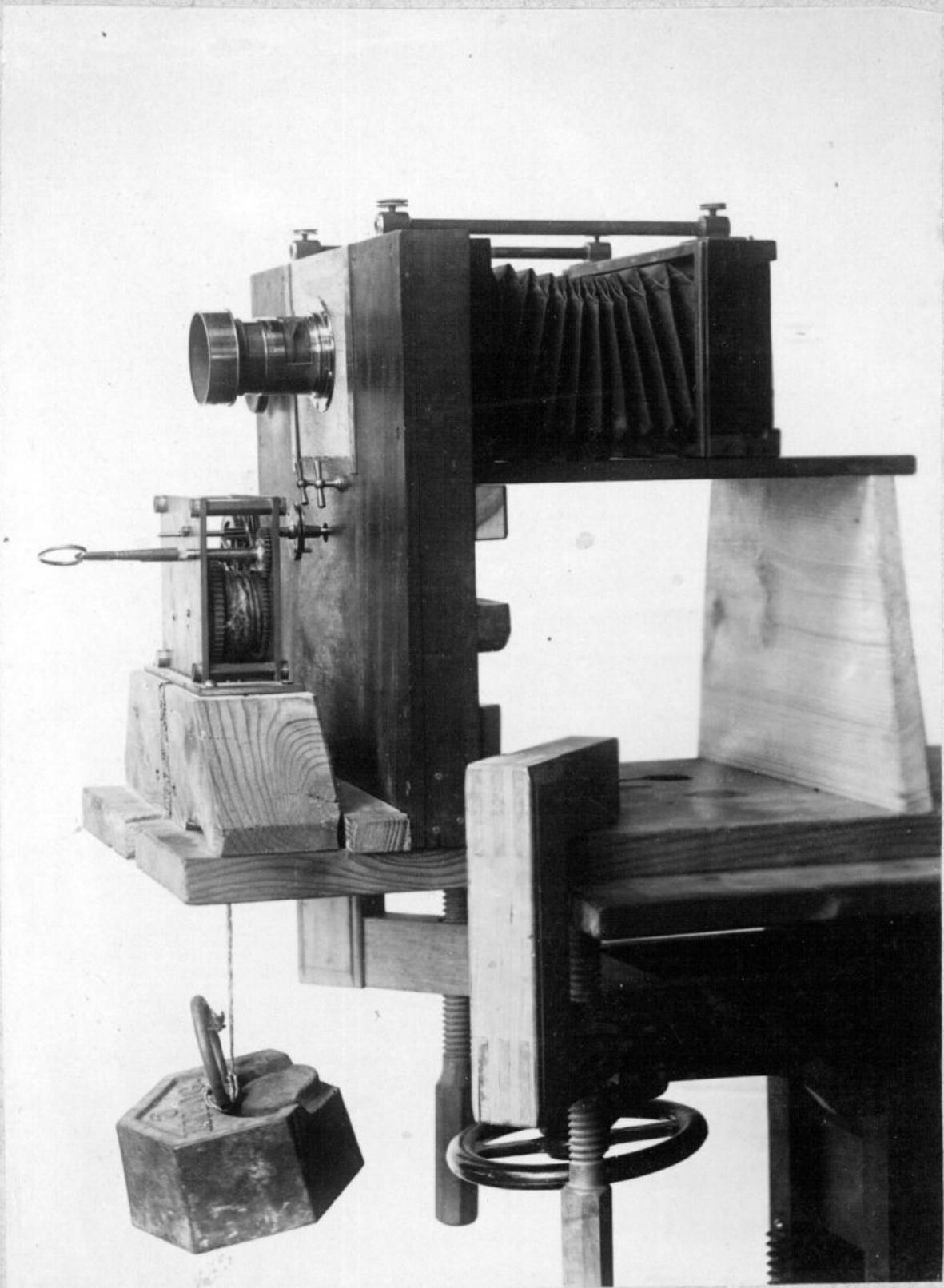


N° 89

Vue postérieure de l'appareil précédent montrant un des organes essentiels qui force la plaque sensible à tourner et à s'arrêter 24 fois pendant un tour complet. A chacun de ces arrêts correspond le passage de la fenêtre du disque éclairé.



Image d'un homme agitant une pièce
d'étoffe - temps de pose $\frac{1}{1000}$ de seconde
Cette image est obtenue au moyen de l'appareil précédent



N° 91

Appareil à disque rotatif muni d'un obturateur
entraîné par lui et donnant ainsi des images uniques pendant
des temps de pose très courts inférieurs au millième de seconde.

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. C;
séance du 2 juin 1885.

*Locomotion de l'homme. — Images stéréoscopiques des trajectoires
que décrit dans l'espace un point du tronc pendant la marche,
la course et les autres allures ;*

PAR M. MAREY.

« Il y a quinze ans environ, M. Carlet, aujourd'hui professeur à la Faculté des Sciences de Grenoble, entreprit, dans mon laboratoire, de déterminer la trajectoire qu'un point du tronc décrit dans l'espace pendant la marche.

» Une disposition mécanique, analogue à celle que j'avais employée précédemment pour inscrire les mouvements de l'aile de l'oiseau, servit à ces expériences. Celles-ci montrèrent qu'un point central, le pubis, décrit une courbe que l'on peut considérer comme inscrite dans une gouttière à convexité inférieure, au fond de laquelle se trouvent les minima et aux bords de laquelle sont tangents les maxima. La génératrice de ce demi-cylindre est parallèle à la direction de la marche; les minima correspon-

M.

dent au milieu de l'appui bilatéral et les maxima au milieu de l'appui unilatéral.

» La forme d'une telle courbe peut être très bien représentée par une figure solide faite d'un fil de métal tordu en sens divers. En regardant cette figure d'un point convenablement choisi, on peut, grâce à la perspective, en apprécier les inflexions suivant les trois dimensions de l'espace et même les représenter par le dessin. La difficulté que présente l'inscription mécanique d'un mouvement suivant trois dimensions, et l'impossibilité d'analyser par cette méthode les allures très rapides, m'ont engagé à recourir à la photographie pour la détermination des trajectoires dans l'espace.

» J'ai montré, dans une Note précédente (1), avec quelle facilité singulière la chrono-photographie exprime la trajectoire d'un point brillant fixé sur le corps d'un homme habillé de noir, et permet de suivre les inflexions de la courbe décrite, variables suivant l'allure que l'on observe.

» Mais, dans les images photographiques obtenues jusqu'ici, je cherchais à obtenir la projection des mouvements du corps sur un plan parallèle à celui dans lequel la marche s'effectue. Si cette disposition est la meilleure pour apprécier à leur valeur réelle les oscillations verticales du corps, ainsi que les accélérations et les ralentissements dans la progression, elle dissimule totalement les mouvements qui se produisent suivant la troisième dimension, c'est-à-dire dans le sens perpendiculaire au plan de la marche.

» Dans le courant de l'hiver dernier je fis plusieurs expériences pour photographier la trajectoire d'un point du tronc, en plaçant l'appareil de telle sorte que la perspective rendit sensibles les déplacements qui se produisent suivant les trois dimensions de l'espace.

» Un homme vêtu de noir et portant au niveau du sacrum une petite boule brillante marchait sur un terrain plat.

» En arrière et à deux mètres à gauche et au-dessus de l'axe de la marche, était braqué l'appareil chrono-photographique. L'image obtenue rendait sensibles les déplacements suivant les trois dimensions de l'espace. Toutefois, malgré la perspective, la figure n'était bien intelligible que pour ceux qui connaissaient d'avance la trajectoire; et encore, à la condition que les inflexions de cette trajectoire fussent symétriques. Il m'a semblé que la stéréoscopie devait rendre des figures de ce genre parfaitement intelligibles dans tous les cas.

(1) *Comptes rendus*, 7 août 1882.

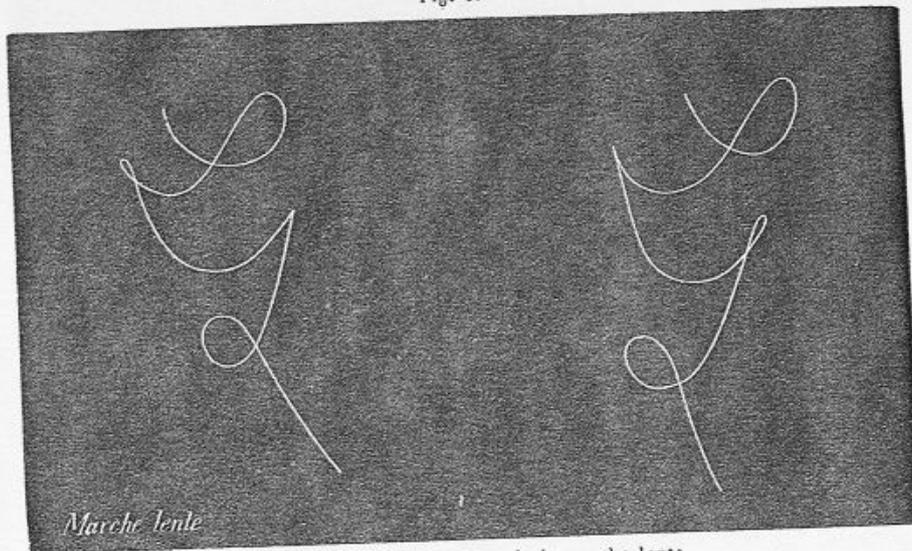
(3)

» Je substituai donc un appareil stéréoscopique à l'appareil photographique simple, et, plaçant au devant des objectifs un obturateur qui me permit de les ouvrir et de les fermer tous deux à la fois, je recueillis des trajectoires correspondant à un petit nombre de pas, dans la marche, la course et les différentes allures.

» Ces figures confirment pleinement les expériences de M. Carlet sur la trajectoire d'un point du tronc dans la marche; elles montrent, en outre, les variétés que présente la trajectoire d'un même point du corps aux autres allures. Vues au stéréoscope, elles donnent un relief parfait : on croirait avoir sous les yeux un fil de métal tordu en sens divers et répétant périodiquement les mêmes inflexions.

» Afin que le lecteur puisse juger de la netteté de cette sensation de relief, nous avons représenté dans la *fig. 1* les deux images stéréoscopiques correspondant à deux pas de marche lente.

Fig. 1.



Trajectoire stéréoscopique de la marche lente.

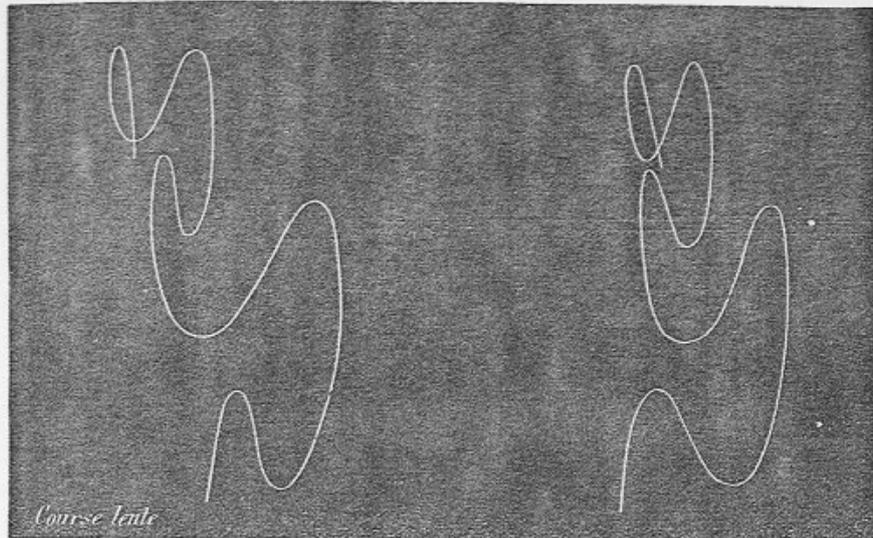
» Beaucoup de personnes ont acquis l'habitude de fusionner sans instrument deux images stéréoscopiques, et d'obtenir ainsi la sensation du relief; pour les autres, il sera facile de décalquer ces figures sur papier transparent et d'introduire les décalques dans le stéréoscope.

» Je n'insisterai pas sur les caractères particuliers de ces trajectoires; elles ne prennent, du reste, tout leur intérêt qu'autant qu'on les rattache

(4)

aux différents mouvements des membres dont elles constituent les *réactions*. Si je signale spécialement la représentation stéréoscopique de la trajectoire d'un point dans l'espace, c'est que cette méthode me paraît contenir la solution d'un grand nombre de problèmes cinématiques, fort difficiles sans

Fig. 2.



Trajectoire stéréoscopique de la course lente.

doute à résoudre autrement. Et, sans sortir du domaine de la Physiologie, on trouvera, dans la photographie stéréoscopique, le moyen d'analyser les réactions du cheval, les mouvements du corps de l'oiseau pendant le vol, etc.

» En effet, les réactions dures ou douces de certains chevaux à diverses allures ne tiennent certainement qu'à l'étendue ou aux inflexions plus ou moins brusques des mouvements du corps du cheval; déterminer la nature des mouvements qu'exécute un point brillant placé sur la selle d'un cheval, et établir la coïncidence des différentes inflexions de sa trajectoire avec les actions des membres, ce sera véritablement interpréter physiologiquement les *réactions du cheval*. Enfin, ces réactions qui se transmettent au cavalier sont certainement influencées, à leur tour, par les réactions du cavalier sur le cheval. Cette combinaison des effets de deux forces réagissant l'une sur l'autre était jusqu'ici inaccessible aux moyens d'observation connus; je me propose d'en faire prochainement l'objet de mes études.

(5)

» Enfin, toutes les fois que cela est nécessaire, on peut introduire dans ces courbes la notion du temps par les procédés ordinaires de la chrono-photographie, c'est-à-dire au moyen d'éclairages intermittents. La trajectoire prend alors l'aspect d'une courbe ponctuée dans laquelle l'intervalle entre deux points successifs correspond à un cinquantième de seconde. »

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, t. 1, séances des 8 et 15 octobre 1883.

De la mesure des forces dans les différents actes de la locomotion.

PAR M. MAREY.

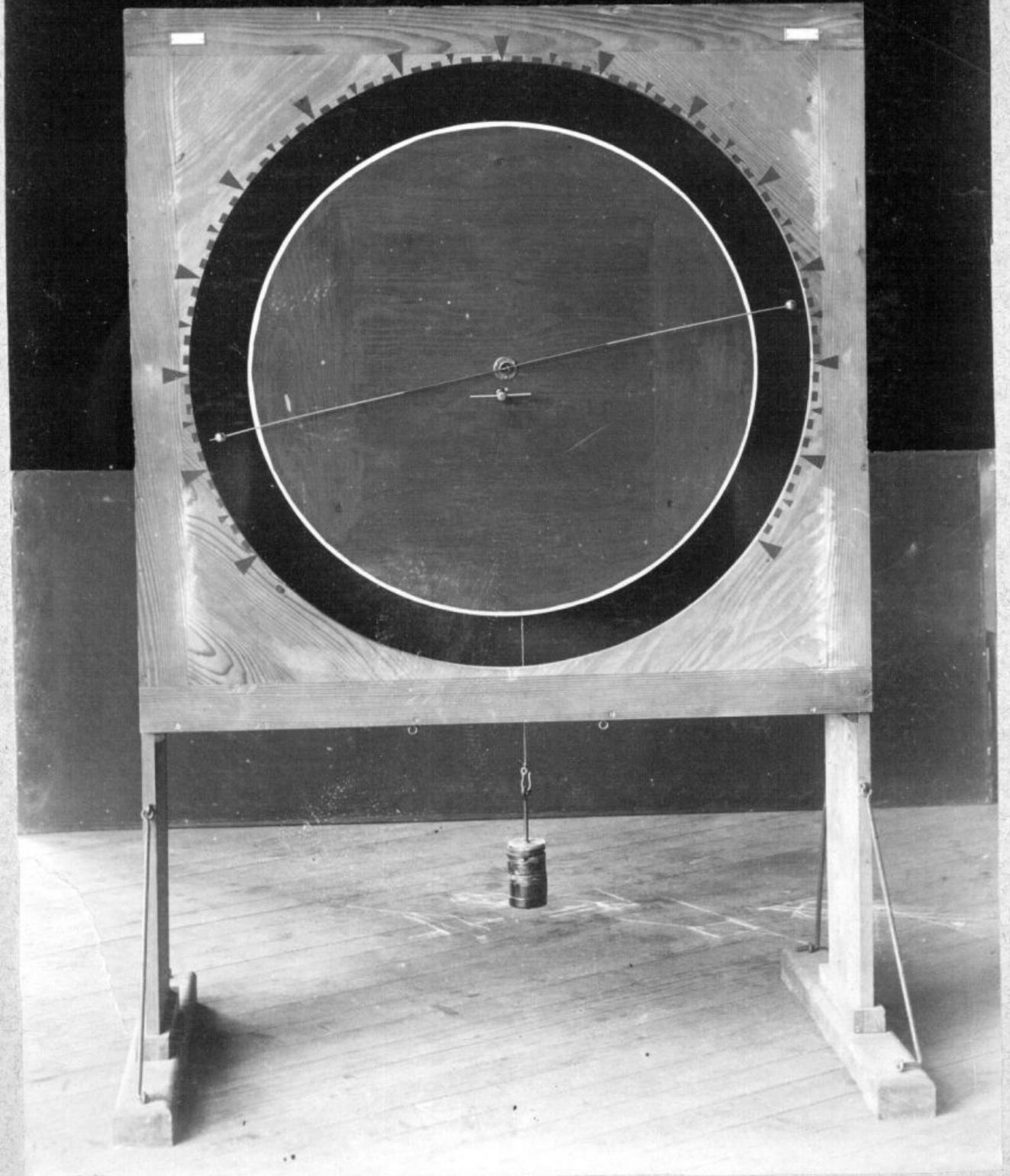
« La photographie instantanée dont j'ai indiqué certaines applications nouvelles, pour l'analyse des actes de la locomotion animale, est tous les éléments nécessaires à la connaissance de cette force. Elle ne nous fait connaître que les directions qui sont prises par le corps ; ainsi, la trajectoire décrite dans l'espace par un point du corps, la vitesse que ce point possède à chaque instant, sont rigoureusement définies sur la plaque photographique par des points successifs.

Gauthier-Villars IMPRIMEUR-LIBRAIRE DES COMPTES RENDUS DES SEANCES DE L'ACADEMIE DES SCIENCES.
Paris. — Quai des Augustins, 55.



N: 72

Fusil de chasse disposé de façon à prendre l'image
du l'objet visé au moment de la détente des chiens.



N° 92
*Appareil destiné à la mesure des durées absolues des
temps d'éclairement dans les obturateurs photographiques*

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCVI,
séances des 8 et 15 octobre 1883.

De la mesure des forces dans les différents actes de la locomotion;

PAR M. MAREY.

« La photographie instantanée dont j'ai indiqué certaines applications nouvelles, pour l'analyse des actes de la locomotion animale, ne donne pas tous les éléments nécessaires à la connaissance de cette fonction des êtres vivants. Elle ne nous fait connaître que les éléments qui se rapportent à la Cinématique : ainsi, la trajectoire décrite dans l'espace par un point donné du corps, la vitesse que ce point possède à chaque instant, sont géométriquement définies sur la plaque photographique dans une série d'images successives.

» Mais ce qu'il faut connaître encore, c'est la force d'impulsion périodiquement imprimée à notre corps par nos actions musculaires : ce sont les variations d'intensité, de direction et de durée de cette force, cause immédiate des mouvements que les photographies nous font connaître.

» Une nouvelle méthode d'exploration est alors nécessaire ; il faut disposer d'un appareil dynamométrique indiquant à la fois les composantes verticale et horizontale de l'impulsion de nos muscles avec toutes les

M.

phases de leur intensité aux différents instants. Voici la disposition qui permet de réaliser ces mesures.

» L'organe essentiel du dynamomètre inscripteur que j'emploie est une poche de caoutchouc pleine d'air et susceptible de céder aux pressions qu'elle supporte. L'air de cette poche communique par un tube avec un *tambour à levier inscripteur* ⁽¹⁾. De ce genre étaient les semelles dynamométriques appliquées sous la chaussure, dans les expériences que j'ai faites autrefois sur la marche de l'homme.

» Pour remédier à l'insuffisance et à certaines imperfections de ces appareils, j'ai construit un dynamomètre inscripteur avec le concours de M. Demeny, préparateur à la Station physiologique du Collège de France, et de M. Otto Lund, mécanicien attaché à cet établissement. Voici la disposition de l'appareil.

» Le réservoir à air compressible affecte la disposition suivante. C'est un tube de caoutchouc à parois épaisses et roulé en spirale aplatie. L'extrémité centrale de ce tube est fermée; l'extrémité périphérique est ouverte; elle se met en rapport avec le tube d'un tambour à levier inscripteur. Cette spirale est soudée à deux feuilles de caoutchouc; le tout forme un disque aplati qui peut, sans s'écraser entièrement, supporter une pression assez forte.

» Plaçons ce disque sur le sol et recouvrons-le d'une planchette de bois. Si nous chargeons cette planchette de 1^{kg}, le disque subit un léger aplatissement; une partie de l'air qu'il renferme passe dans le tambour à levier et en élève le style à une certaine hauteur. Un second kilogramme, placé sur la planchette, comprime davantage le disque et soulève le style d'une nouvelle quantité. Ce style exprimera donc, par sa hauteur plus ou moins grande, les variations de la pression exercée sur le dynamomètre. Enfin, on inscrit les mouvements du style sur un cylindre tournant, ce qui donne une courbe dont les coordonnées correspondent, à chaque instant, à la valeur de la pression.

» Dans le dynamomètre que nous avons construit, neuf spirales de caoutchouc sont disposées, par séries de trois, sur une planchette carrée; toutes les spirales communiquent, par un tube collecteur, avec un tambour à levier inscripteur. Une autre planchette semblable recouvre ces spirales et est réunie, par quatre tiges boulonnées, à la planchette inférieure. L'ensemble de ces pièces constitue le dynamomètre inscripteur des

(1) Voir la *Méthode graphique*, p. 446.

pressions normales; nous l'appellerons *la tablette dynamométrique*. Toute pression exercée sur cette tablette produit une courbe dont les ordonnées sont positives.

» Les composantes horizontales des pressions obliques appliquées au dynamomètre s'inscrivent au moyen d'une disposition imaginée par M. Demeny.

» La tablette manométrique repose sur une série de galets et est guidée entre deux rouleaux qui ne lui permettent de se mouvoir que suivant une seule ligne, soit dans un sens, soit dans l'autre. Ces mouvements sont ceux que le pied d'un homme qui marche imprimera, soit en avant, soit en arrière, à la tablette sur laquelle il posera le pied. Ils sont très faibles à cause de la résistance du cylindre en caoutchouc qu'ils doivent comprimer; ils se transmettent à un tambour à air, puis à l'appareil inscripteur, par le mécanisme déjà indiqué ci-dessus.

» Cet instrument indique donc, à chaque instant, l'intensité des composantes verticale et horizontale de l'impulsion d'un membre sous une incidence quelconque ne dépassant pas l'angle de frottement.

» Théoriquement, si les déviations des styles inscripteurs sont proportionnelles à l'intensité des efforts et si les indications dynamométriques des pressions perpendiculaires et tangentielles au plan de l'instrument sont comparables entre elles, on peut reconstituer avec sa grandeur et sa direction la valeur de l'impulsion du pied qui, dans la marche ou la course, s'appuie sur le dynamomètre. En pratique, cet instrument ne donnant pas encore des courbes dont les ordonnées soient exactement proportionnelles à l'intensité des pressions exercées, nous ne lui demanderons que l'indication du sens dans lequel ces pressions se produisent. Cela suffit déjà pour faire des observations curieuses sur la façon dont les forces musculaires agissent dans la marche.

» Enfin, comme certains autres actes de la locomotion exigent qu'on mesure des efforts de traction, nous avons construit pour cet usage un dynamomètre basé sur le même principe, mais un peu modifié pour ces nouveaux besoins.

» A. *De l'appui des pieds sur le sol.* — Lorsqu'un poids est placé sur le dynamomètre, l'aiguille de l'instrument inscripteur s'élève à une certaine hauteur et s'y arrête, indiquant une pression positive constante qu'elle conserve indéfiniment. Mais, si un homme ou un animal est placé dans les mêmes conditions, pour peu qu'il ne se tienne pas complètement immobile, on voit le style inscripteur agité d'oscillations continues. Celles-ci expri-

ment que la force avec laquelle les pieds pressent sur le sol varie continuellement. Ces variations, tantôt positives et tantôt négatives, tiennent aux réactions des contractions musculaires dont les effets, tantôt s'ajoutent à ceux de la pesanteur et tantôt s'en retranchent. Le dynamomètre inscripteur permet de déterminer les différents actes qui donnent lieu à ces deux sortes de réactions.

» *Lorsqu'un acte musculaire a pour effet d'élever le centre de gravité de notre corps, ses réactions se transmettent de proche en proche à nos extrémités inférieures et créent un accroissement de pression positive sur le dynamomètre.*

» Ainsi, quand nous sommes accroupis et que nous nous relevons par l'extension de nos jambes ou bien lorsque, étant debout, nous nous élevons sur la pointe des pieds, dans ces deux cas, le dynamomètre accuse un accroissement de la pression verticale de nos pieds sur le sol. Ce surcroît de pression est d'autant plus intense que notre élévation est plus rapide.

» *Cet effet est suivi d'une action de sens inverse quand le mouvement d'élévation se ralentit, car alors la masse du corps animée d'une vitesse ascendante tend par son inertie à continuer son chemin en sens inverse de la pesanteur. Plus l'élévation a été brusque, plus l'effet de cette vitesse ascensionnelle est intense, il s'accuse au dynamomètre par une diminution de pression.*

» Enfin cette diminution de pression cesse quand notre vitesse est éteinte, et nous n'exerçons plus sur le dynamomètre que la pression qui dépend de notre pesanteur.

» La série des variations de pression que nous venons d'indiquer est exprimée dans la *fig. 1*, courbe A, par les inflexions successives de la courbe tracée. 0 correspond à la ligne tracée quand le dynamomètre n'est pas chargé, 1 exprime la pression positive due à notre seule pesanteur; 2 est l'accroissement de pression positive quand nous nous soulevons avec vitesse par le redressement de nos jambes; 3 correspond à la variation négative ou à la diminution de notre pression sur le sol par notre accélération négative qui, nécessairement, précède l'arrêt; enfin 4 est le retour de l'instrument au niveau qui correspond au poids de notre corps.

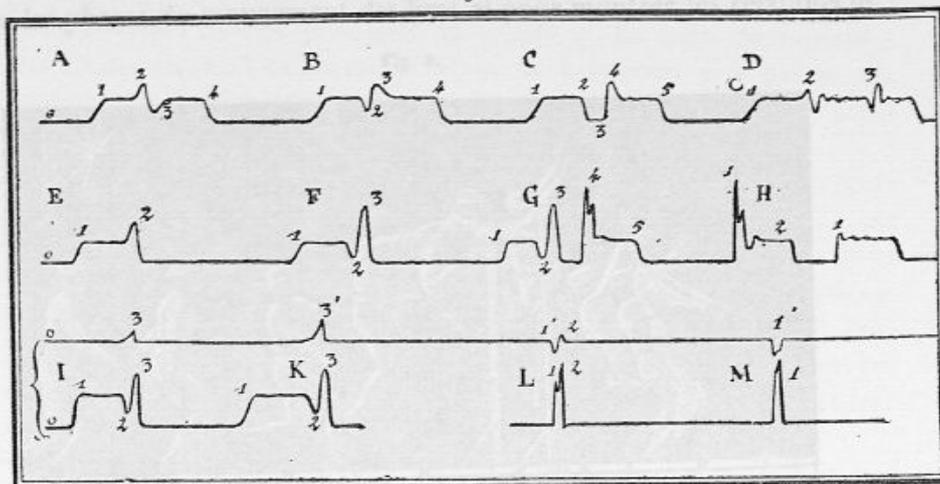
» Les mouvements des bras et ceux de la tête, lorsqu'ils s'accomplissent dans le sens vertical, donnent lieu à des réactions semblables, mais plus faibles. Ainsi, les bras étant abaissés, si on les élève brusquement, on constate, au moment de leur élévation, une augmentation de la pression des pieds sur le sol. Quand le mouvement ascensionnel s'arrête, la pression sur le dynamomètre diminue et tombe au-dessous du niveau qui correspond à

(5)

notre poids. Enfin, cet effet disparaît et l'instrument remonte au niveau qui exprime notre poids.

» De même, en tenant d'abord la tête fléchie et le menton appuyé contre la poitrine, si nous contractons soudainement les muscles postérieurs

Fig. 1.



du cou, la tête se relève brusquement et la réaction qui se produit s'accuse au dynamomètre par une pression positive, suivie, comme toujours, d'une variation inverse.

» Comme corollaire des expériences qui précèdent, nous pouvons conclure que *tout acte musculaire qui a pour effet d'abaisser notre centre de gravité produit une réaction qui diminue la pression de nos pieds sur le sol et s'accuse par un abaissement de la courbe du dynamomètre. Cet effet est suivi d'une variation de sens inverse due à la diminution de la vitesse acquise dans le mouvement d'abaissement.*

» L'expérience justifie complètement les propositions énoncées ci-dessus. Ainsi la courbe B est obtenue dans les conditions suivantes : 1 exprime le poids seul d'un homme monté sur le dynamomètre; en 2, les jambes sont fléchies et le centre de gravité s'abaisse : pendant ce temps la pression des pieds sur le sol est diminuée; en 3, le mouvement de flexion des jambes cesse, et la vitesse acquise du corps donne naissance à une variation positive.

» Si la flexion des jambes est assez brusque, le manomètre indique une pression nulle, car le corps se détache du sol pendant un instant. En effet, l'abaissement de notre corps sous l'action de la pesanteur a une certaine

M.

I.

vitesse déterminée : c'est le mouvement uniformément accéléré de tous les corps qui tombent. Or, si pendant un sixième de seconde par exemple, tandis que notre corps partant du repos ne tombe que de $0^m,13$, nos jambes, en se fléchissant, se raccourcissent de $0^m,30$; il existera à la fin de cet instant un intervalle de $0^m,17$ entre les pieds et le sol, et le dynamomètre ne subira aucune pression. Ainsi, dans la courbe C, 1 exprime le poids du corps; 2 la diminution de pression produite par la flexion brusque des jambes; 3 correspond au temps pendant lequel le dynamomètre est à zéro et le corps détaché du sol. Après cela, le corps continuant sa chute, les pieds rencontrent le dynamomètre qui, sous l'influence de la vitesse acquise, reçoit une pression positive 4, plus forte que celle qui tient à l'action de notre poids; 5 correspond au poids du corps.

» Pour cette flexion brusque des membres inférieurs, la contraction des muscles des jambes, prenant son point d'appui sur la masse du corps suspendue et tombant, doit produire une réaction qui accélère un peu la chute en élevant le centre de gravité, mais pas assez toutefois pour empêcher qu'il y ait séparation complète des pieds d'avec le sol et cessation complète de l'action de notre poids sur le dynamomètre.

» La courbe D représente les deux sortes de réactions entièrement opposées que l'on observe suivant qu'on élève les bras ou qu'on les abaisse.

» Le n° 1 correspond au poids du corps; 2 aux effets d'une brusque élévation du bras. La première réaction est positive; une variation inverse due aux effets de la vitesse acquise vient ensuite et l'on voit souvent une série d'oscillations alternatives se produire avec des intensités décroissantes jusqu'à extinction du mouvement.

» Le n° 3 exprime le mouvement inverse : on a commencé par un abaissement du bras : aussi la première indication du dynamomètre est-elle négative; elle est suivie, comme ci-dessus, par une série d'oscillations alternatives de sens inverse.

» Ces déplacements partiels n'exercent pas sur la pression des pieds contre le sol une influence aussi grande que les déplacements de totalité de la masse du corps. Toutefois, lorsqu'ils sont très brusques, les mouvements des bras ont des réactions assez fortes pour augmenter beaucoup ou atténuer notablement, suivant leur sens, les effets de la pesanteur. On trouve une application directe de ces notions quand on analyse le mécanisme du saut et de la course, dans lesquels les mouvements des bras concourent avec l'action des jambes pour en accroître l'effet.

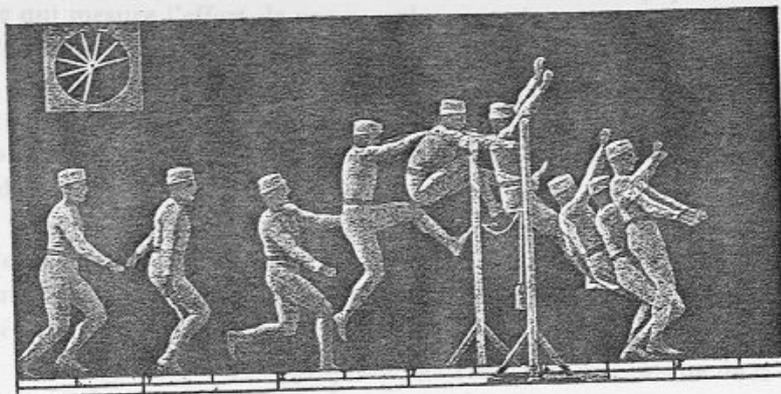
» Les photographies instantanées nous montrent que, dans le saut (*fig. 2*),

(7)

au moment où le pied quitte le sol, les bras ont fini leur mouvement d'élevation et s'arrêtent dans l'attitude horizontale (4^e image). A ce moment, la vitesse acquise des bras agit contrairement à l'action de la pesanteur, et son effet s'ajoute à la vitesse imprimée par la jambe à la masse du corps.

» Le nombre des images est trop faible dans cette figure pour faire saisir toutes les phases du mouvement des bras et pour montrer les relations de

Fig. 2.



Sauteur franchissant un obstacle.

ces mouvements avec ceux des jambes. D'autre part, le temps nous a manqué pour faire faire un cliché d'une série de photographies dans lesquelles les images du sauteur sont réduites à des lignes correspondant aux rayons osseux de ses membres. Sur ces figures, le nombre des images est tellement grand qu'il exprime pour ainsi dire toutes les phases successives du mouvement de chaque partie du corps (1). Elles montrent que, dans le saut, l'élevation des bras cesse au moment précis où les pieds se détachent du sol.

» En combinant les indications du dynamomètre avec celles que donne la photographie instantanée, on arrive à comparer sans cesse les forces qui agissent et les mouvements qui en résultent. Cette comparaison jette une vive lumière sur le mécanisme de la locomotion.

(1) Voir, pour l'explication de la méthode qui donne ces images, notre Note aux *Comptes rendus* (séance du 25 juin 1883). La figure que nous avons publiée dans cette Note ne représentait que les attitudes successives du membre inférieur droit. Pour donner au lecteur une idée de la multiplicité des documents que peut contenir une photographie de ce genre,

sitive beaucoup plus forte et par conséquent une impulsion plus vigoureuse donnée à notre corps. La courbe F, obtenue dans ce second cas, montre d'abord 2, la réaction négative due à la flexion de nos jambes, mais la réaction positive 3 qui suit ce premier temps et qui coïncide avec la détente élastique de nos muscles extenseurs s'ajoute aux effets de la contraction volontaire qui existait seule dans la courbe E. En outre, la hauteur à laquelle s'élève la courbe dynamométrique est beaucoup plus haute que celle qui mesure l'effort de nos muscles quand ceux-ci n'ont pas été préalablement tendus par la flexion.

» On comprend ainsi pourquoi, lorsqu'on exécute deux sauts successifs sur place, le second saut est sensiblement plus haut que le premier. C'est qu'aux effets de la contraction de nos muscles, sensiblement égale dans les deux cas, s'ajoute, pour le second saut, l'effet de la tension élastique des muscles extenseurs sur lesquels nous rebondissons comme sur une sorte de tremplin. Une partie du travail dépensé dans le premier saut est emmagasiné, au moment de la chute, dans l'élasticité de nos muscles et restituée dans le second saut.

» Ces considérations s'appliquent également au mécanisme de la course et doivent faire supposer qu'à chaque pas de course, quand une des jambes légèrement fléchie retombe sur le sol et se fléchit davantage par la vitesse acquise dans la chute du corps, une partie du travail de chute sera restituée, lors de la prochaine extension de cette jambe, au commencement du pas suivant.

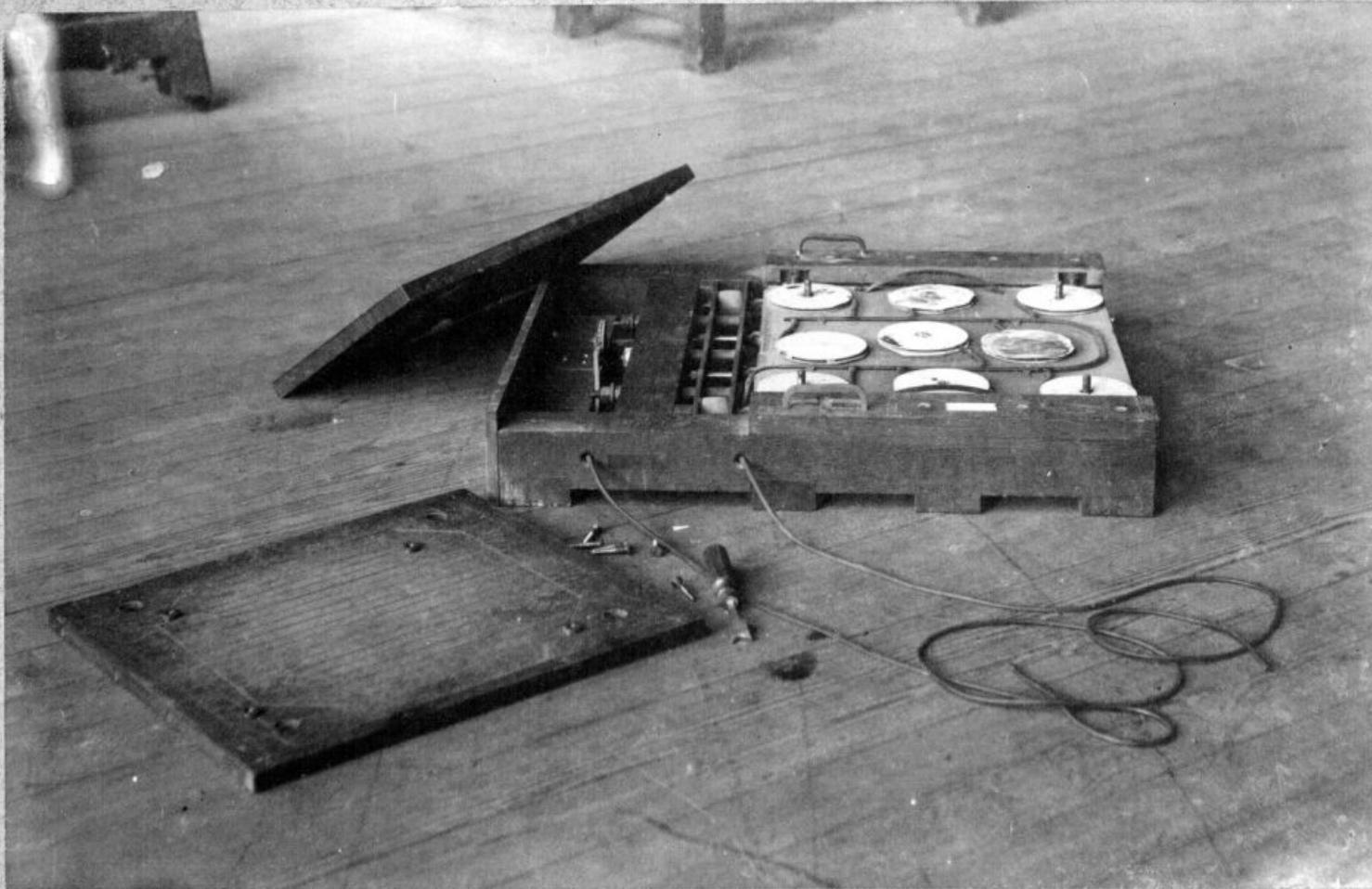
» L'espace nous manque pour analyser en détail les autres courbes de la *fig. 1* ; il suffira d'indiquer les actes qui ont donné naissance à chacune d'elles. La courbe G est produite par un saut dans lequel on retombe sur les talons ; la forte ascension 5 est produite au moment de la chute. H représente deux manières de tomber en sautant d'un lieu élevé sur le dynamomètre : la première courbe 1 est produite par une chute sur les talons ; 2 exprime le poids du corps ; la seconde courbe 1 est produite par une chute sur la pointe des pieds avec flexion graduelle de la jambe sur la cuisse, destinée à amortir le choc.

» Enfin les lignes inférieures du tableau représentent, réunies par une accolade, la courbe des pressions qui s'exercent tangentiellement au plan du terrain et celle des pressions perpendiculaires à ce plan. En I, la courbe inférieure, pareille à celle de F, est la pression sur le sol dans un saut en longueur exécuté de pied ferme, c'est-à-dire sans élan préalable ; la ligne supérieure montre la composante horizontale positive qui se produit dans

ce saut, au moment du coup de jarrets. En K les mêmes actes se produisent, mais le saut a été plus long; aussi la composante horizontale est-elle plus grande : elle se traduit par une courbe plus élevée. L correspond à un saut en hauteur précédé d'une course, M à un saut en longueur également précédé d'une course.

» Nous bornons ici cette Note, qui n'avait pour objet que de montrer le parti que l'on peut tirer de l'emploi combiné de deux méthodes dont l'une donne les phases du mouvement et l'autre les phases de la force par laquelle ce mouvement est produit. Les applications de ces deux méthodes combinées trouveront leur place dans les expériences que nous nous proposons de faire sur les différents modes de la locomotion animale. »

Dynamographe vue interieure



N° 29

Appareil destiné à inscrire les variations de la composante normale et tangentielle de la pression du pied pendant l'appui

La motion humaine

Appareils Dynamiques
Analyse Dynamique

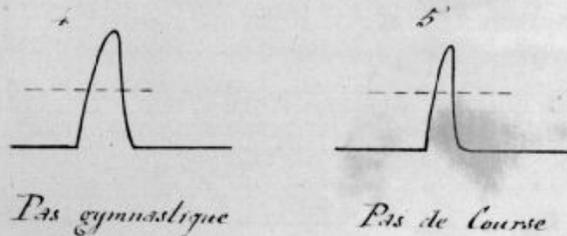
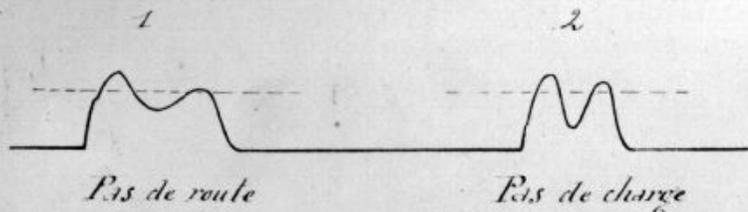


N° 28

*Dynamographe et appareils enregistreurs disposés pour
recueillir les tracés de la pression de l'appui du pied
en fonction du temps.*

Résultats fournis par le dynamographe

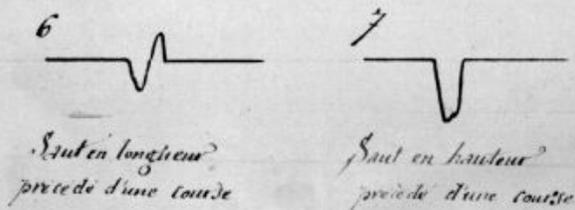
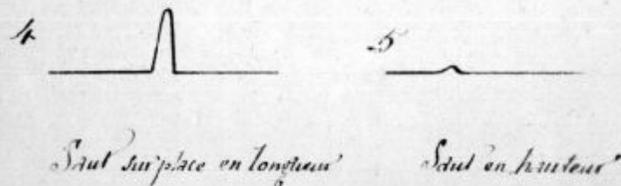
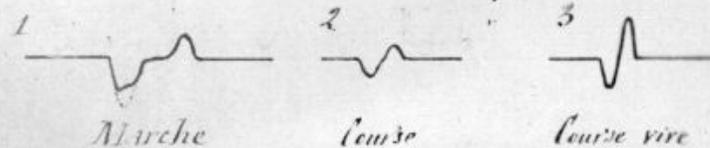
Forme de la courbe de la composante normale de la pression des pieds sur le sol dans des allures usées dans l'armée



Le pas cadencé (3) se fait remarquer par le choc du pied au début puis par la diminution de la pression du pied à la fin de l'appui.
 Le pas gymnastique (4) présente une valeur de la pression plus grande que le pas de route. Le pas de course (5) présente une grande valeur des oscillations verticales au commencement.

N° 267

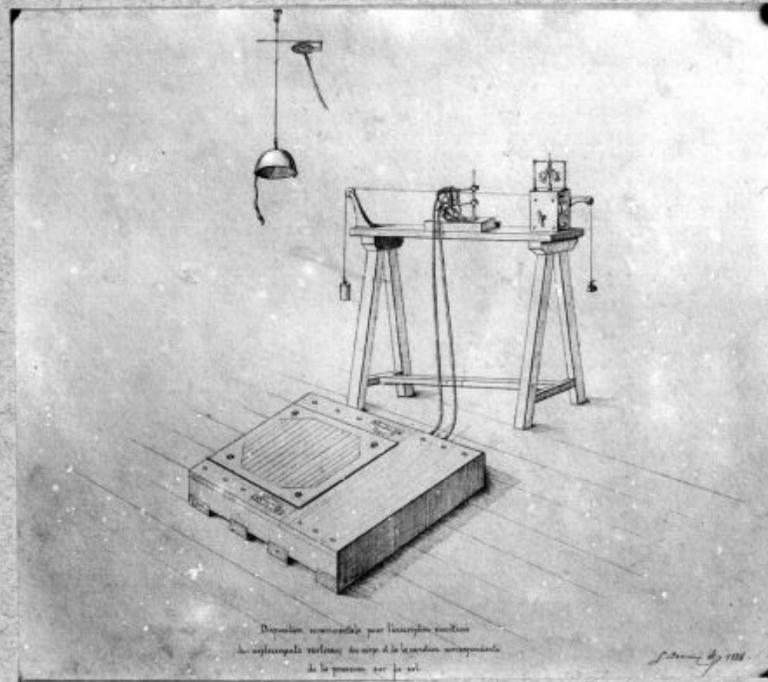
Formes différentes de la courbe de la composante tangentielle des pieds sur le sol dans différentes allures



N° 273

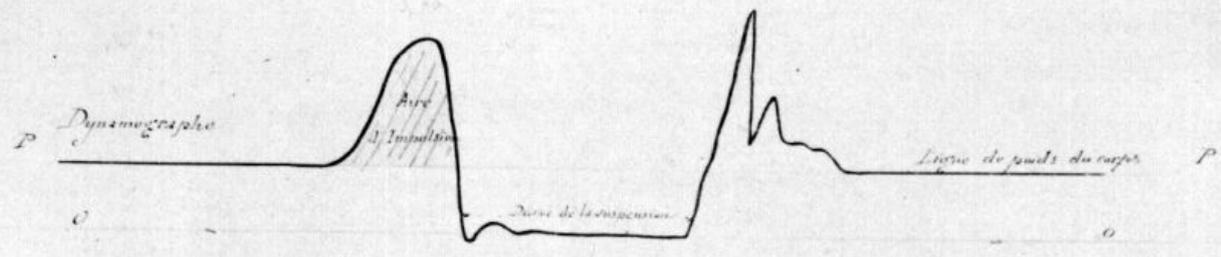
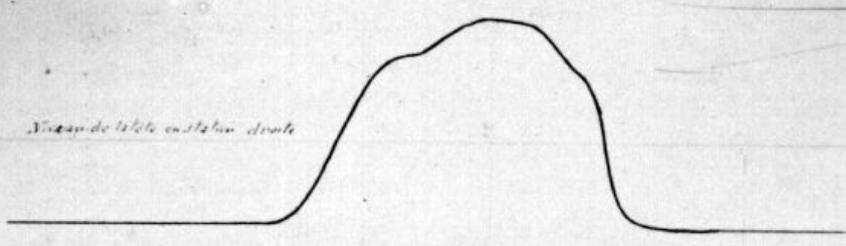
Formes différentes de la courbe de la pression normale et tangentielle du pied pendant l'appui

Locomotion humaine

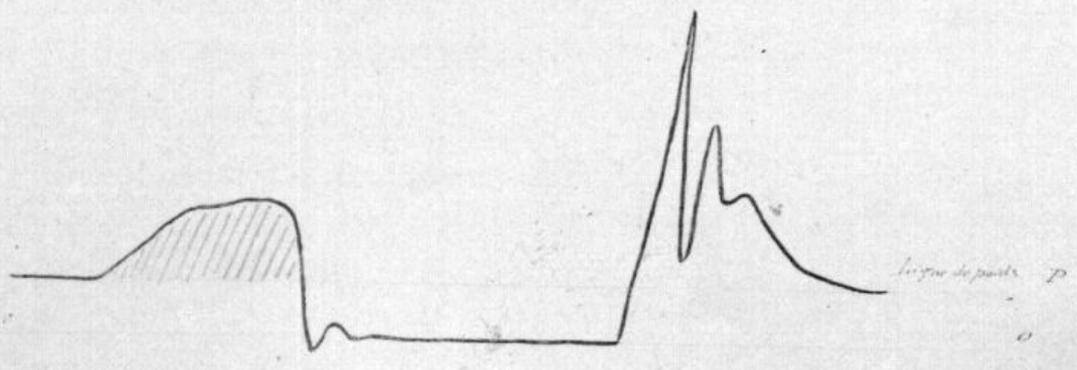
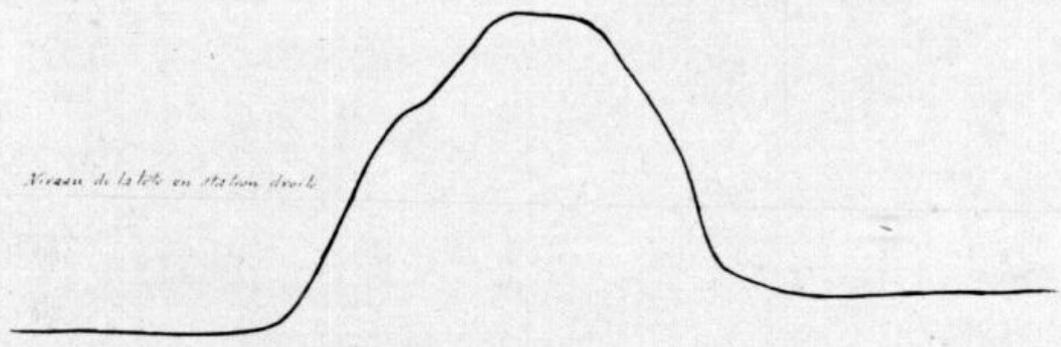


Disposition expérimentale pour inscrire simultanément les déplacements verticaux du corps et la variation correspondante de la pression des pieds sur le sol dans des sauts verticaux.

11



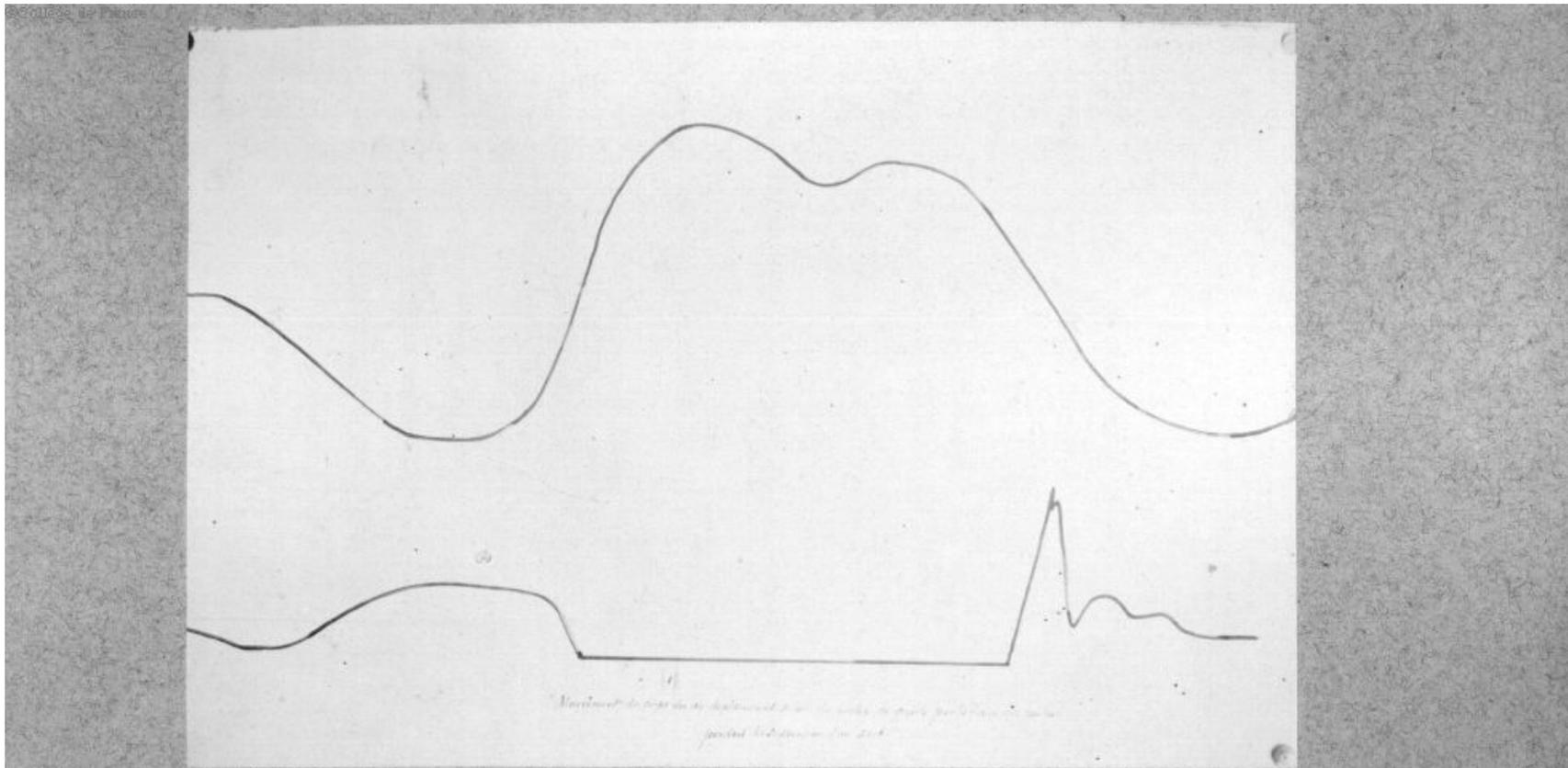
Saut de pied ferme sans préparation avec extension incomplète des jambes



Saut simple avec extension complète des jambes

N° 39

Saut de pied ferme en hauteur. Traces fournis par le dynamographe et le fil de caoutchouc réduisant le mouvement de la tête.



N° 36

Saut vertical sur place.

Dans le tracé du mouvement de la tête on voit une inflexion qui est produite par la flexion brusque des extrémités inférieures pendant la suspension

Inscription simultanée du mouvement vertical de la tête
et de la pression correspondante des pieds sur le sol

Indications du
fil de
cristal

Ligne de niveau du sommet de la tête pendant la station debout

Mouvement par la flexion des membres inférieurs
Mouvement relatif par un fil de cristal

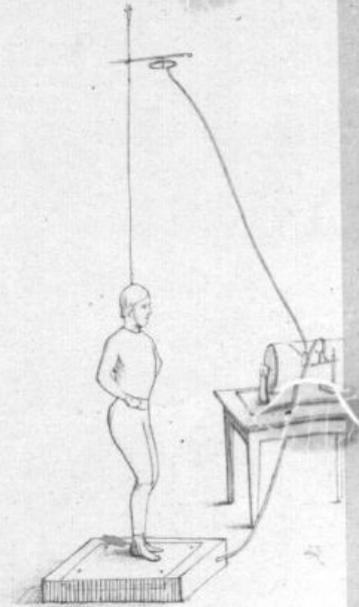


Schéma de l'expérience

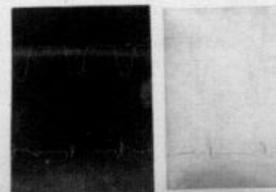
Indications
du
Dynamographe

Ligne de poids du corps

Ligne de zéro

Temps

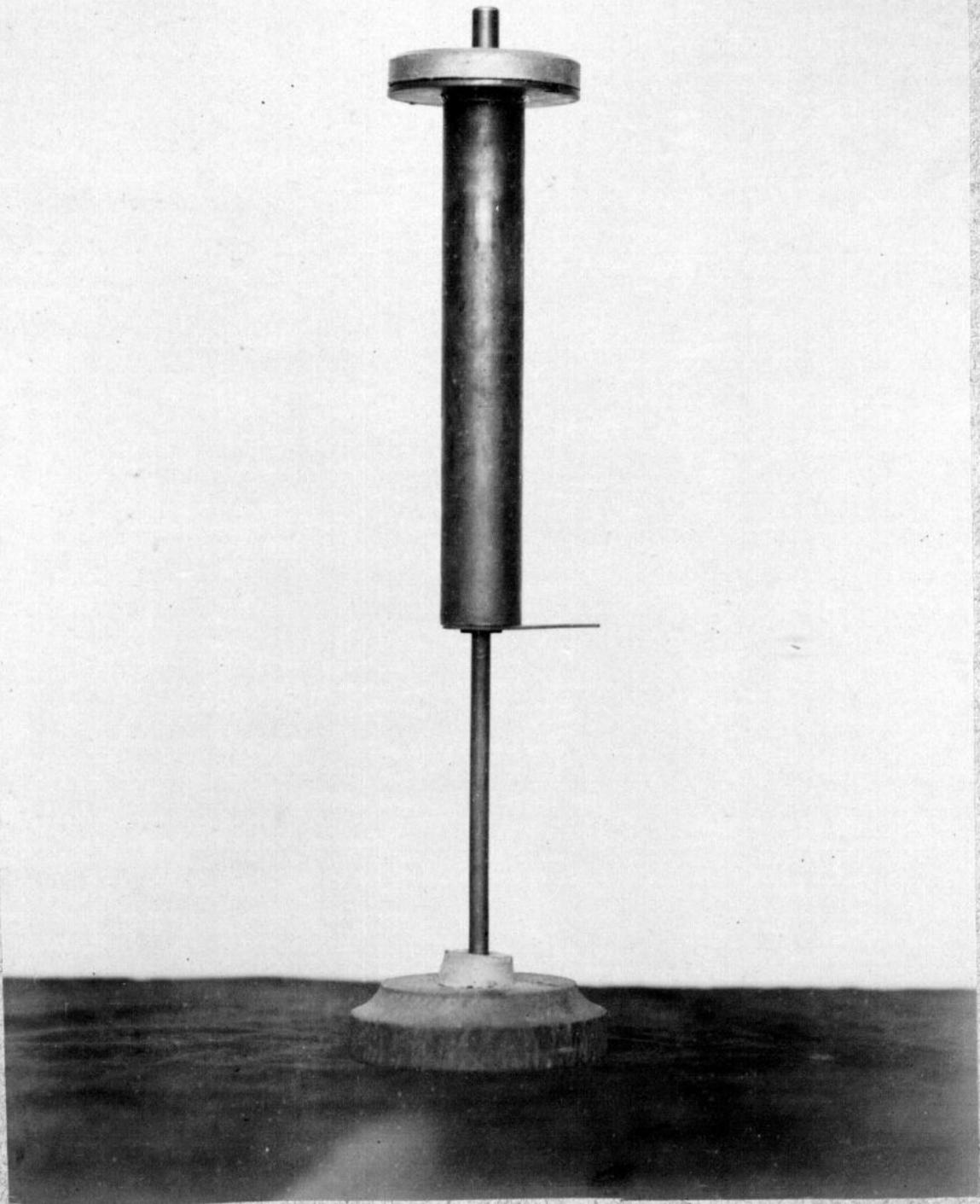
Suspension momentanée du corps
par la flexion rapide des membres inférieurs



Traces originales

N°193

Expérience ayant pour but de montrer qu'il peut y avoir suspension
libre du corps dans l'espace par le seul fait de la flexion rapide
des extrémités inférieures.



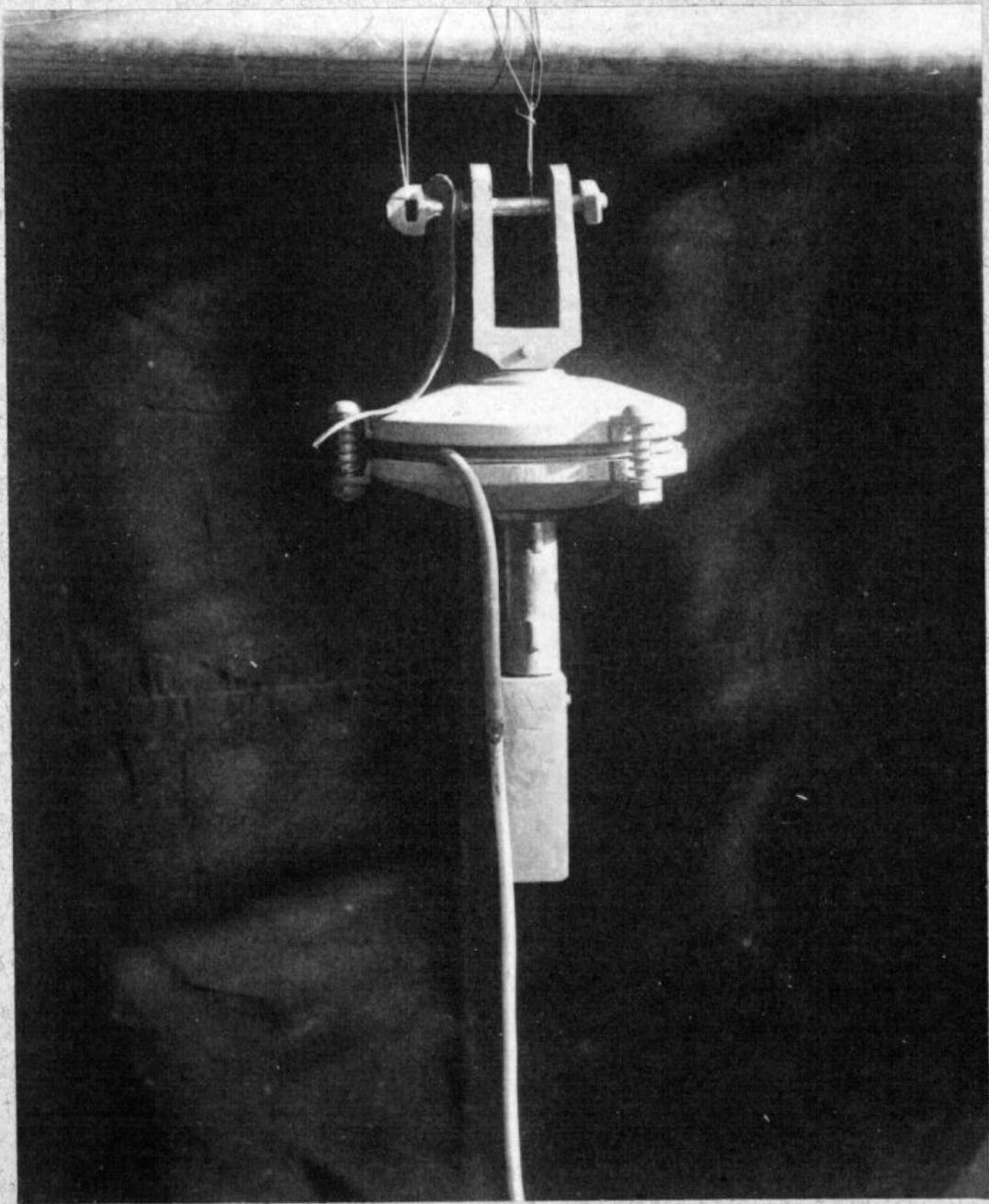
N° 194

Appareil schématique réalisant l'expérience précédente
et composé d'une masse de plomb supportée par un pied
qui peut se raccourcir brusquement sans l'action
d'un ressort à boudin

Recherche de l'économie de travail

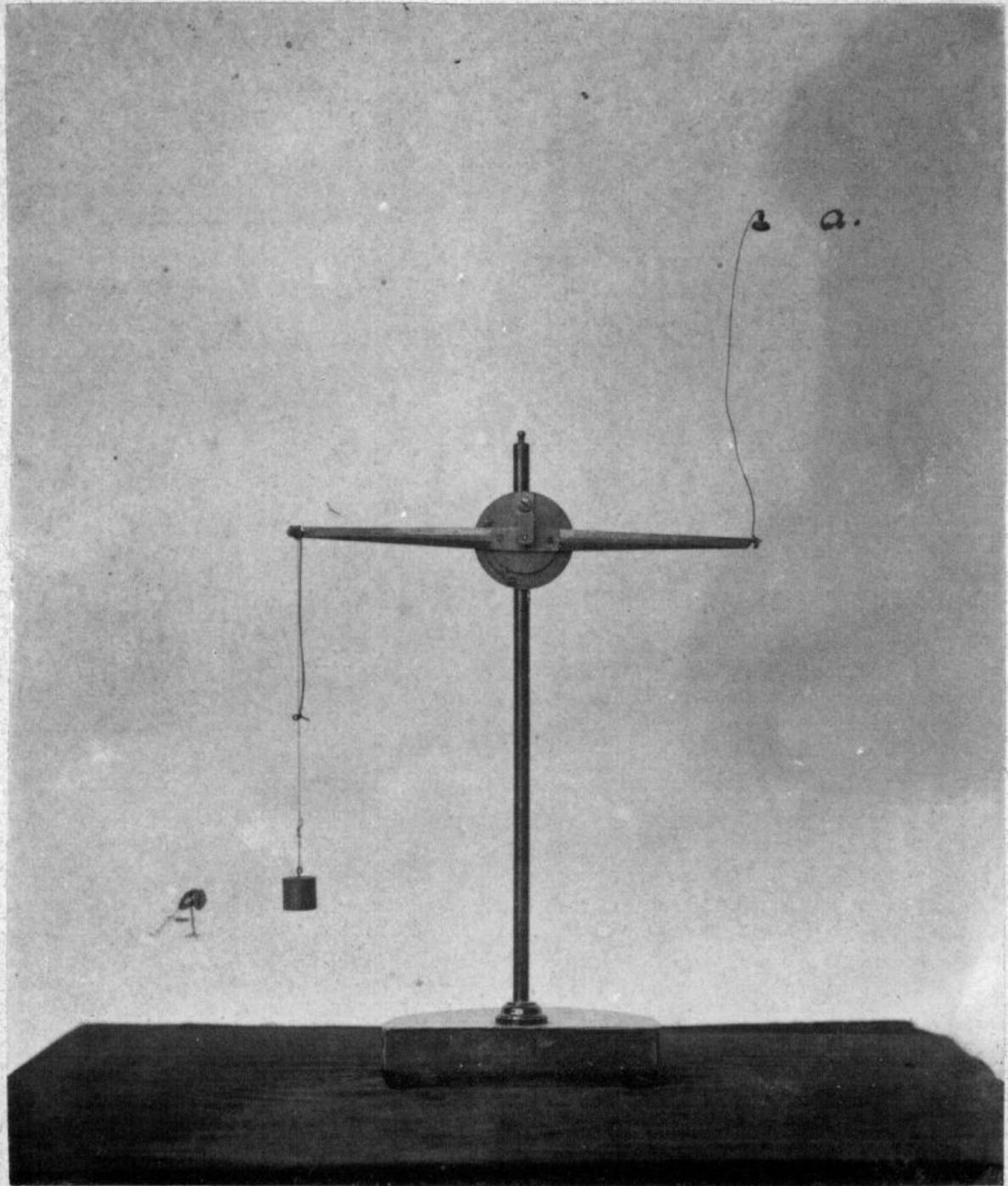
dans la traction des voitures reliées élastiquement

au cheval



*Dynamomètre inscripteur disposé pour étudier la traction
des voitures dans différentes conditions d'attelage.*

Appareil servant à montrer l'influence de l'élasticité
sur la transmission d'un choc à une masse.



N° 53

Le choc produit par la chute de la masse a sur la masse f .
n'est efficace pour soulever celle-ci que si la masse f .
est reliée au fléau par un fil de caoutchouc. Un enchevêtrement
fixé à l'axe du fléau permet de totaliser les petites hauteurs
de soulèvement à chaque chute de la masse a .

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CI;
séance du 24 août 1885.

Locomotion humaine, mécanisme du saut;

PAR MM. MAREY ET G. DEMENY.

« Bien que le saut ne soit pas le genre de locomotion le plus usité, nous en parlerons en premier lieu, parce qu'il est beaucoup plus simple que les allures régulières de l'homme, la marche et la course, dans lesquelles le corps exécute des mouvements compliqués suivant les trois dimensions de l'espace. Le saut consiste en une projection de la masse du corps par la détente brusque des membres inférieurs préalablement fléchis: c'est un mouvement comparable à ceux qu'on étudie dans la balistique dont il suit les lois. Mais ici le projectile n'est pas une sphère homogène où le centre de gravité reste immuable; dans le corps d'un animal, le centre de gravité se déplace à chaque changement d'attitude des membres. Il en résulte une certaine complication pour l'analyse du mécanisme du saut.

» L'intelligence de ce mécanisme suppose à la fois la notion cinématique et la notion dynamique du saut, c'est-à-dire la connaissance du mouvement et celle des forces en action.

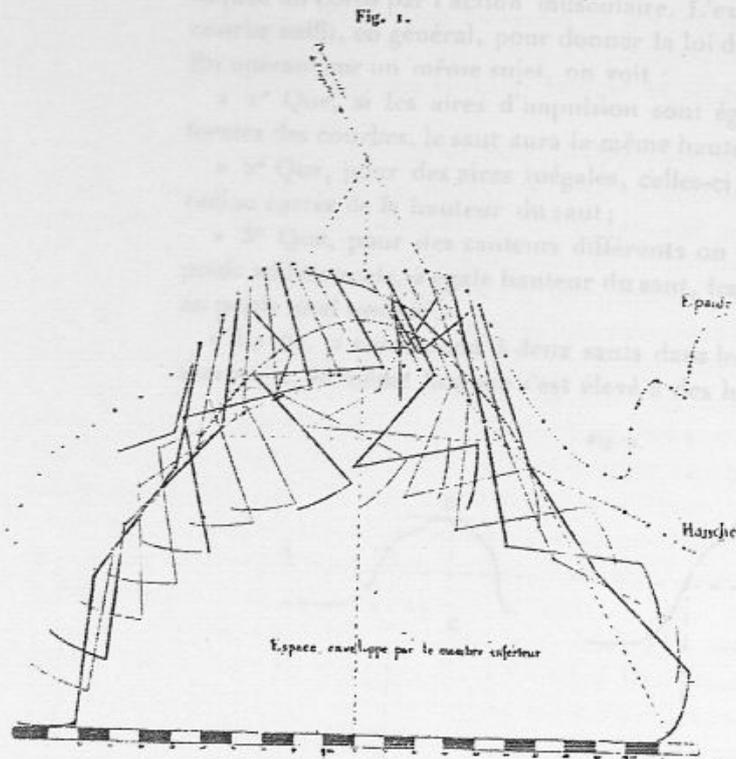
» L'analyse *cinématique* du saut, comme celle de tous les mouvements d'un animal, est devenue facilement accessible par la *photo-chronographie*

M. et D.

(2)

qui traduit la série des positions que chaque point du corps a occupées successivement dans l'espace à des instants équidistants (¹).

• La fig. 1 représente ainsi les positions successives des jambes, des



Chrono-photographie d'un saut de pied ferme. Détermination de la trajectoire du centre de gravité sous forme d'une parabole ponctuée.

bras et de l'épaule chez un homme qui exécute un saut en longueur de pied ferme, c'est-à-dire sans course préalable (on a retranché de cette figure les images qui précèdent et 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, inclinée inversement, correspond à la direction dernière de la chute. La bissectrice de l'angle formé par ces deux lignes est verticale et représente l'axe de la parabole sur laquelle se mouvra le centre de gravité.

(¹) Voir la Note du 25 juin 1883.

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 par la chrono-photographie, afin de construire la parabole décrite et même pour déterminer les lignes de construction dont on vient de parler.

A cet effet, M. Demeny, reprenant une méthode imaginée par Borelli, a mesuré la quantité dont le centre de gravité se déplace suivant l'axe du corps dans les différentes 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 exactement une parabole. Mais un point du corps considéré isolément ne se déplace pas suivant cette ligne; 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.

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

» Le travail dans un saut oblique est la somme des travaux suivant la verticale et suivant l'horizontale. Nous n'avons considéré ici que la première sorte de travail, qui se résume par le produit du poids du corps par la hauteur d'élévation.

» De ces données peut se déduire également la *quantité de mouvement* imprimée à la masse du corps au moment où elle a quitté le sol.

» En construisant, d'après d'autres images photographiques, la courbe de l'accélération verticale du centre de gravité avant l'instant où le corps a quitté le sol, on a obtenu la loi de variation de la force impulsive suivant la verticale. La courbe qui représente cette variation de la force impulsive a une aire proportionnelle à la quantité de mouvement acquise par le corps suivant la verticale.

» L'*analyse dynamique* au moyen du *dynamographe* (1) fournit un contrôle expérimental des déterminations ci-dessus indiquées et donne, pour la plupart des actes de la locomotion, une mesure directe des quantités de mouvement imprimées au corps.

» Quand la pression verticale des pieds accusée par le dynamographe est supérieure au poids du corps, elle exprime à chaque instant, par cet excès, la force impulsive qui imprime au corps une accélération verticale. L'aire de

(1) Voir la Note des 8 et 15 octobre 1883.

(4)

la courbe dynamographique mesurera la quantité de mouvement communiquée au corps par l'action musculaire. L'expérience a montré que cette courbe suffit, en général, pour donner la loi du mouvement dans un saut. En opérant sur un même sujet, on voit :

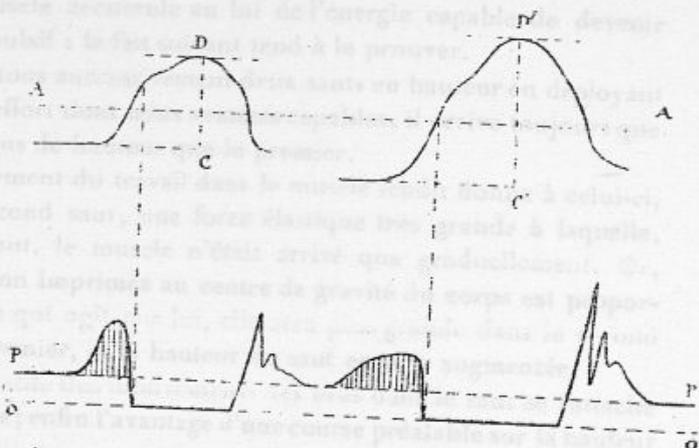
» 1° Que, si les aires d'impulsion sont égales, quelles que soient les formes des courbes, le saut aura la même hauteur ;

» 2° Que, pour des aires inégales, celles-ci sont proportionnelles à la racine carrée de la hauteur du saut ;

» 3° Que, pour des sauteurs différents ou pour un homme chargé de poids additionnels, à égale hauteur du saut, les aires sont proportionnelles au poids total soulevé.

» La *fig. 2* correspond à deux sauts dans lesquels, partant de l'attitude accroupie, le même homme s'est élevé à des hauteurs variables. Dans les

Fig. 2.



Deux sauts en hauteur exécutés sur le dynamographe. — En haut, les hauteurs CD, C'D' réduites toutes deux à la même échelle. — En bas, tracés dynamométriques : les aires d'impulsion correspondant à chacun des sauts sont teintées de hachures.

sur les courbes supérieures, les ordonnées DC et D'C' sont proportionnelles aux hauteurs des sauts. Les courbes inférieures expriment, par leurs aires teintées de hachures, les quantités de mouvement communiquées au corps dans ces deux sauts. Sur ces figures ramenées à de plus grandes dimensions, on a constaté que les aires sont proportionnelles aux racines carrées des hauteurs des sauts.

» Ces mêmes figures montrent encore 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 les figures ci-dessus, c'est au plus petit saut que correspondait 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, mais bref, pouvant toujours équivaloir à un effort plus faible, mais de plus longue durée.

» Au moyen des deux méthodes que nous venons de décrire, on a pu analyser dans leurs divers éléments les différents types de saut que l'homme peut effectuer.

» On distingue à cet égard les sauts en hauteur et les sauts en longueur, ceux qu'on exécute de *pied ferme* et ceux qui sont précédés d'une course. Il n'est pas possible d'exposer en détail ces différentes sortes de sauts, auxquelles sont toujours applicables les lois de la balistique.

» La photographie montre comment la vitesse horizontale acquise dans une course se combine avec la vitesse verticale imprimée au corps par le saut proprement dit pour donner au corps des impulsions variées suivant le but à atteindre. Elle montre également que la hauteur de l'obstacle franchi dans un saut ne correspond pas à celle dont s'est élevé le centre de gravité du corps au-dessus du sol, mais qu'elle dépend surtout de l'attitude des membres inférieurs au moment où l'on franchit l'obstacle (1).

» Enfin, au moment de la chute qui suit le saut, la quantité de mouvement que le corps avait reçue de bas en haut se retrouve de haut en bas et doit être annulée. Quand on retombe sur le dynamographe, une partie seulement de cette quantité de mouvement se retrouve dans la courbe tracée; la quantité disparue peut servir à évaluer le travail intérieur absorbé par nos organes.

» La chute, comme l'impulsion, peut présenter les phases les plus variées: le sauteur, en graduant l'intensité et la durée de ses efforts résistants, cherchera à réaliser les genres de chute pour lesquels la pression sur le sol aura la moindre intensité: c'est ce qu'on appelle *amortir* la chute. L'idéal, en ce cas, serait d'exercer sur le sol une pression constante et prolongée pendant

(1) La flexion des jambes a un effet complexe: d'une part, elle soulève nos pieds au-dessus de l'obstacle à franchir, mais, d'autre part, en élevant le centre de gravité à l'intérieur du corps, elle abaisse celui-ci d'une quantité égale. La différence de ces deux effets contraires s'ajoute à l'élévation du centre de gravité pour constituer la hauteur du saut.

la durée de laquelle le mouvement du centre de gravité serait uniformément retardé. Quelques-uns de nos tracés dynamographiques et de nos photographies montrent que des sauteurs exercés se rapprochent de ces conditions.

» L'action des muscles pendant la chute est donc de produire un travail résistant ; ils effectuent alors les actes intimes qui caractérisent la contraction. Mais ce qui fait la différence entre le travail impulsif ou extérieur et le travail résistant ou intérieur, c'est que, dans la chute, les muscles contractés se laissent vaincre et allonger par la force extérieure qui fléchit les membres, tandis que dans l'acte impulsif ils font du travail extérieur en se raccourcissant et en redressant les articulations fléchies des membres.

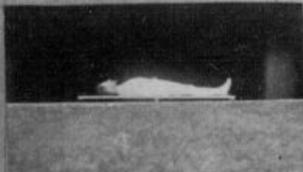
» Dans tous les actes de la locomotion, on observe ainsi une alternance entre le travail impulsif et le travail résistant ; or, dans ce dernier cas, il semble que le muscle accumule en lui de l'énergie capable de devenir ensuite travail impulsif : le fait suivant tend à le prouver.

» Si nous exécutons successivement deux sauts en hauteur en déployant chaque fois tout l'effort dont nous sommes capables, il arrive toujours que le second saut a plus de hauteur que le premier.

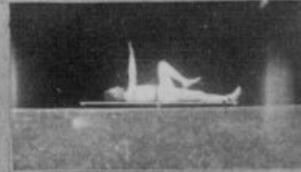
» L'emmagasinement du travail dans le muscle tendu donne à celui-ci, dès le début du second saut, une force élastique très grande à laquelle, dans le premier saut, le muscle n'était arrivé que graduellement. Or, comme l'accélération imprimée au centre de gravité du corps est proportionnelle à la force qui agit sur lui, elle sera plus grande dans le second saut que dans le premier, et la hauteur du saut en sera augmentée.

» L'action adjuvante des mouvements des bras dans le saut se rattache au même mécanisme ; enfin l'avantage d'une course préalable sur la hauteur d'un saut doit s'expliquer par des considérations de même ordre. En effet, avant de s'élancer, le coureur fléchit ses membres inférieurs pour ralentir sa vitesse et fait un travail résistant que ses muscles restitueront en partie. Aussi voit-on, après une course, que le saut effectué par l'impulsion d'une seule jambe a souvent plus de hauteur qu'un saut de pied ferme pour lequel concourent les deux jambes à la fois. Le développement de ces propositions sommaires trouvera ailleurs les développements qu'il comporte. »

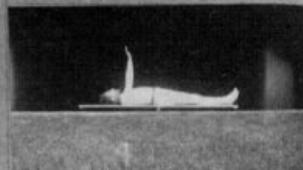
Station droite
0,945



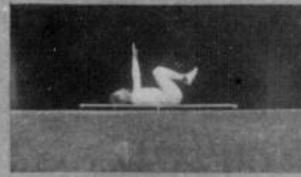
1 Bras horizontal
et 1 Cuisse fléchie
45^{mm}



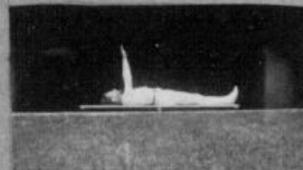
1 Bras horizontal
15^{mm}



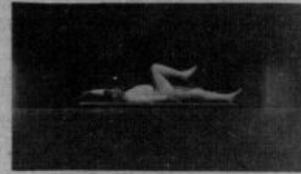
2 Bras horizontaux
et 2 Cuisse fléchies
150^{mm}



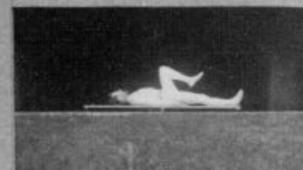
2 Bras horizontaux
30^{mm}



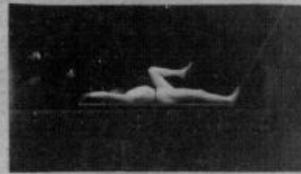
1 Bras Vertical
et 1 Cuisse fléchie
78^{mm}



1 Cuisse fléchie
45^{mm}



2 Bras Verticaux
et 1 Cuisse fléchie
170^{mm}



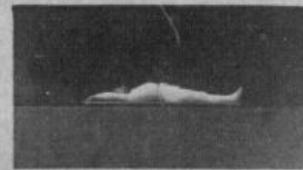
2 Cuisse fléchies
120^{mm}



2 Bras Verticaux
et 2 Cuisse fléchies
180^{mm}



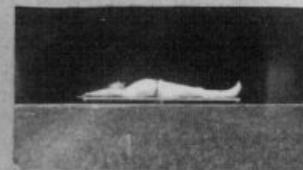
1 Bras Vertical
25^{mm}



2 Cuisse fléchies
jambes tendues



2 Bras verticaux
45^{mm}



2 Bras verticaux
et 2 Cuisse fléchies
jambes tendues



N: 108

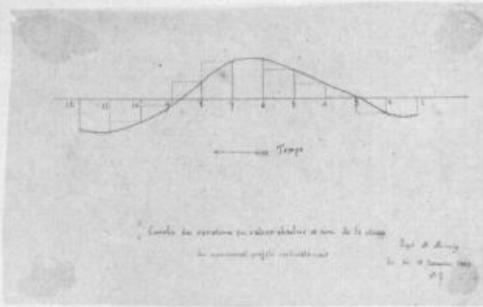
Détermination du déplacement vertical du centre
de gravité dans différentes attitudes d'un homme



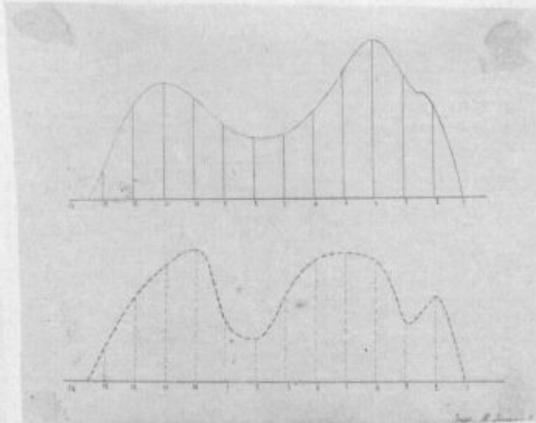
Expérience montrant que la séparation du corps et du sol
dans le saut est due à la vitesse que prend la masse du corps
sous l'influence de la tension des muscles extenseurs

Relations entre les données cinématiques fournies par la photographie et les données dynamiques fournies par la dynamographie pendant un appui du pied

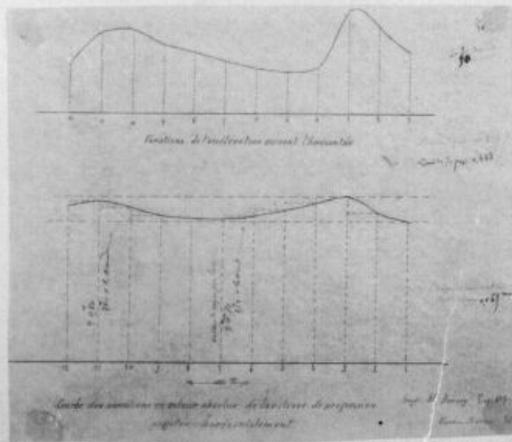
Courbe des variations de la vitesse verticale du tronc



Courbe de dynamographie

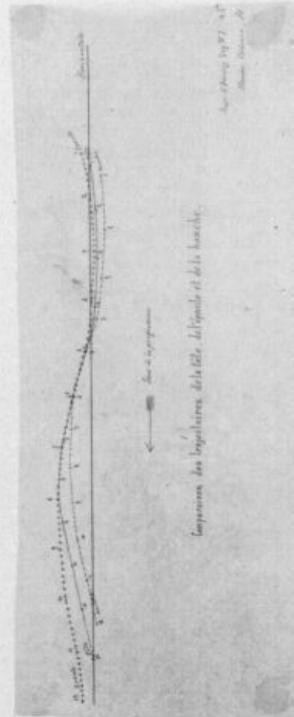


Courbe de l'accélération verticale de la masse du tronc



Variation de l'accélération horizontale pendant un appui du pied

Variation de l'antéflexion horizontale du tronc pendant un appui du pied



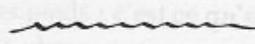
Données numériques

Temps	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vitesse	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pression	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Accélération	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Comparaison de la courbe de la pression normale du pied sur le sol pendant un appui du pied dans la marche avec la courbe de l'accélération du mouvement vertical d'un point de la masse du tronc qui se rapproche du centre de gravité.

Forêtiers de la Société de Physiologie des pieds
de la Société de l'homme

Chronographie
des
duréés d'appuis et de levers
des membres inférieurs
dans les allures marchées et courues



Mesure directe des durées des doubles appuis

Mesure directe des oscillations verticales du tronc

Etude spéciale de l'oscillation du membre levé.

*Variations de la durée du double appui des pieds
dans la marche de l'homme;*

PAR M. DEMENY.

« Dans la marche de l'homme, contrairement à ce qui se passe dans la course, lorsqu'un pied pose sur le sol, l'autre ne l'a pas encore quitté. Il y a donc un moment, généralement assez court, où le corps repose à la fois sur deux pieds : c'est ce qu'on appelle *phase de double appui*. Comme la durée de cette phase varie sous certaines influences, nous avons cherché à mesurer d'une manière précise ces variations.

» C'est à l'emploi du signal électrique de M. Deprez que nous avons eu recours pour ces expériences.

» Ce signal ne devant agir qu'au moment où les deux pieds à la fois reposent sur le sol, nous avons adapté sous la semelle des chaussures des plaques de métal qui n'arrivaient au contact les unes avec les autres que sous l'influence de l'appui des pieds. Le circuit d'une pile portative traversait successivement l'une et l'autre chaussure, ainsi que le signal électrique : il n'était donc fermé qu'au moment de l'appui simultané des deux pieds. Dans la disposition adoptée, le contact électrique avait lieu pour chaque pied, quelle que fût la partie, pointe ou talon, qui posât sur le sol.

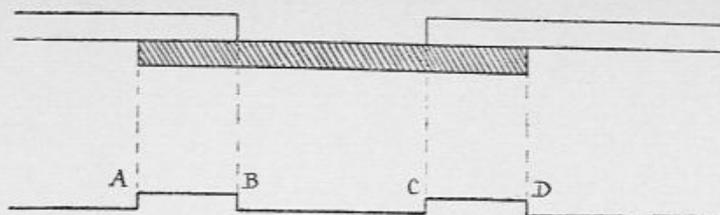
» Le marcheur tenait à la main un appareil inscripteur, portatif comme dans les expériences analogues de M. Marey. Avec cette disposition nous avons fait d'abord une série d'expériences en variant la fréquence du pas, afin de déterminer l'influence que cette fréquence exerce sur la durée absolue et relative du double appui.

» La figure théorique 1 montre, en haut, la notation ordinaire des ap-
D.

(2)

puis et levés des pieds; celle du pied gauche, teintée de hachures, coïncide visiblement, à son début et à sa fin, avec celle des appuis du pied droit.

Fig. 1.



Inscription électrique de la durée du double appui.

- AD. Durée de l'appui d'un pied.
- BC. " Levé.
- AB. " Double appui.
- AC. " Demi-cadence.

En bas, le tracé du signal électrique exprime parfaitement ces coïncidences : les longueurs AB et CD, correspondant aux déviations du style par le passage du courant électrique, mesurent exactement les durées du double appui. La même ligne exprime par la longueur AD la durée de l'appui d'un pied et par la longueur BC la durée du levé; enfin AC exprime la durée d'un demi-pas.

» D'après une série de tracés du signal électrique recueillis pendant la marche, en faisant varier le nombre des pas de 40 à 100 par minutes, on a construit la *fig. 2*, dans laquelle les fréquences des pas sont portées sur l'axe des abscisses et les durées comptées sur les ordonnées. La courbe supérieure exprime, en vingtièmes de seconde, les variations de la durée du demi-pas sous l'influence de la fréquence; la courbe inférieure ponctuée exprime les variations de la durée du double appui.

» On voit que, pour toute fréquence des pas, il y a dans la marche une phase de double appui. Mais la durée de ce double appui diminue plus vite que celle du demi-pas quand la marche s'accélère. Les écarts extrêmes ont été de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{8}$ de la durée du demi-pas; en valeur absolue, de $\frac{7}{10}$ à $\frac{2}{10}$ de seconde.

» Dans une autre série d'expériences nous avons étudié l'influence de la charge portée. En accroissant graduellement cette charge de 0^{kg} à 40^{kg}, nous avons vu la durée du double appui s'accroître, pour atteindre presque la moitié de la durée du demi-pas quand le poids porté était de 40^{kg}.

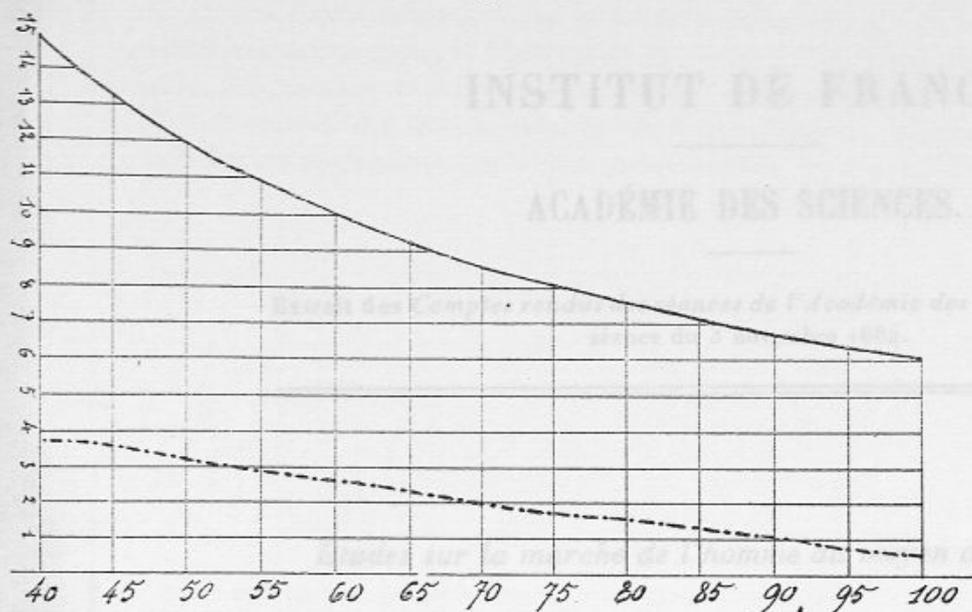
» Nous avons varié ces expériences : tantôt nous imposions au marcheur une cadence de soixante pas à la minute et tantôt nous le laissions libre de

(3)

régler à volonté la fréquence de ses pas. Dans ce dernier cas, l'allongement du double appui a atteint son maximum.

» Enfin nous avons constaté que la fatigue du marcheur allonge chez

Fig. 2.



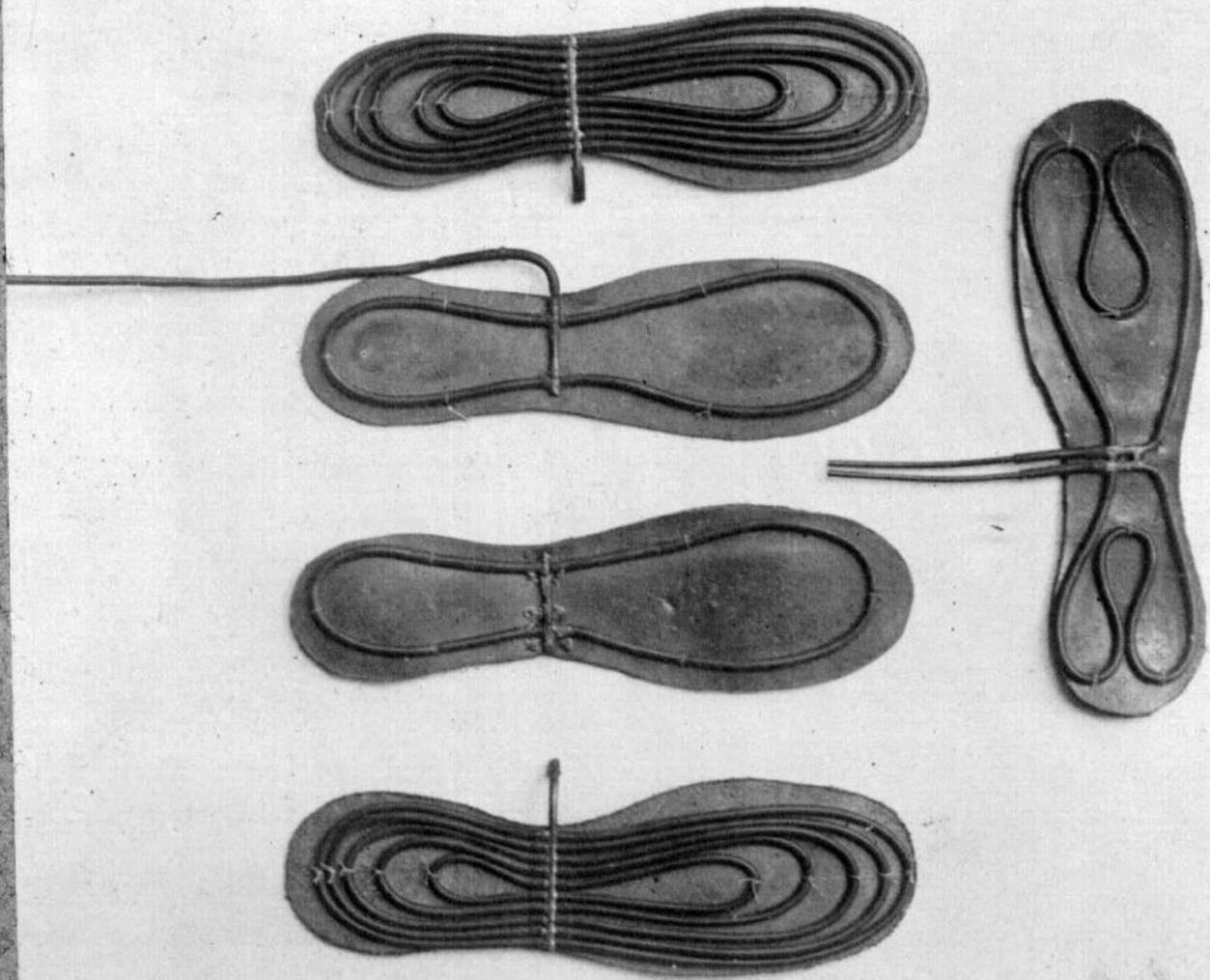
Grandeur comparée de la durée du demi-pas et de la durée du double appui dans la marche de l'homme. Les ordonnées sont proportionnelles aux durées du demi-pas et du double appui en vingtièmes de seconde.

Les cadences sont portées en abscisses et augmentent de 5 en 5 pas à la minute depuis 40 jusqu'à 100.

lui la période de double appui; nous espérons même trouver dans cet allongement une sorte de signe objectif de la fatigue. Sur ce point nous nous proposons de faire des recherches plus approfondies. Nous étudierons également les effets de la pente et de la nature du terrain. »

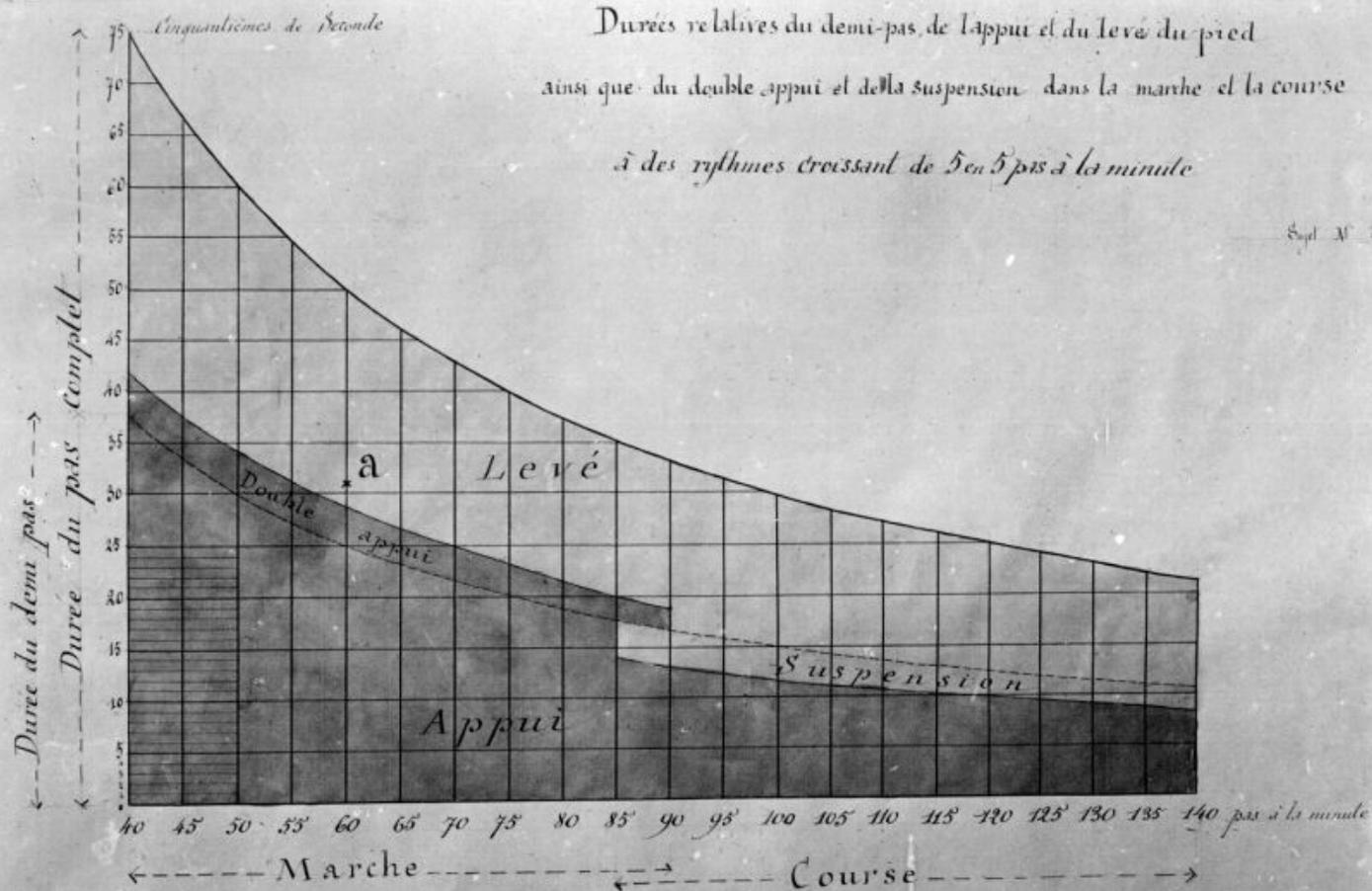
« Les études que j'ai entreprises à la Station physiologique sur son de l'homme doivent conduire (15 juin 1885) à des constatations pratiques quelques-unes. Dans les marches militaires, par exemple, il se s'agit de savoir quelles sont les conditions les plus favorables pour que les soldats fournissent avec le moins de fatigue possible une longue bien parcourent rapidement une certaine distance.

Gauthier-Villars, IMPRIMEUR-LIBRAIRE DES COMPTES RENDUS DES SÉANCES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES.
11099 Paris. — Quai des Augustins, 15.



N:55

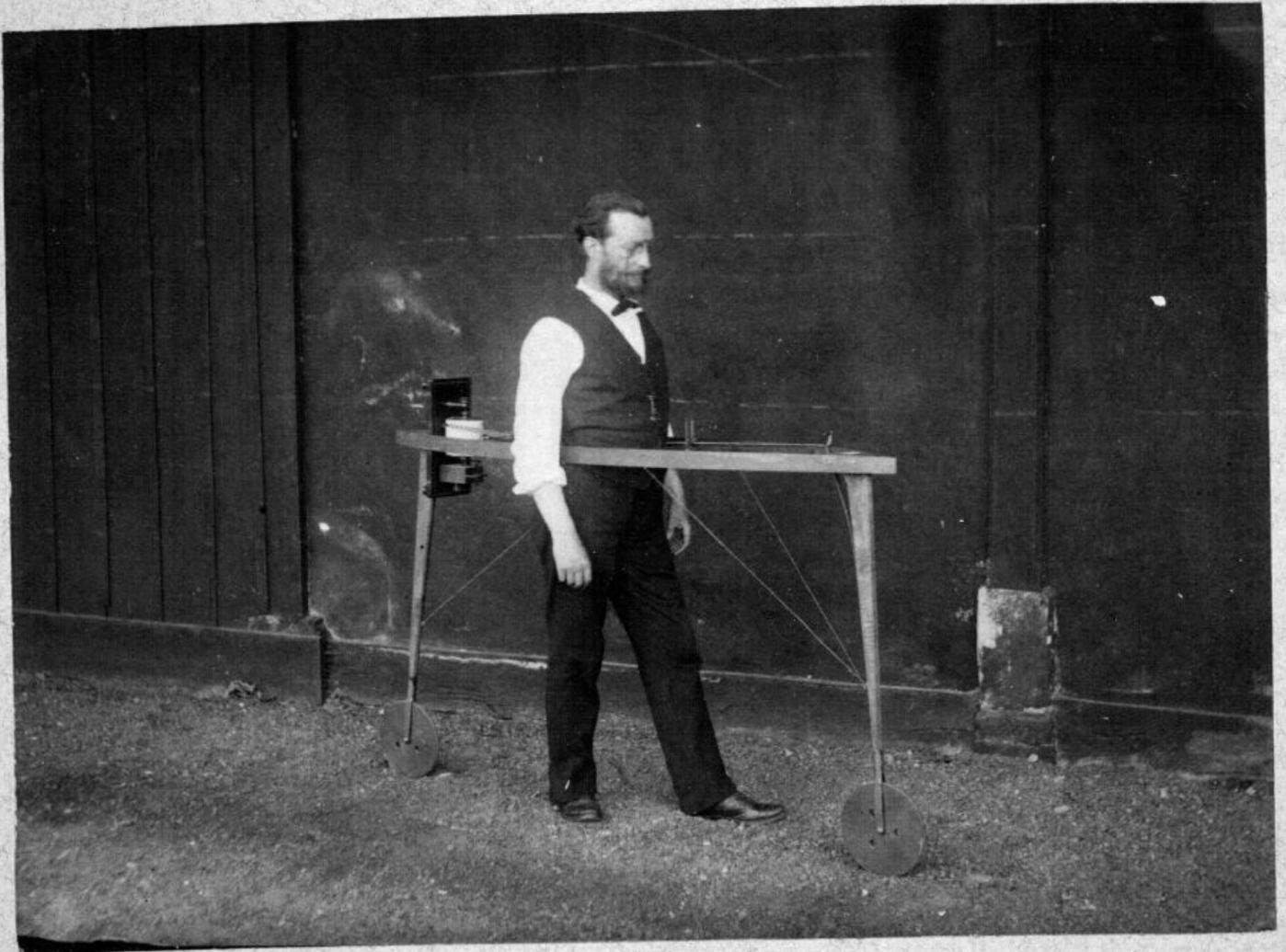
Semelles exploratrices destinées à la Chronographie
des appuis et levés



Le point a représente l'accroissement de durée de l'appui du pied sous l'influence de la fatigue après une marche de 2^h 1/2 au rythme 60.

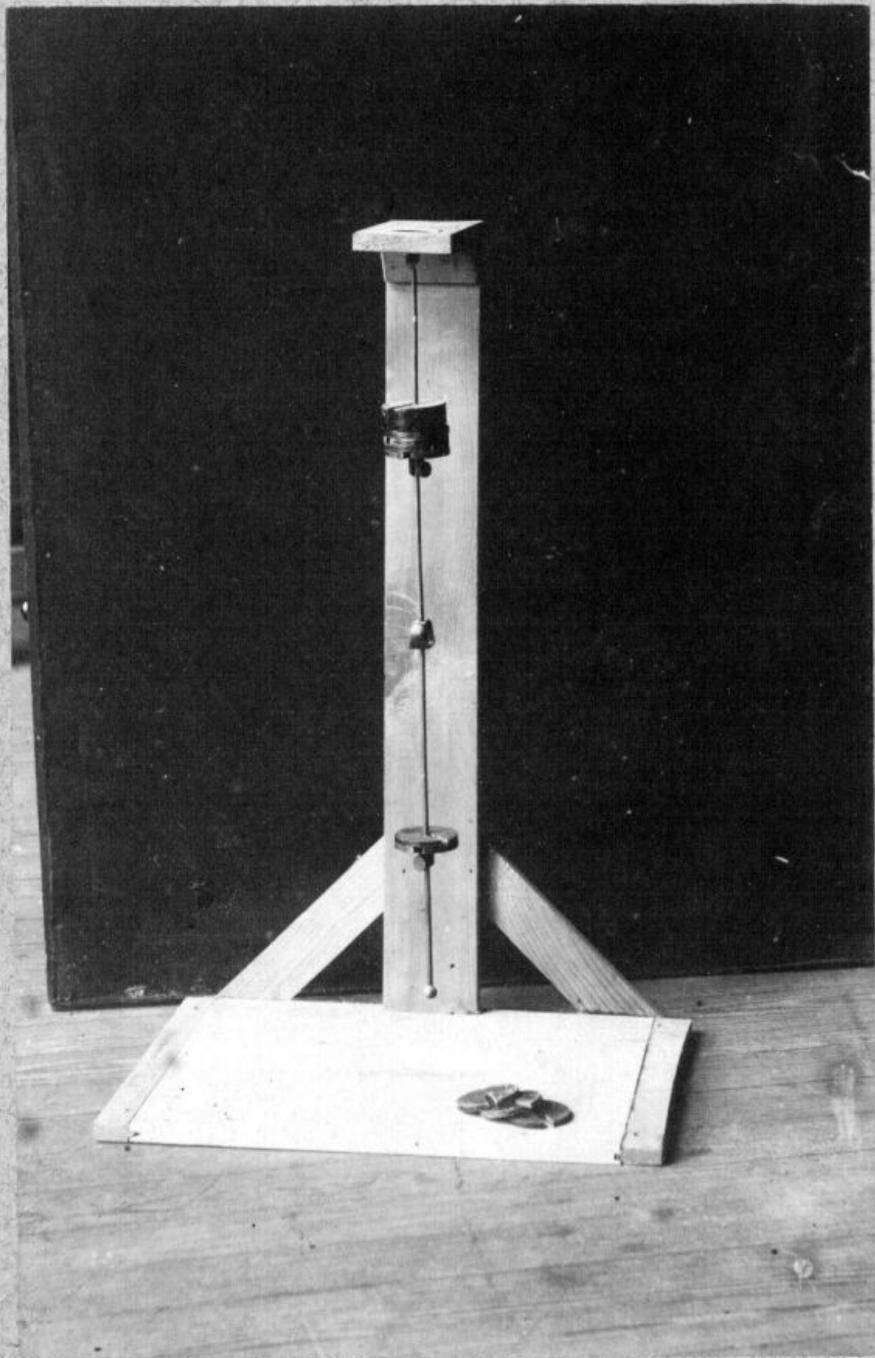
Loi de la durée des appuis, levés, doubles appuis des membres
dans la marche et la course de l'homme à des allures de 40 à 140 pas à la minute.

Mesure du travail mécanique dans la locomotion humaine,



N° 44

Chariot destiné à la mesure directe des oscillations verticales dans la marche de l'homme et pouvant aussi donner des indications sur les variations de la vitesse horizontale du tronc dans la locomotion.



N° 54

*Double pendule pour l'étude de l'oscillation du membre
inférieure.*

Mesure d'inscription des chemins parcourus
et des vitesses de progression d'un marcheur ou d'un coureur

Odographie

Odographe fixe de la Station Physiologique

Odographe portatif

Odographe roulant



Mesure du travail mécanique dépensé dans la locomotion
humaine.

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, t. XCIX ;
séance du 3 novembre 1884.

Études sur la marche de l'homme au moyen de l'odographe;

PAR M. MAREY.

l'allure, c'est-à-dire avec le temps employé pour parcourir 500. Pour
estimer la durée absolue d'une expérience, il faut savoir que la rotation
du cylindre entraîne le papier avec une vitesse de 0,5 mètre à l'heure, soit
0,5 par minute.

Afin de simplifier la représentation des tracés, on peut remplacer la ligne
sinueuse par une courbe qui en joindrait tous les angles saillants par un

« Les études que j'ai entreprises à la *Station physiologique* sur la loco-
tion de l'homme doivent conduire à des applications pratiques; en voici
quelques-unes. Dans les marches militaires, par exemple, il serait impor-
tant de savoir quelles sont les conditions les plus favorables pour que les
soldats fournissent avec le moins de fatigue possible une longue étape ou
bien parcourent rapidement une certaine distance.

» A cet égard, rien n'est indifférent : l'expérience montre que le rythme
commandé au soldat par le tambour ou le clairon, que la forme de ses
chaussures ou la charge qu'il porte imposent à son pas une certaine lon-
gueur et modifient ainsi la vitesse de l'allure. D'autre part, la taille d'un
homme, la longueur relative de son pied et de sa jambe influent sur sa
façon de marcher. Enfin, l'exercice méthodiquement dirigé modifie rapide-
ment les aptitudes du marcheur, et il est du plus haut intérêt d'estimer
d'une manière précise les résultats obtenus et de mesurer le progrès
accompli.

M.

» Ces mesures ne sauraient être prises dans une marche d'ensemble où chaque homme, se conformant à l'allure des autres, prend une sorte de pas moyen qui n'est pas le sien propre. C'est donc par une série d'observations individuelles faites sur un grand nombre de marcheurs qu'on doit arriver à des déterminations précises. Et comme pour l'observation de chaque individu il faut opérer sur un parcours assez long, l'observateur qui entreprendrait une pareille étude devrait y consacrer un temps énorme et se condamner à la besogne fastidieuse de pointer au chronomètre l'instant du départ et celui de l'arrivée, de compter, sans commettre d'erreur, le nombre des pas effectués dans chacune des épreuves successives. C'est pourquoi il m'a paru indispensable de chercher une disposition mécanique capable d'enregistrer automatiquement toutes ces observations, ne laissant au physiologiste que la tâche de tracer le plan des expériences à faire et d'en interpréter les résultats.

» Il s'agit d'abord d'inscrire les espaces parcourus en fonction du temps. Un instrument que j'ai présenté il y a quelques années, l'*odographe*, se prête fort bien à cet usage. Le principe en est fort simple : sur un cylindre qui tourne d'un mouvement uniforme, au moyen d'un appareil d'horlogerie, on étend un papier divisé millimétriquement. D'autre part, un style qui se meut en ligne droite, parallèlement à la génératrice du cylindre, trace sur le papier et s'avance d'une quantité constante pour chaque unité de chemin parcouru.

» Dans sa disposition primitive, l'odographe s'adaptait aux voitures et chaque tour de roue (représentant un chemin toujours égal) provoquait un petit mouvement de progression du style.

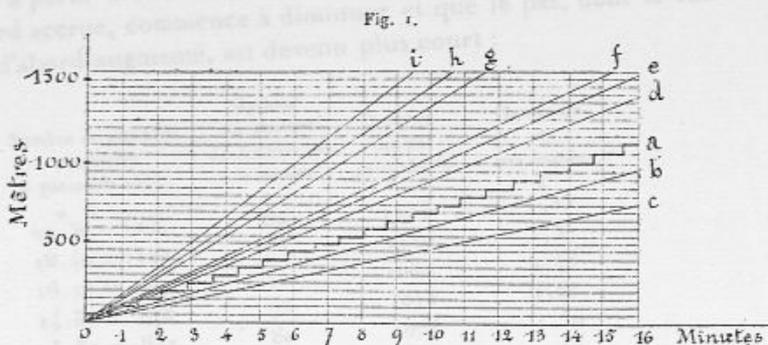
» D'après cette disposition, on conçoit que la ligne tracée au bout d'un certain parcours était plus ou moins inclinée sur l'axe des abscisses, suivant la vitesse du véhicule ; elle était droite si cette vitesse s'était maintenue uniforme, courbée en sens divers s'il y avait eu des accélérations ou des ralentissements, et dans ce cas, la tangente à l'un des points de la courbe exprimait la vitesse de l'allure à l'instant correspondant.

» Une modification dut être apportée à l'odographe puisque la progression du style devait s'effectuer, non plus à chacun des tours d'une roue, mais chaque fois qu'un marcheur aurait parcouru un certain nombre de mètres. Comme le champ d'expériences est une piste circulaire et horizontale de 500^m de circonférence, j'établis autour de cette piste une ligne télégraphique dont les poteaux sont distants de 50^m, et j'adaptai à chacun de ces poteaux un interrupteur du courant. Chacune des interrup-

(3)

tions se produit au moment où le marcheur a parcouru 50^m ; elle provoque un petit mouvement du style de l'odographe qui est placé au loin dans une chambre.

» La *fig. 1* montre en *a* un des tracés obtenus; comme la progression du style est intermittente et ne se produit qu'au passage du marcheur devant un des poteaux, la ligne tracée est formée d'une série d'inflexions en forme d'escalier dont toutes les marches auraient une hauteur constante (un millimètre), car cette hauteur correspond à un chemin constant (50^m), mais dont la profondeur, horizontalement comptée, varie avec la vitesse de



a, tracé de l'odographe; homme marchant au rythme de 60 pas à la minute.
b, tracé réduit à une droite, homme marchant au rythme de 60 pas avec une surcharge de 20^m .
c, d, e, f, même sujet, rythmes 40, 70, 80, 85.
g, h, i, courses de résistance de différents sujets.

l'allure, c'est-à-dire avec le temps employé pour parcourir 50^m . Pour estimer la durée absolue d'une expérience, il faut savoir que la rotation du cylindre entraîne le papier avec une vitesse de $0^m,30$ à l'heure, soit $0^e,5$ par minute.

» Afin de simplifier la représentation des tracés, on peut remplacer la ligne sinueuse par une courbe qui en joindrait tous les angles saillants par en haut ou par en bas. C'est ainsi que sont représentées les courbes des autres expériences *bcd...i*.

» Cette disposition expérimentale suffit déjà pour un certain nombre d'études : elle permet, par exemple, de déterminer pour chaque individu son allure propre, c'est-à-dire le temps qu'il met à parcourir un ou plusieurs kilomètres à son pas habituel. On voit que, chez certains sujets, la marche est d'une étonnante uniformité, tandis que chez d'autres elle s'accélère sensiblement pendant les premiers quarts d'heure, puis se ralentit peu à peu sous l'influence de la fatigue.

(4)

» D'autres fois, il s'agit de comparer, au point de vue de la vitesse ou du fond, des marcheurs ou des coureurs différents. Il n'est pas besoin de faire marcher ou courir ensemble ces différents individus, comme cela se pratique dans les épreuves ordinaires où l'amour-propre supplée souvent aux aptitudes physiques. Mais on recueille pour chacun de ces sujets sa feuille odographique et l'on peut faire à un moment quelconque la comparaison des tracés. On voit sur la *fig. 1*, en *g, h, i*, trois tracés qui montrent que des sujets différents ont fait en courant trois tours de piste, soit $1^{\text{km}},5$, l'un en $9^{\text{m}}25^{\text{s}}$, l'autre en $10^{\text{m}}35^{\text{s}}$, le troisième en $11^{\text{m}}34^{\text{s}}$.

» J'ai constaté par des expériences analogues l'influence favorable que des talons bas exercent sur la rapidité de la marche, et j'ai observé sur certains sujets que l'allure est plus rapide quand la semelle est un peu longue, que si la chaussure est plus courte.

» Enfin, s'il s'agit d'apprécier l'influence que le rythme exerce sur la vitesse de la marche ou de la course, il faut ajouter aux appareils ci-dessus décrits un instrument capable de régler ce rythme avec une grande précision.

» Je me sers pour cela d'un timbre électrique actionné par un pendule à longueur variable. Ce timbre sonne au milieu de la piste en un lieu élevé, de manière que le marcheur l'entende distinctement. Rien n'est plus facile que de régler son allure sur le rythme du timbre, et comme on sait exactement le nombre des battements du pendule par minute, on en déduit le nombre de pas effectués dans le temps employé à faire un tour de piste, c'est-à-dire 500^{m} . De cette mesure ressort à son tour celle de la longueur moyenne du pas (¹).

» Cherchons d'abord quelle est l'influence d'un rythme plus ou moins accéléré sur la vitesse de l'allure.

» Nous convenons, par exemple, que, à chaque sonnerie du timbre, le pied droit frappera sur le sol; on aura donc fait, en un tour de piste, autant de doubles pas qu'il y a eu de coups du timbre. En commençant par un rythme lent, 40 coups à la minute, et en accélérant le rythme dans une série d'expériences successives, de manière à faire 45, 50,

(¹) En effet, supposons que la marche soit faite au rythme de 65 doubles pas à la minute, et que 1000^{m} aient été parcourus en $9^{\text{m}}22^{\text{s}}$. Le nombre des pas sera $(9 + \frac{22}{60}) \times 65 = 609$ pas doubles. Or, si 1000^{m} correspondent à 609 pas doubles, chaque double pas aura pour longueur $1^{\text{m}},67$.

(5)

55, ... doubles pas à la minute, on voit que le temps nécessaire à parcourir un même chemin change d'une expérience à l'autre. Or le rapport de la vitesse au rythme de la marche est assez compliqué.

» Les frères Weber avaient cru pouvoir formuler comme une loi que les pas sont d'autant plus longs que le rythme de la marche est plus rapide; mais cette formule est trop générale, ainsi qu'on va le voir par l'expérience suivante.

» On a fait à chaque épreuve trois tours de piste, afin d'obtenir avec plus d'exactitude la longueur du pas moyen ⁽¹⁾. Le Tableau ci-dessous montre que, à partir d'une certaine fréquence du rythme, la vitesse, qui s'était d'abord accrue, commence à diminuer et que le pas, dont la longueur avait d'abord augmenté, est devenu plus court :

Nombre de secondes employées à parcourir 1542 ^m .	Rythme ou nombre de doubles pas à la minute.	Nombre des pas dans 1542 ^m .	Longueur du pas double.
20.30 = 1230 ^s	60	1135	1,35 ^m
18.40 = 1120	65	1120	1,37
16.27 = 987	70	1062	1,45
14.38 = 878	75	1013	1,51
13.52 = 832	80	1024	1,50
13. 3 = 783	85	1034	1,49
14. 1 = 841	90	1164	1,32

» On peut rendre plus claire la signification de ce Tableau en construisant les courbes de la vitesse de l'allure et de la longueur du pas en fonction du rythme de la marche. La *fig. 2* montre bien cette relation. On y voit :

» 1° Que la longueur du pas s'accroît peu jusqu'au rythme 65, à partir duquel le pas s'allonge jusqu'au rythme 75, où il décroît ;

» 2° Que la vitesse de la marche augmente avec l'accélération du rythme jusqu'à 85 pas à la minute; à partir de ce chiffre, l'accélération du rythme ralentit la marche.

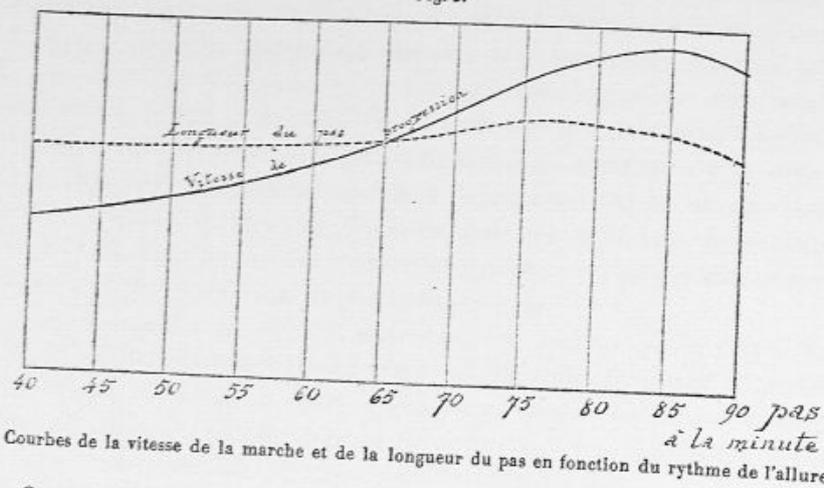
» Ainsi il y a une limite, à déterminer par l'expérience, limite à partir de laquelle il n'y a que désavantage à presser la mesure du tambour ou du clairon qui règle le pas du soldat. Sur ce point comme sur beaucoup d'au-

(1) L'espace réellement parcouru était de 1537^m,6, ce qui tient à ce que la marche ne s'effectuait pas dans l'axe de la piste, dont la longueur est de 500^m, mais à sa circonférence extérieure.

(6)

tres, il faudra des expériences répétées pour déterminer les conditions les plus favorables à l'utilisation des forces humaines.

Fig. 2.

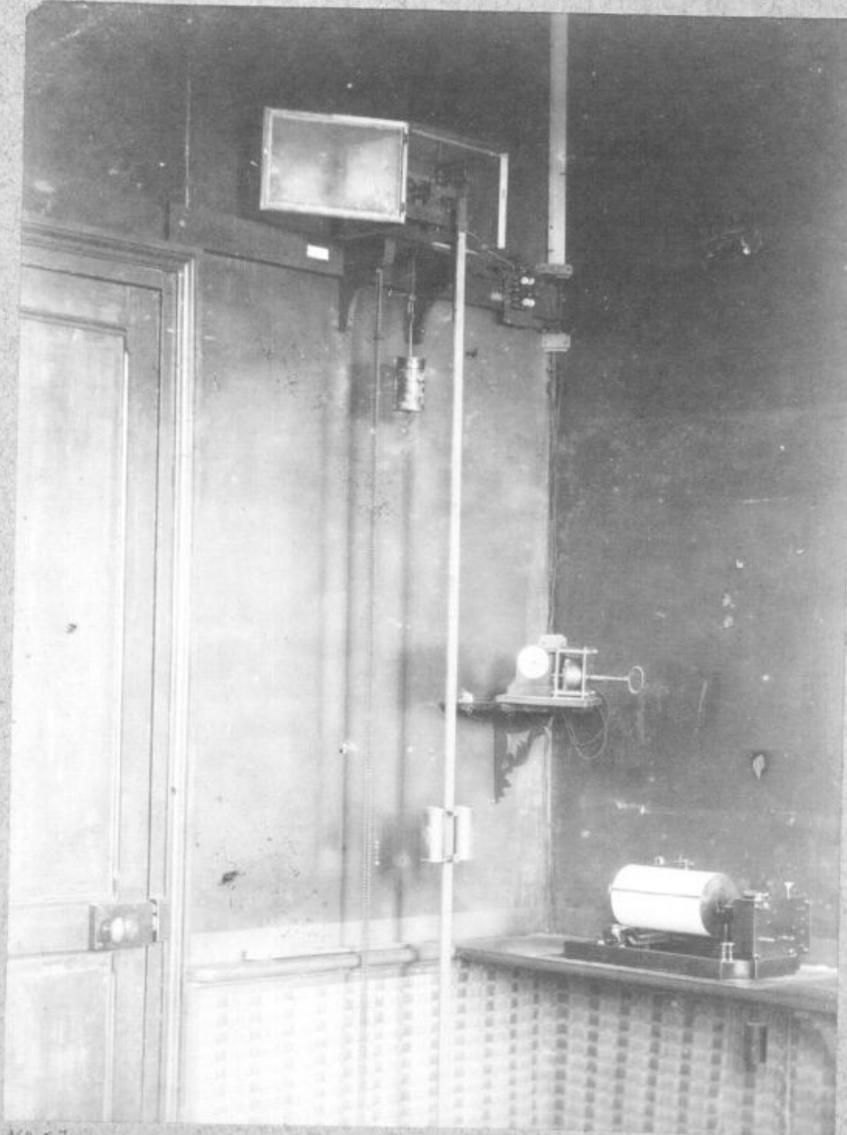


« Quant à l'interprétation physiologique des influences qui modifient la vitesse de l'allure ou la longueur du pas, elles ressortent déjà assez clairement de l'analyse photographique du mouvement du marcheur. Mais il y a tout avantage à ajourner cette interprétation jusqu'à ce que les expériences dont je viens de tracer le programme soient terminées. »

Mesure des vitesses de progression

43

Odographe fixe de la station Physiologique.
Pendule variable donnant le rythme au marcheur.



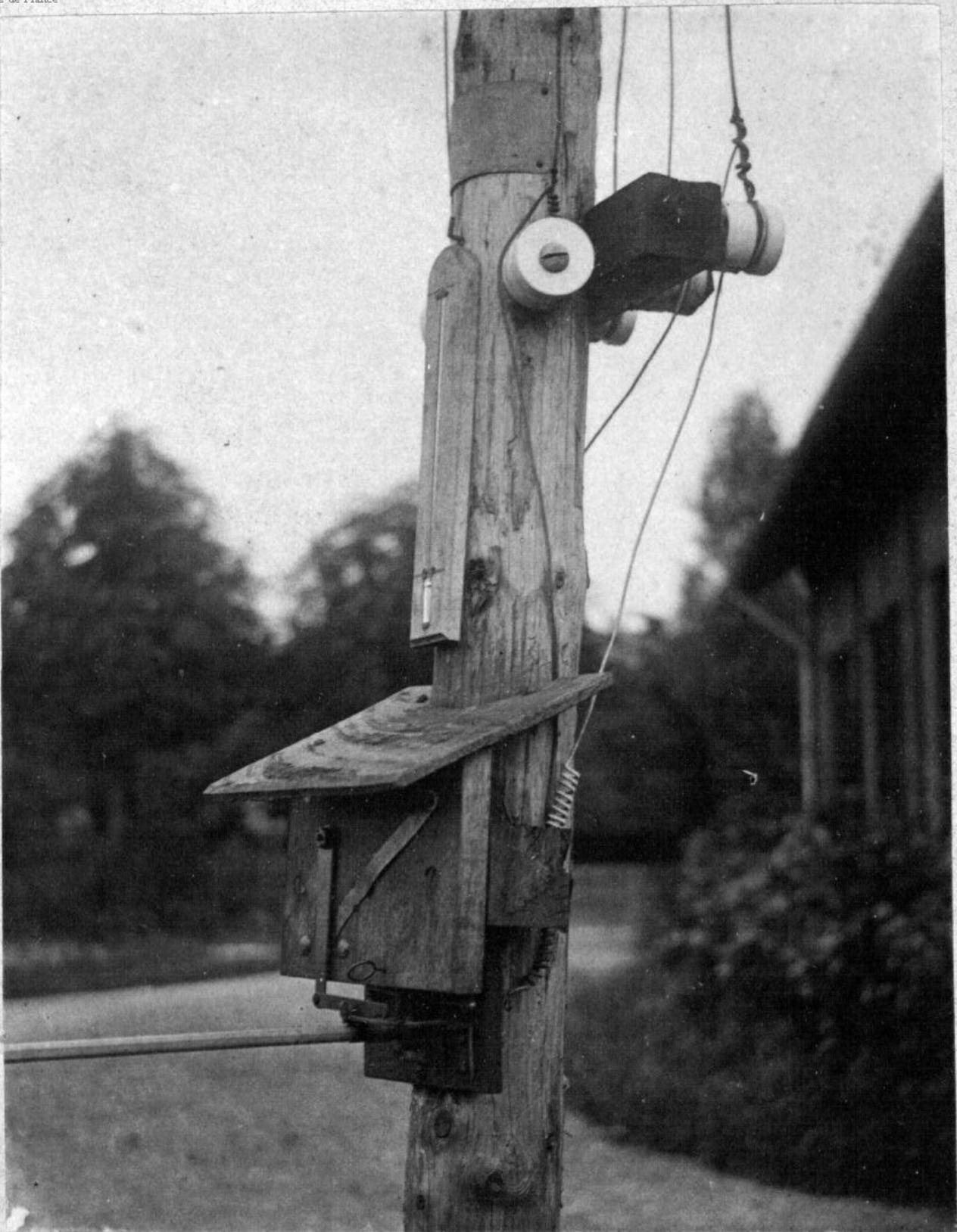
Compteur du nombre
de pas.

N° 57



N:60

*Marcheur signalant son passage à un poteau télégraphique.
en déviant une baguette mise en travers de son chemin et
interrompant ainsi un circuit électrique fermé.*

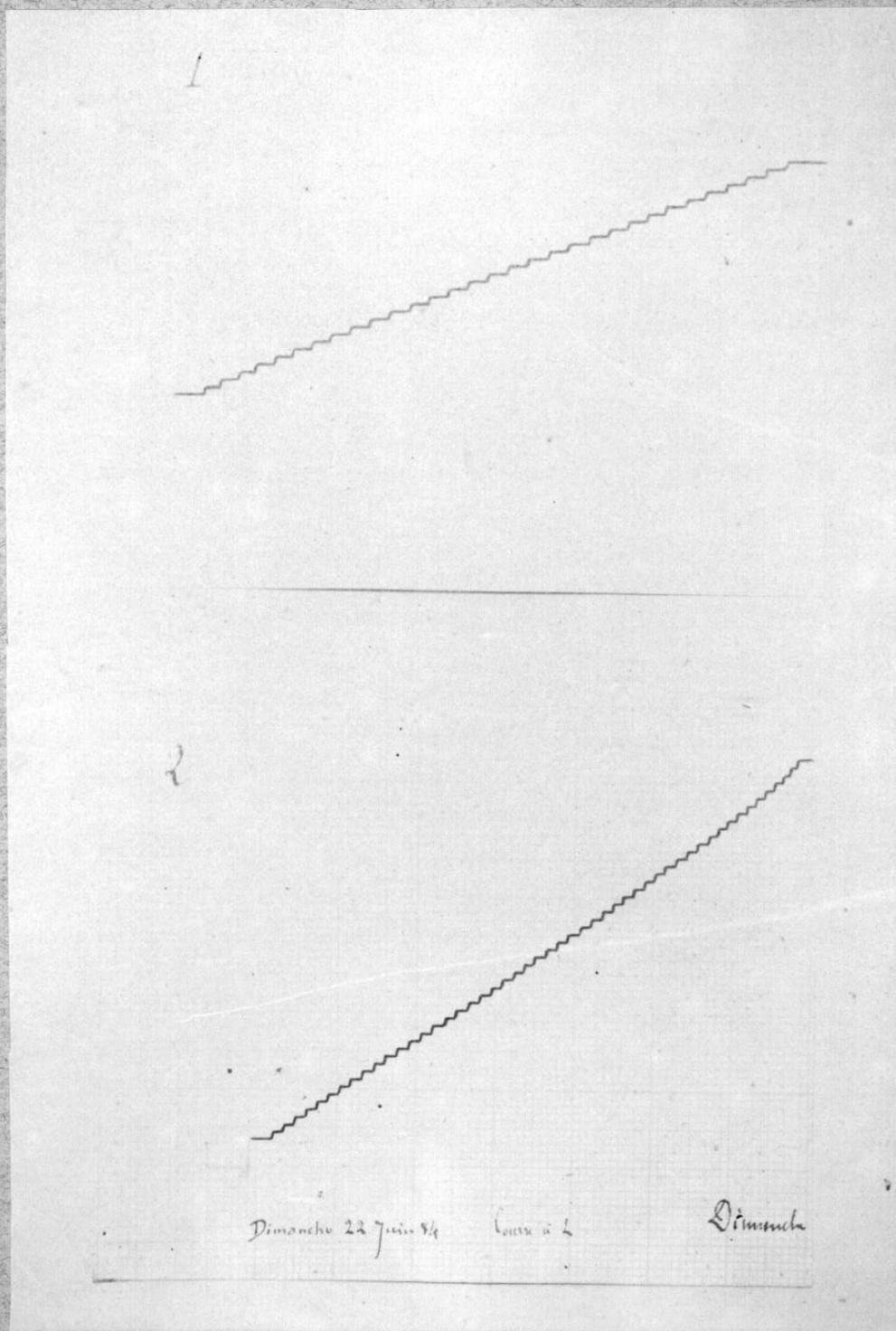


N° 58

1^{er} poteau interrupteur

Interrupteur automatique du courant dans les appareils
inscripteurs au moment du passage d'un homme sur la
piste d'extérieure

Mesure des vitesses de progression
dans la locomotion humaine.

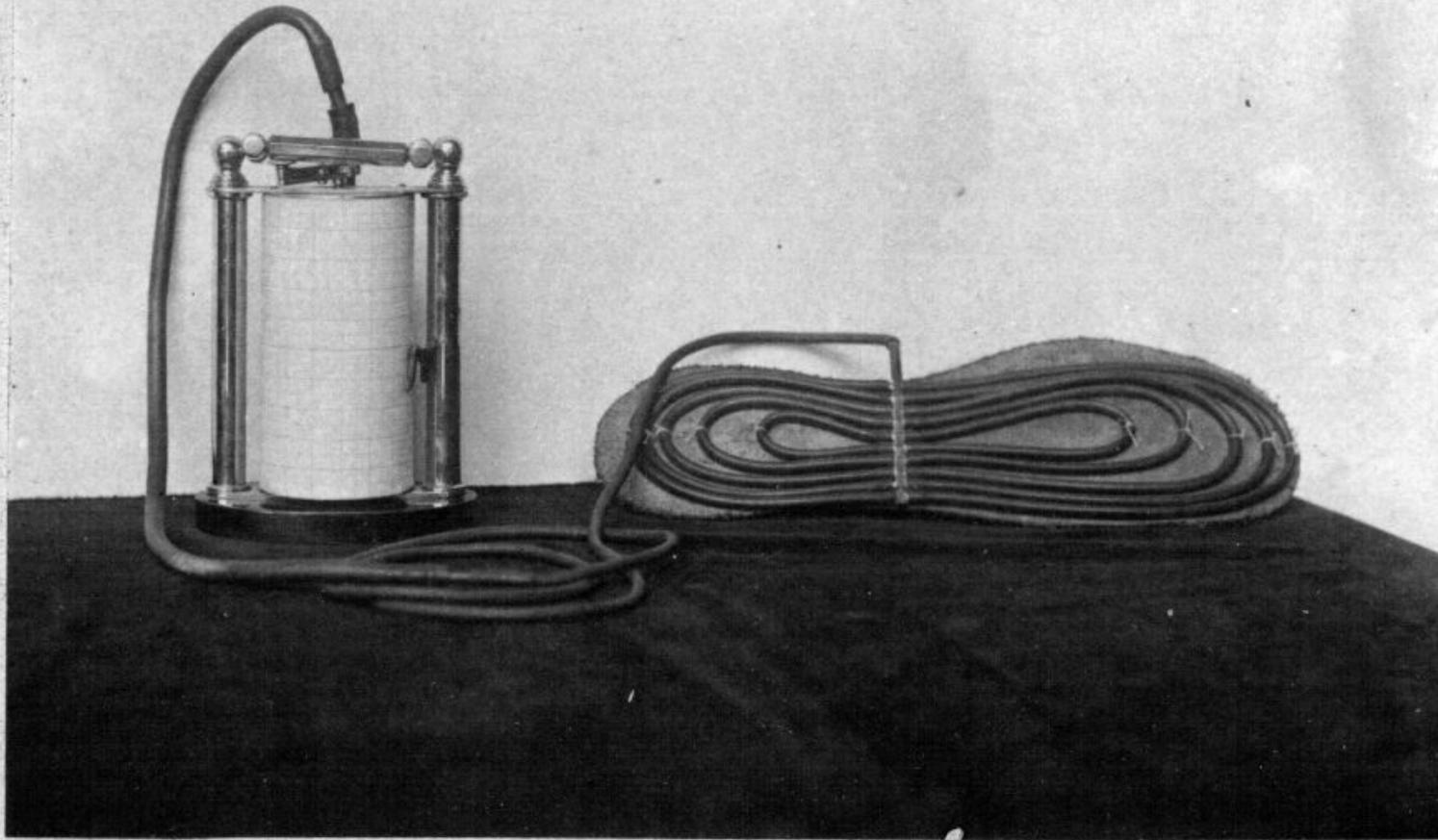


N°61

Tracés de l'odographe fixe.

1 Marche

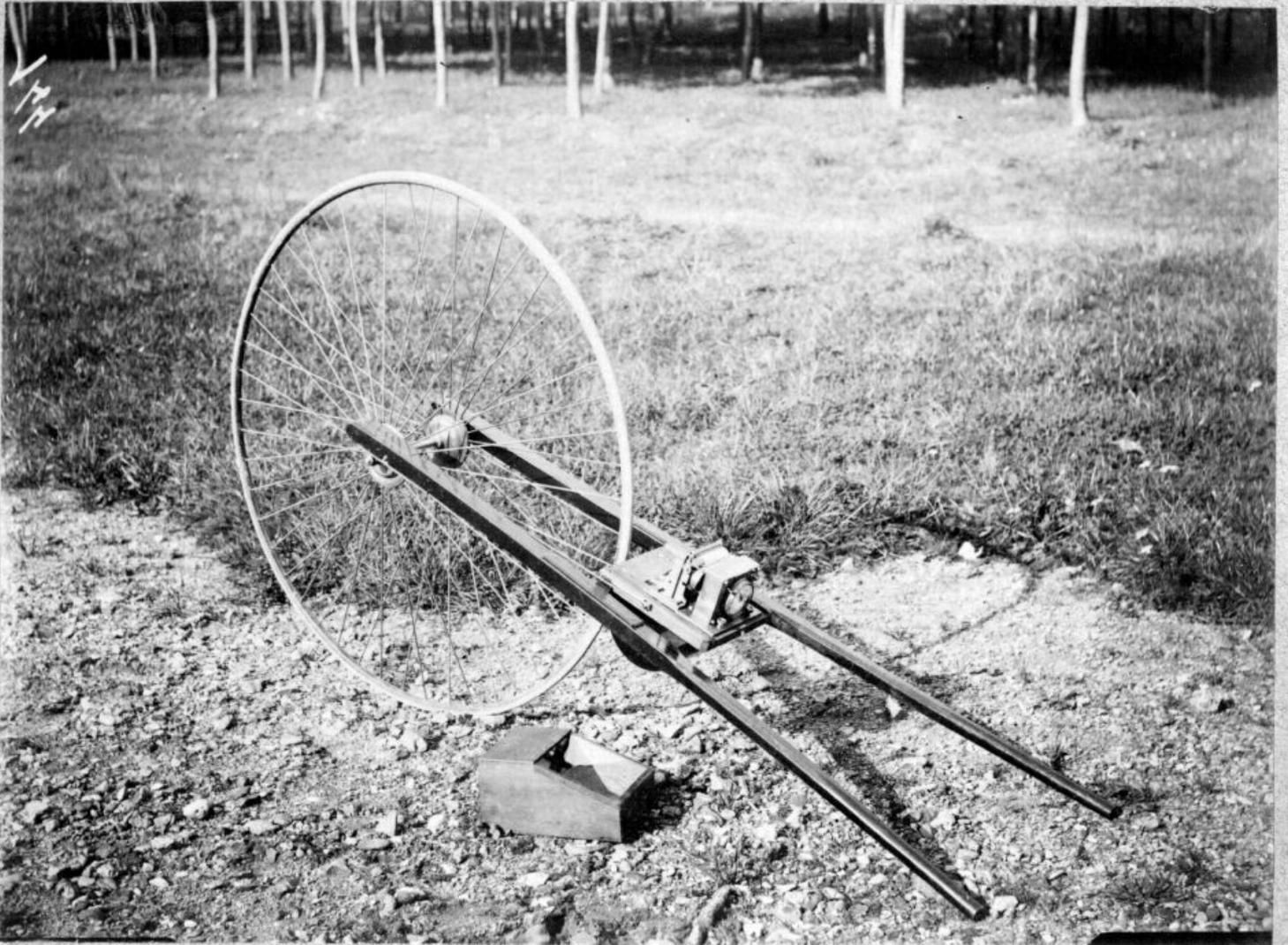
2 Course accélérée



N^o 56.

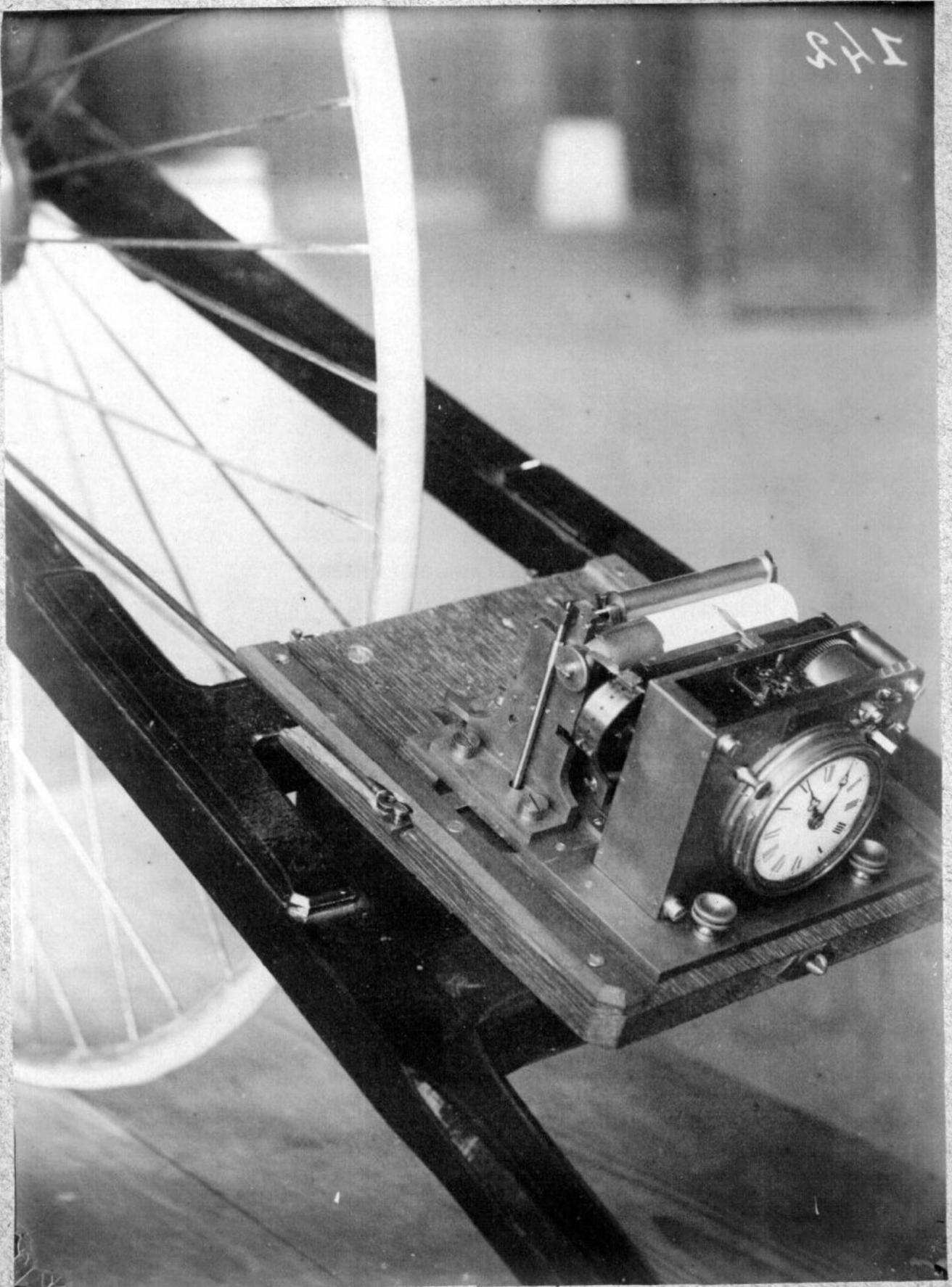
*Odographe portatif communiquant avec une semelle exploratrice
et donnant la variation du nombre des pas en fonction du temps.*

Locomotion humaine.



N: 144

Pédographe roulant
destiné à enregistrer les variations de la vitesse de progression
d'un homme ou d'une troupe en marche



142

N° 142

*Disposition du mécanisme de l'odographe
Roulant.*

Chaussures à talons et à semelles mobiles.



N° 63

*Pour déterminer l'influence de la longueur¹ de la rigidité²
de la semelle ainsi que la hauteur du talon sur la longueur
du pas.*

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CI;
séance du 9 novembre 1885.

Mesure du travail mécanique effectué dans la locomotion de l'homme;

PAR MM. MAREY ET DEMENY.

« § I. Il est fort important, au point de vue pratique, d'estimer la quantité de travail musculaire dépensé par l'homme dans les différentes formes de la locomotion. Cette évaluation n'a encore été faite qu'au point de vue mécanique et seulement pour le cas où l'homme monte ou descend une route inclinée. Le poids du corps du marcheur, multiplié par la hauteur verticale dont il s'est élevé ou dont il est descendu, fournit la mesure du travail positif ou négatif, autrement dit du travail moteur ou du travail résistant qu'il a effectué. Dans l'un et dans l'autre genre de travail, une fatigue musculaire se produit; car nos muscles se contractent aussi bien pour élever notre corps que pour en ralentir la chute : à cet égard, le point de vue du physiologiste est différent de celui du mécanicien. En effet, si un homme, pesant 75^{kg}, s'élève de 100^m sur un chemin montant, puis redescend au point d'où il était parti, il aura dépensé contre la pesanteur

M. et D.

(2)

7500^{kgm}; mais la pesanteur les lui aura rendus dans la descente et, en définitive, le marcheur n'aura effectué aucun travail extérieur.

» Pour le physiologiste, au contraire, les muscles, ayant agi dans la descente comme dans la montée, auront fourni un travail total de 15 000^{kgm}. La fatigue musculaire qui suit un exercice de ce genre montre bien qu'il a exigé une dépense de force, et la contradiction apparente que nous signalions tout à l'heure disparaît si l'on considère que le muscle se fatigue aussi bien à faire de la chaleur pendant le travail résistant de la descente qu'à produire du travail extérieur dans l'ascension. On est donc autorisé, lorsqu'on évalue la dépense de force dans les différents actes musculaires, à considérer le travail moteur et le travail résistant comme devant s'ajouter l'un à l'autre et ne se neutralisant pas.

» Dans la marche ou dans la course sur un terrain parfaitement horizontal, il se fait continuellement une série de petits travaux, alternativement moteurs et résistants, dont la somme constitue, au bout d'un certain temps, une assez grande dépense de force musculaire. C'est cette dépense que nous avons cherché à mesurer par des expériences.

» 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'accélégrant et se ralentissant tour à tour pendant chaque oscillation. D'autres mouvements encore s'effectuent de droite à gauche et réciproquement, de sorte que la trajectoire du centre de gravité du corps s'infléchit en réalité suivant les trois dimensions de l'espace (*). Mais, comme les mouvements de cette dernière sorte sont peu étendus, nous les négligerons et ne considérerons que les déplacements du centre de gravité, dans un plan vertical parallèle à la direction de la marche.

» 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 l'emploi de la chronophotographie (2) que nous avons

(*) Voir la Note du 2 juin 1885 sur les *Images stéréoscopiques de la trajectoire d'un point du corps pendant la marche, la course et les autres allures*.

(2) Voir MAREY, *La méthode graphique* (Supplément, p. 47).

obtenu la mesure des différents mouvements que présente la masse du corps ou celle des membres inférieurs dans les différents genres de locomotion.

» Il y a donc lieu de faire concourir trois éléments principaux dans la mesure du travail musculaire dépensé par l'homme dans la locomotion sur un plan horizontal :

- » 1^o Le travail suivant la verticale;
- » 2^o Le travail suivant l'horizontale;
- » 3^o Le travail nécessaire à l'oscillation du membre inférieur pendant sa suspension.

» A. *Travail musculaire dépensé suivant la verticale.* — La valeur de ce travail s'obtiendrait en multipliant le poids du corps, rapporté à son centre de gravité, par la hauteur dont ce centre s'élève et s'abaisse tour à tour pendant chacune des oscillations verticales produites par l'action des membres inférieurs.

» Mais, comme le centre de gravité est un point idéal qui se déplace sans cesse à l'intérieur du corps, nous avons cherché quel était le point matériel dont on devrait recueillir la trajectoire chronophotographique pour obtenir une courbe aussi approchée que possible de celle du centre de gravité. C'est le sommet de la tête qui remplit le mieux ces conditions. En effet, ce point situé sur l'axe vertical du corps échappe aux mouvements de torsion suivant cet axe, qui ont été décrits par M. Carlet (¹), et dont l'effet est d'altérer la vitesse apparente de la translation du corps. Quant aux balancements de l'axe du tronc dans le plan vertical de la progression, on en tient compte s'il y a lieu.

» La trajectoire chronophotographique du sommet de la tête pendant la marche est une courbe sinueuse représentée *fig. 1*, qui passe périodiquement par les mêmes maxima au milieu de l'appui du pied et les mêmes minima aux instants du posé (²). Les droites parallèles ponctuées, tangentes aux inflexions supérieures et inférieures de cette 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 *fig. 1* en l'agrandissant au moyen d'instruments d'optique

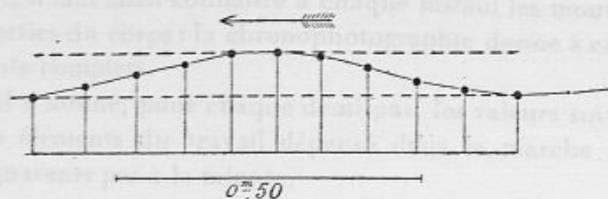
(¹) CARLET, *Essai expérimental sur la locomotion de l'homme* (*Annales des Sciences naturelles*, 1872).

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

(4)

jusqu'à ses dimensions réelles, de telle sorte que la longueur de la figure corresponde à la longueur d'un demi-pas mesuré sur le terrain.

Fig. 1.



Portion de la trajectoire de la tête d'un homme marchant à la cadence de 70 pas à la minute.

Les deux lignes horizontales ponctuées indiquent par leur distance la valeur des oscillations verticales du tronc.

Les lignes verticales servent à projeter horizontalement la valeur de la vitesse au bout d'intervalles de temps égaux.

La flèche indique le sens de la progression.

» Le travail produit à chaque élévation et à chaque abaissement du corps se mesure donc 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 75^{kg} et l'amplitude des oscillations verticales de $0^{\text{m}},04$, chaque élévation du corps représentera un travail positif de 3^{kgm} , chaque abaissement un travail négatif de semblable valeur et, comme il y a deux oscillations de ce genre dans un pas complet, le travail musculaire correspondant aux oscillations verticales sera de 12^{kgm} à chaque pas.

» Mais 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 emmagasiné dans les muscles pendant chaque phase de descente est restituée dans la phase d'ascension qui suit. Mais il est impossible jusqu'ici d'estimer la valeur de cette restitution de travail, dont l'existence est toutefois incontestable.

» 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 variations périodiques de 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 $\frac{1}{30}$ 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. Dans cette courbe, les ordonnées expriment, en mètres par seconde, les vitesses de la translation à des instants successifs. Des vitesses maxima et minima que prend périodiquement la masse du corps on déduit les deux valeurs correspondantes de la force vive qu'a possédée cette masse.

» Le travail moteur et le travail résistant effectués par les muscles égalent chacun la moitié de cette variation de force vive, de sorte que la somme de ces deux travaux a pour valeur limite supérieure la variation de force vive tout entière. Mais, comme on l'a vu pour les oscillations suivant la verticale, il se fait ici encore une restitution partielle du travail emmagasiné pendant l'effort résistant, de sorte que la valeur réelle du travail dépensé est inférieure au chiffre que donne le calcul.

» C. *Travail musculaire dépensé pour le déplacement de chacun des membres inférieurs pendant sa suspension.* — Dans aucun cas, le transport du membre inférieur ne répond à l'oscillation d'un pendule : c'est le mouvement très complexe d'un système 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, tandis que le point de suspension lui-même se meut d'un mouvement varié sur sa trajectoire curviligne.

» Dans cette translation du membre, l'action musculaire est secondée par la pesanteur, mais n'est jamais nulle, surtout pour les allures rapides.

» La mesure du travail musculaire est alors extrêmement complexe ; pour l'estimer approximativement, on peut employer plusieurs méthodes : l'une d'elles consiste à déterminer le moment d'inertie du membre inférieur par rapport à son axe de rotation, et à mesurer sur les chronophotographies la vitesse angulaire maximum qu'il acquiert. On a ainsi les éléments nécessaires pour déterminer l'énergie communiquée au membre entier. Encore faut-il souvent tenir compte de la déformation du membre inférieur par ses mouvements de flexion ou d'extension.

» M. Demeny a fait ainsi le calcul des différents éléments du travail musculaire, pour la marche et pour la course, en faisant varier la fréquence des pas. La valeur absolue des dépenses de travail, suivant la vitesse de l'allure, est exposée ci-après.

(6)

» § II. La méthode d'évaluation du travail mécanique dépensé dans la locomotion humaine une fois établie, nous l'avons appliquée à diverses allures. Pour ces mesures, il faut d'abord déterminer le poids total du corps et les poids relatifs des membres du tronc et de la tête (M. le professeur Sappey a bien voulu faire pour nous quelques-unes de ces pesées sur des cadavres); il faut aussi connaître à chaque instant les mouvements des différentes parties du corps: la chronophotographie donne à cet égard des renseignements complets.

» Le calcul a donné, pour chaque demi-pas, les valeurs suivantes pour les différents éléments du travail dépensé dans la marche lente, à la cadence de quarante pas à la minute.

Translation du membre inférieur.....	^{kgm} 0,3
Oscillations verticales du corps.....	6,2
Accélération et ralentissements de la translation horizontale du corps.....	<u>2,5</u>
Total.....	9,0

» Cette évaluation, avons-nous dit, n'est qu'approximative; elle semble toutefois mériter assez de confiance si l'on considère que l'élément de travail dont l'évaluation est le plus incertaine, celui qui correspond à la translation du membre, ne représente qu'une très faible fraction du travail total dépensé dans un pas. C'est une limite supérieure de la valeur réelle.

» Du reste, l'estimation rigoureuse du travail dépensé à une allure quelconque a bien moins d'intérêt que la recherche des variations de cette dépense à mesure que l'allure s'accélère. En effet, si nous calculons, pour le même individu, la dépense de travail qui correspond à la course la plus rapide, nous trouvons des valeurs bien différentes de celles que nous donnait le pas lent.

Translation du membre inférieur.....	^{kgm} 3,4
Oscillations verticales du corps.....	2,3
Accélération et ralentissements dans le sens horizontal.....	<u>18,4</u>
Total.....	24,1

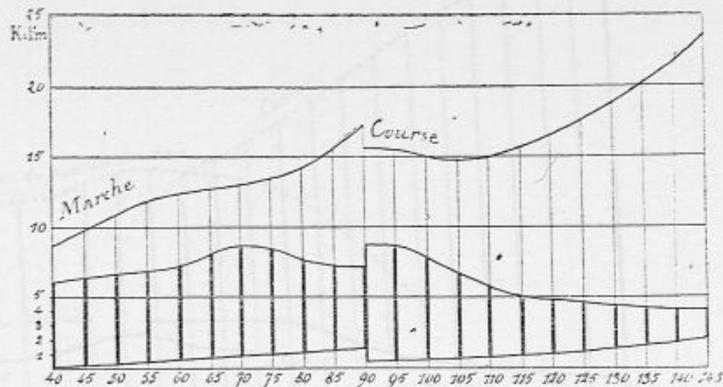
» Ainsi la dépense de travail dans un demi-pas effectué sur terrain plat varie de 9^{kgm} à 24^{kgm} . Si l'on tient compte du nombre des pas effectués en une minute à ces allures extrêmes, on trouve que la dépense de travail dans la marche lente serait de 720^{kgm} et, dans la course rapide, de 6748^{kgm} , soit dans le premier cas 12^{kgm} et dans le second cas 112^{kgm} par seconde.

(7)

» Si l'on compare entre elles les valeurs des différents éléments du travail dépensé dans un pas, on trouve qu'ils ne sont pas influencés de la même manière, par la rapidité de l'allure. Ainsi, dans la marche lente, le travail dépensé dans les oscillations verticales est plus grand que celui qui correspond aux différences dans la vitesse de la translation horizontale; dans la course rapide, c'est l'inverse qui se produit.

» Il était donc nécessaire de suivre à travers toutes leurs phases les variations que chacun des éléments du travail éprouve sous l'influence d'une accélération graduelle de la cadence des allures. Pour rendre ces variations plus saisissables on les a ramenées (*fig. 2*) à la forme graphique.

Fig. 2.



Valeurs relatives du travail dépensé dans les différents actes qui constituent un pas. Les expériences ont été faites sur un homme pesant 64^{kg}, marchant ou courant sur un terrain ferme parfaitement horizontal.

» Dans la construction de ces courbes, on a pris pour abscisses les nombres des pas effectués à la minute et, pour les ordonnées, on a ajouté bout à bout les longueurs correspondant à chacun des éléments du travail total.

» Pour toutes les cadences ces valeurs sont disposées de bas en haut suivant le même ordre : 1° la valeur du travail dépensé dans la translation du membre inférieur; 2° celle qui correspond aux oscillations verticales du corps; 3° celle qui est liée aux accélérations ou ralentissements de la translation horizontale.

» Les courbes de la *fig. 2* montrent que les différents éléments du tra-

vail total varient de façons qui semblent bizarres; mais ces variations s'expliquent aisément par certaines conditions cinématiques ou dynamiques propres aux différentes allures.

» 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, pour quatre-vingt-dix 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 est plus grande si l'on court que si l'on marche.

» 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 de l'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 (¹). Or, comme le déplacement angulaire du membre inférieur est à peu près le même dans la marche et dans la course, la vitesse sera d'autant moindre que la période d'oscillation aura plus de durée.

» Une conséquence physiologique de cette inégalité de la durée d'oscillation du membre aux différentes allures, c'est la tendance instinctive qu'on éprouve à courir, au lieu de marcher, aussitôt qu'on impose à l'allure une cadence trop rapide. C'est une des nombreuses manifestations de notre propension naturelle à rechercher le moindre effort dans tous les actes musculaires.

» B. *Variations du travail dépensé dans les oscillations verticales du corps.*

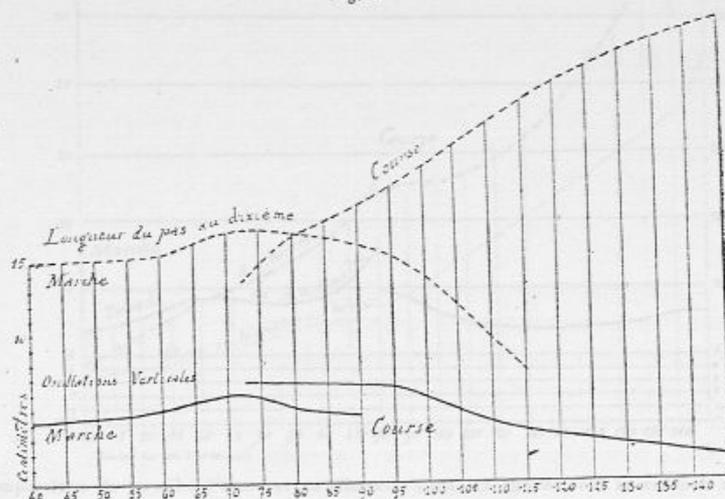
— La *fig. 2* montre que cet élément du travail ne croît pas régulièrement avec la rapidité de la cadence. Dans la marche, ce travail augmente rapidement entre cinquante-cinq et soixante-dix pas à la minute, puis va en décroissant; dans la course, il est très grand pour les cadences les plus lentes et diminue à mesure que l'allure devient plus rapide. Les deux

(¹) Voir à ce sujet DEMENY, *Variations de la durée du double appui des pieds dans la marche de l'homme* (séance du 15 juin 1885).

facteurs de cet élément du travail étant le poids du corps et l'amplitude de ses oscillations verticales, c'est aux variations de celles-ci que se rapportent les inégalités du travail dépensé aux diverses allures.

» La photographie et l'inscription directe des oscillations verticales du corps 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 soixante-dix pas environ, puis diminue rapidement à mesure que la cadence s'accélère ⁽¹⁾, il est naturel que le travail correspondant à ces différentes cadences éprouve des variations semblables.

Fig. 3.



Variations des oscillations verticales du corps dans la marche et dans la course à des cadences variant de 40 à 140 pas à la minute.

Comparaison de la courbe des oscillations à celle de la longueur des pas.

» 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,

⁽¹⁾ MAREY, *Études sur la marche de l'homme au moyen de l'odographe*. Note du 3 novembre 1884.

il faut que le corps ait été élevé très haut pour ne retomber que tardivement sur le membre et 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: on a exprimé ces rapports dans la *fig. 3*.

» *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 la translation.

» De ces mesures on peut tirer des applications pratiques à la meilleure utilisation des forces musculaires dans la marche ou dans la course, suivant 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 temps le plus court possible.

» On devra non seulement recourir à des allures différentes, mais régler chacune d'elles sur la cadence la plus favorable.

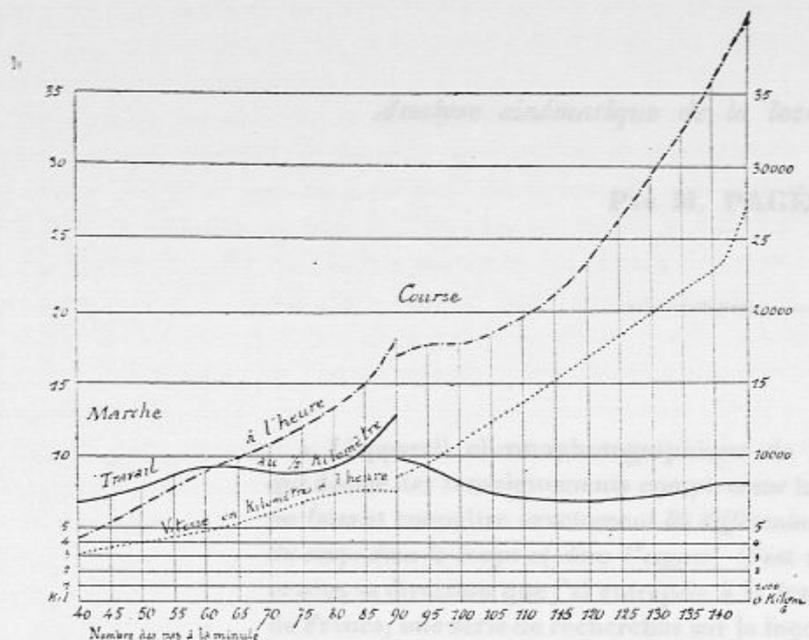
» La *fig. 2* montrait déjà que, pour la marche, dans les cadences rapides, à partir de 70 doubles pas à la minute, la dépense de travail croît rapidement; que pour la course, le travail total, assez grand aux cadences les plus lentes, diminue d'abord quand la fréquence des pas s'accroît, puis augmente de nouveau. Il y a donc, pour chaque allure, certaines cadences particulièrement favorables: ce sont celles où la vitesse croît plus vite que la dépense de travail.

» D'autres considérations doivent intervenir encore pour motiver le choix des allures. 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 longue marche au bout de laquelle on aura dépensé un grand travail, tandis qu'une course rapide épuiserait en très peu de temps la force musculaire, avec une dépense totale de travail beaucoup moindre (*fig. 4*).

» Il y aura donc lieu de déterminer, pour chaque allure, la dépense de travail à l'heure et au kilomètre, ainsi que les relations de la vitesse avec la cadence.

» D'autre part, il faudra répéter sur un grand nombre de sujets ces études, qui n'ont porté jusqu'ici que sur deux hommes, et chercher l'influence du poids et de la taille, celle de la charge portée, de la pente et de la nature du terrain. C'est particulièrement au perfectionnement des exercices du soldat que s'appliquent ces recherches; elles ont excité l'intérêt

Fig. 4.



Comparaison du travail à l'heure et au kilomètre dans des allures dont la cadence s'accélère régulièrement: variations correspondantes de la vitesse.

de quelques officiers supérieurs de notre armée; nous comptons sur leur concours pour les diriger dans le sens le plus utile. »

Pneumographie et Spirométrie

Étude des actes mécaniques de la respiration

et des modifications de ces actes sous l'influence
d'une éducation ou d'un entraînement spécial

Mesure de l'amplitude et du rythme des mouvements
respiratoires

Mesure des volumes d'air inspirés et expirés

Mesure des débits d'air inspirés et expirés

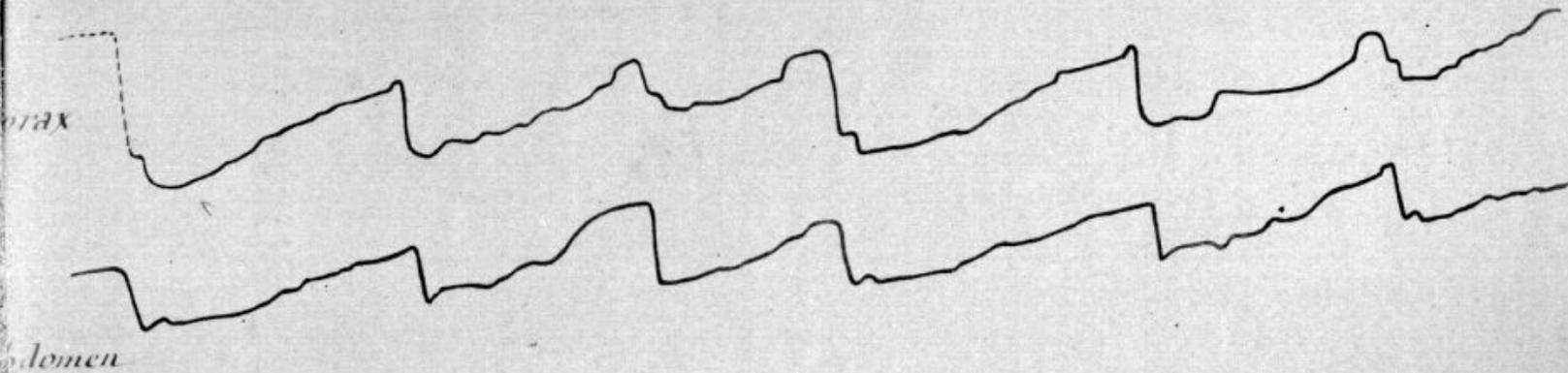
143



*Sujet inscrivant les mouvements respiratoires
du thorax au moyen du pneumographe.*

Spirometrie

Sous du mouvement
et inspiration

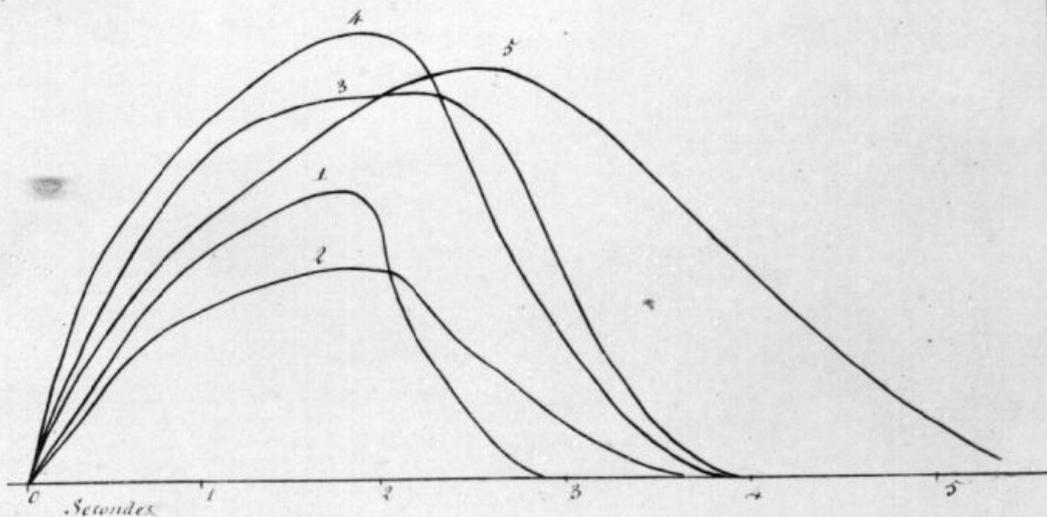


Mouvements de gonflement et de depression du Thorax et de l'Abdomen
inscrits au moyen de deux pneumographes chez un chanteur (M^r Boudouresque)
exécutant l'air des Nonnes de Robert le Diable.

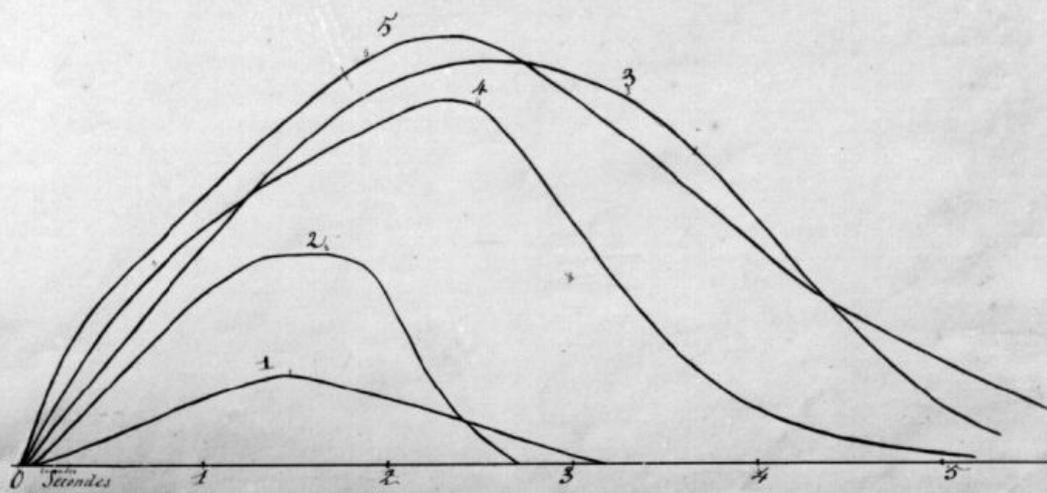
On constate le parallélisme à peu près parfait des mouvements du Thorax et de l'Abdomen.

N.° 168

Chez des sujets ayant subi un entraînement de six mois
à l'école de Gymnastique M. L. de Javelle-le-Haut



Courbes respiratoires prises après une course de 600 mètres au pas gymnastique
Les mêmes numéros d'ordre dans les deux figures correspondent à des sujets
rencontrés le même jour



Courbes respiratoires prises au repos: 1, avant les exercices gymnastiques; 2, au bout d'un mois d'exercices; 3, 4, 5, au bout de
trois, quatre et cinq mois. (Les durées d'un mouvement respiratoire se comptent en secondes sur l'axe des abscisses)

N° 166

Influence de l'entraînement sur le rythme et l'amplitude des mouvements respiratoires des coureurs.

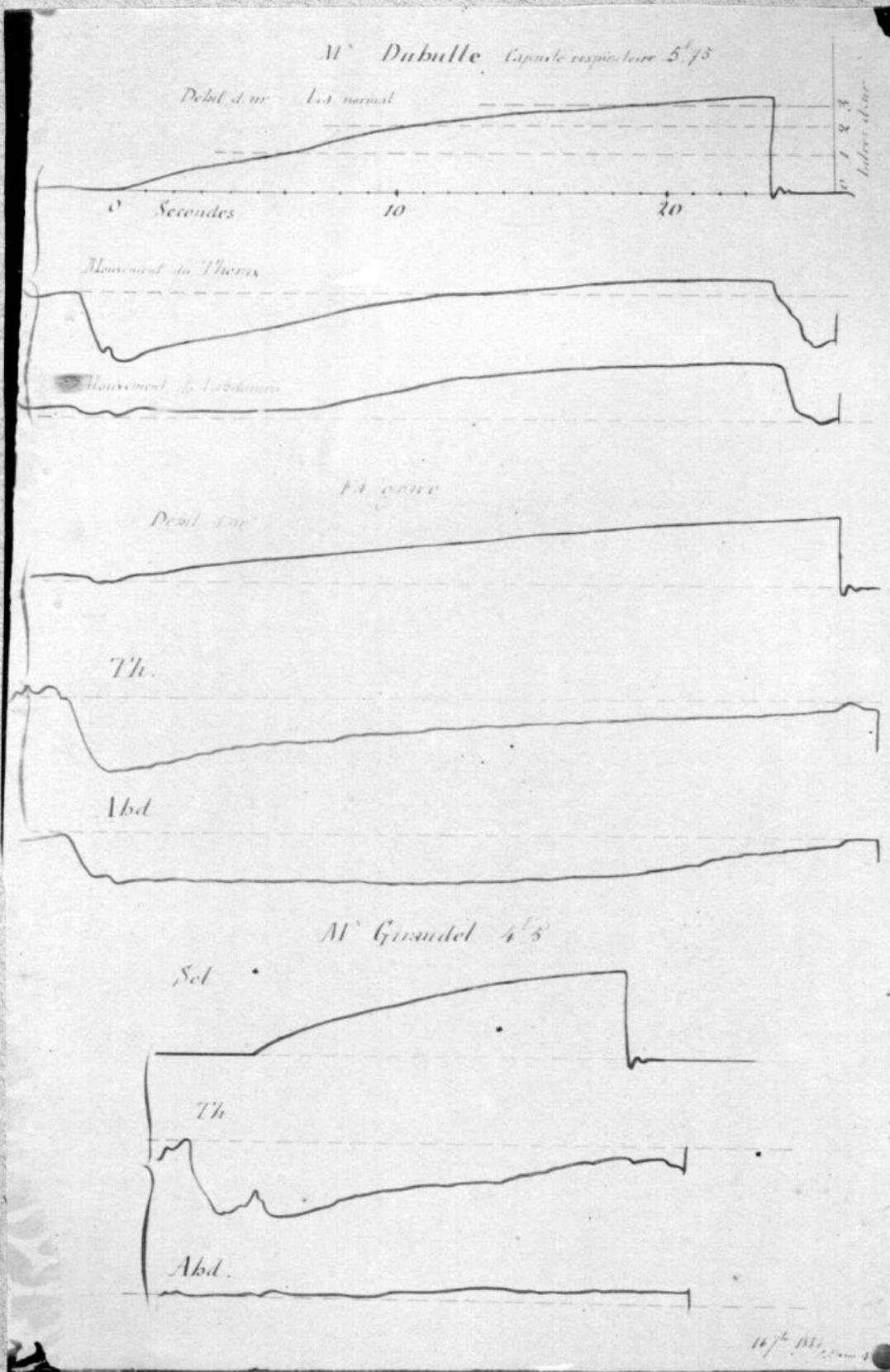
Les courbes pneumographiques ci-dessus montrent que les mouvements respiratoires mesurés après la course chez un sujet entraîné sont devenus lents et d'une grande amplitude. Ils montrent de plus que le sujet conserve à l'état de repos cette dernière manière de respirer.

Spiromètre enregistreur



N° 70

Destiné à mesurer par insufflation et élévation de la pression dans un récipient de 300 litres la quantité d'air inspirée et expirée dans un acte respiratoire et à comparer les mesures avec les indications du pneumographe.

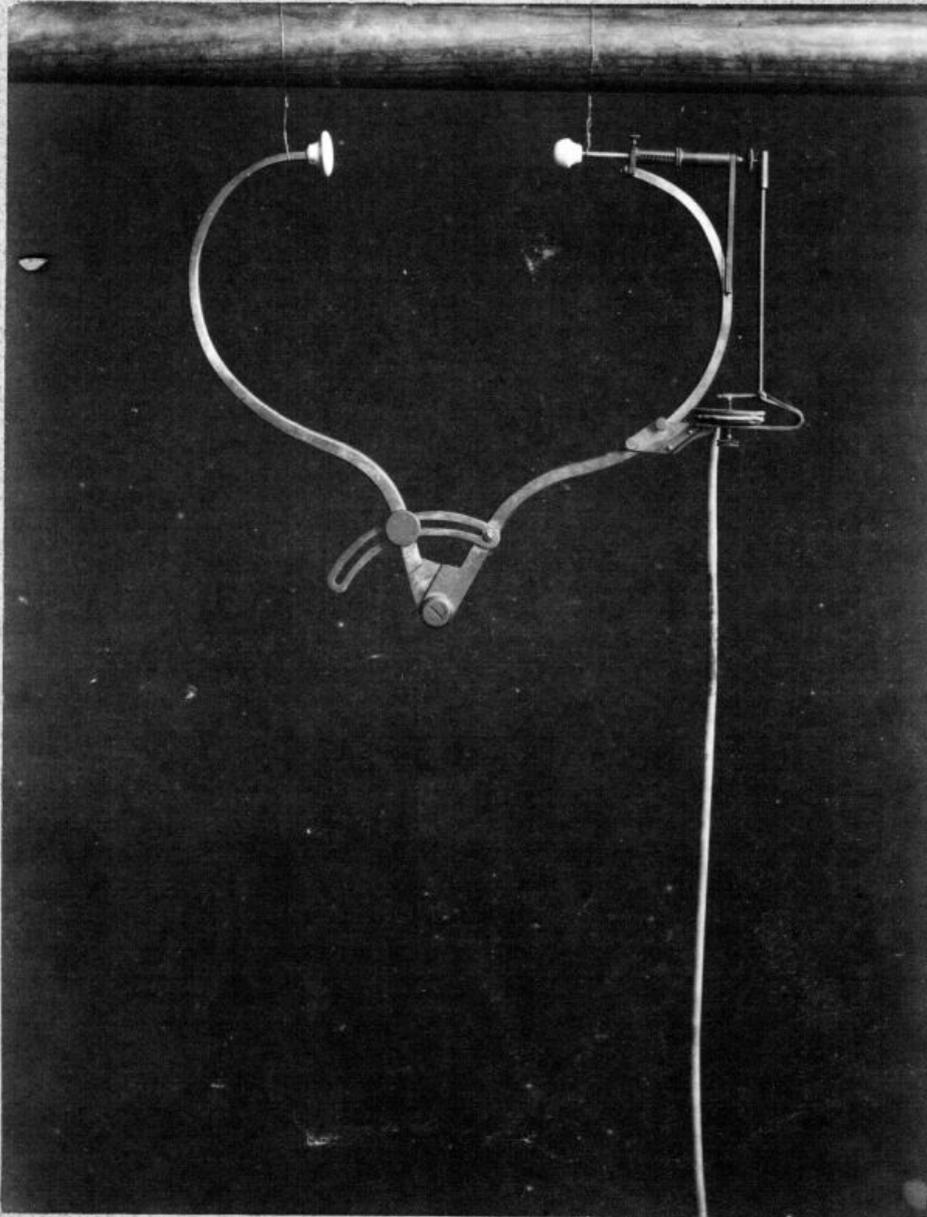


N:167

16/11/1886

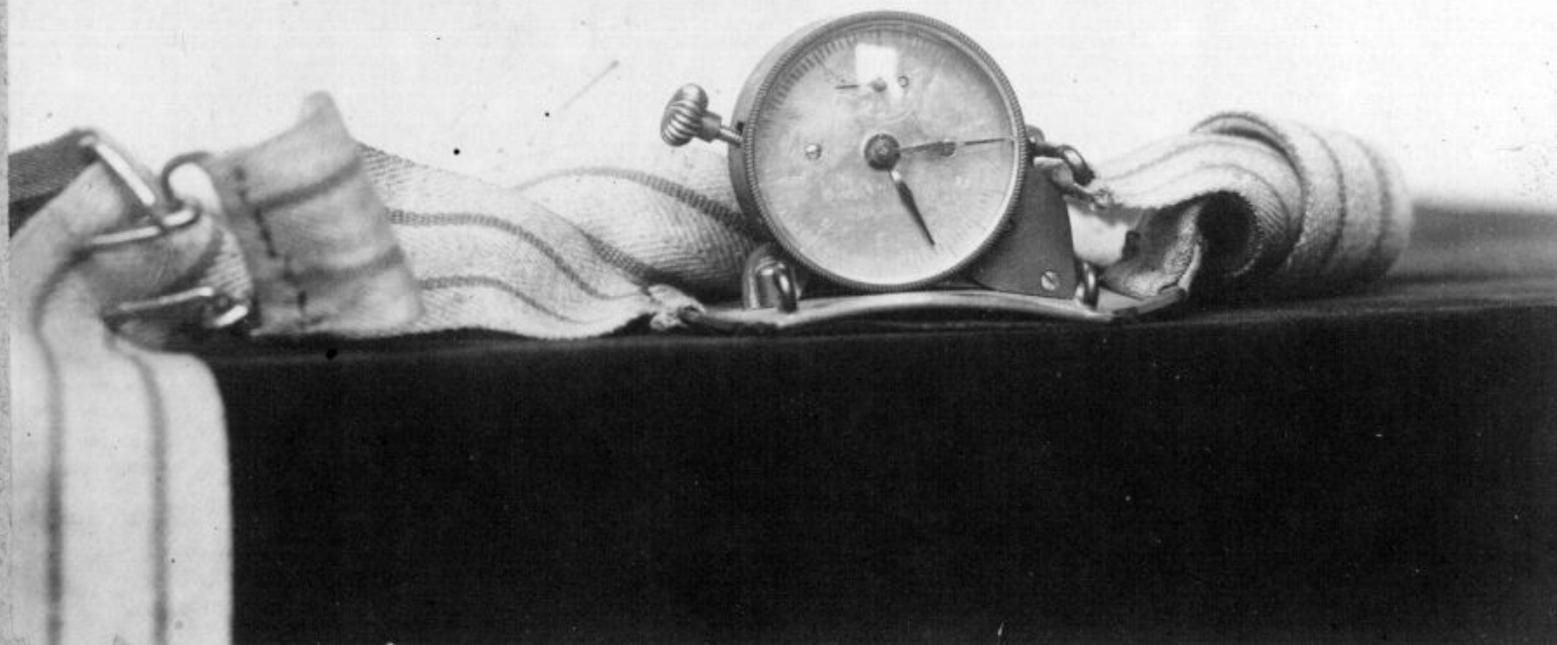
Inscription simultanée du débit d'air et des mouvements
 du thorax et de l'abdomen chez des chanteurs de profession
 pendant l'émission de sons musicaux

*Compas Thoracique
Inscripteur*



N° 69

Disposé pour mesurer les diamètres thoraciques et les variations de ces diamètres dans les diverses attitudes des bras ainsi que pendant les mouvements respiratoires.



N°68

Compteur des mouvements respiratoires se fixant autour du thorax de l'homme et actionné par la dilatation qui a lieu pendant l'inspiration

Étude cinématique de la locomotion du cheval

Par M. MAREY

Analyse cinématique

des

Allures du Cheval

par les procédés de la Chronophotographie.

Le cheval, en marchant, se déplace par le point de contact de son pied avec le sol, mesure l'amplitude de son pas en se balançant sur ce point que, dans aucune allure, la courbe de son pas ne quitte jamais le sol.

Les Figs. 1 à 3 représentent par des lignes continues les trajectoires du sabot et par des points les positions successives du sabot.

Mouvement du sabot. — On suppose le sabot en contact avec le sol par son point avant, et on le fait passer par deux positions successives dans le pas (Fig. 1 et 2). Le sabot antérieur, après avoir parcouru d'assez court rayon, s'abaisse lentement en décrivant une courbe jusqu'au moment de poser. Le sabot postérieur, au contraire, d'un rayon plus long, pose et part en un instant, décrivant une inflexion qui décrira avec une certaine rapidité.

[1] Voir, pour le dessin des appareils, le Traité de Chronophotographie, 2^e édition, Paris, 1884.

Analyse cinématique de la locomotion du cheval;

PAR M. PAGÈS.

« L'appareil chronophotographique de M. Marey est jusqu'ici le seul qui donne des renseignements complets sur la locomotion des quadrupèdes, en faisant connaître exactement les différentes positions d'un point quelconque du corps dans le temps et dans l'espace. C'est avec les conseils de M. Marey et sous sa direction que j'ai entrepris, à la Station physiologique du Collège de France, une série de recherches sur la locomotion du cheval, étudiée par la chronophotographie (1).

» *Trajectoire et vitesse du pied et du boulet dans les trois allures principales du cheval : le pas, le trot et le galop.* — Tous les observateurs qui se sont occupés du jeu des membres dans la progression du cheval ont considéré la courbe décrite par le sabot, dans la période de soutien, comme un arc de cercle, de rayon plus ou moins grand, dont la corde, représentée par le sol, mesure l'amplitude de l'oscillation du membre. On va voir que, dans aucune allure, la courbe décrite par le pied n'offre cette forme régulière.

» Les fig. 1 à 4 représentent par des lignes ponctuées les trajectoires du sabot et par de petites croix celles du boulet.

» *Mouvement du sabot.* — On constate d'abord que le pied antérieur et le pied postérieur n'ont pas tous deux exactement la même trajectoire dans le pas (fig. 1 et 2). Le sabot antérieur, après avoir décrit une courbe d'assez court rayon, s'abaisse lentement en suivant une ligne presque droite jusqu'au moment du poser. Le sabot postérieur s'élève par une courbe d'un rayon plus long, puis se porte en avant suivant une ligne doublement infléchie qui descend assez vite au sommet du poser. Dans le trot le sabot

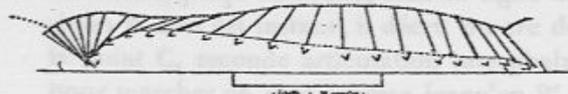
(1) Voir, pour la description des appareils et des expériences, MAREY, *Méthode graphique*, 2^e édition; Paris, 1884.

(2)

antérieur suit une courbe analogue à celle du pas, tandis que dans le *galop* la trajectoire se rapproche davantage d'un arc de cercle. L'échelle métrique, tracée sur la piste parcourue, permet d'évaluer la longueur absolue du pas aux différentes allures et la hauteur à laquelle le pied s'élève au-dessus du sol.

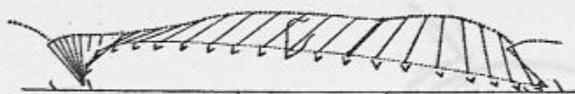
Trajectoires du boulet et du sabot aux différentes allures du cheval.

Fig. 1.



Membre postérieur droit, dans le pas.

Fig. 2.



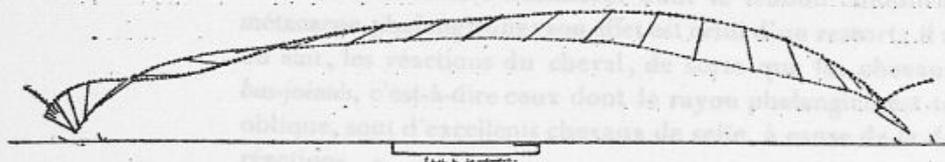
Membre antérieur droit, dans le pas.

Fig. 3.



Membre antérieur droit, dans le trot.

Fig. 4.



Membre antérieur droit, dans le petit galop.

» Enfin, sachant que l'intervalle qui sépare deux images consécutives est rigoureusement de $\frac{1}{50}$ de seconde, on en déduit à chaque instant la vitesse du sabot. Cette vitesse est en moyenne, dans le pas, de 4^m ; dans le trot de 6^m , et dans le petit galop de 8^m par seconde.

» L'inégalité des espaces qui séparent des images obtenues à des intervalles de temps égaux montre que le sabot est animé d'un mouvement accéléré au début de son oscillation et ralenti à la fin; mais ces accélérations

et ralentissements, beaucoup moins prononcés que dans une oscillation pendulaire, prouvent que, chez le cheval comme chez l'homme, l'action des muscles intervient au début comme à la fin du mouvement du pied.

» C'est dans la seconde moitié de son parcours que le sabot atteint son maximum de vitesse. Dans le galop représenté *fig. 4*, ce maximum ne dépasse pas 10^m par seconde, car l'allure à laquelle il correspond n'est pas rapide : c'est le galop de manège. Dans le grand galop de course, en admettant les mêmes phases du mouvement, la vitesse du sabot pourrait atteindre 50^m par seconde.

» Pendant sa translation, le sabot exécute un mouvement de rotation autour d'un axe transversal, de telle sorte que sa face inférieure se porte en arrière et même un peu en haut pendant le levé du pied, puis retourne graduellement à sa direction primitive pour retomber à plat sur le sol au moment du poser. Afin de rendre sensibles les phases de ce mouvement rotatif, on a muni le sabot d'un signe d'une forme particulière, sorte de \triangleright couché dont l'une des branches est horizontale quand le pied pose à plat sur le sol, tandis que l'autre branche offre l'inclinaison de la face antérieure du sabot. D'après les changements d'orientation de ce signe dans les images successives (*fig. 1 et 2*), on apprécie aisément les mouvements de rotation du sabot, dont l'étendue n'excède guère, sur nos figures, 180°.

» *Mouvements du boulet.* — La trajectoire du boulet diffère notablement de celle du sabot : d'une part, pendant le poser, tandis que le sabot est immobile, le boulet décrit un arc de cercle dont le centre est à la *deuxième articulation interphalangienne*, de sorte que le rayon phalangien prend des positions successives formant entre elles une série d'angles à ouvertures de plus en plus grandes et dont le sommet commun est à l'articulation, qui joue le rôle de centre du mouvement.

» Une autre différence entre les deux trajectoires tient au mouvement de bascule du sabot dont nous avons parlé ci-dessus : le boulet s'abaisse en même temps que le sabot se relève; il en résulte que les deux trajectoires se rapprochent l'une de l'autre au commencement du lever (*fig. 1 et 2*); elles peuvent devenir tangentes dans le pas rapide; elles se coupent en deux points dans les allures plus rapides encore : le trot et le galop (*fig. 3 et 4*).

» En somme, c'est l'orientation du rayon phalangien qui règle la distance que présentent entre elles les deux trajectoires : celles-ci n'arrivent à être tangentes que si le paturon atteint la position horizontale;

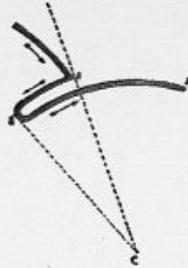
(4)

elles se couperont si l'extrémité inférieure de ce rayon osseux s'élève plus haut que l'extrémité supérieure.

» Enfin le point le plus curieux de la trajectoire du boulet, c'est la double inflexion qu'elle suit au moment du poser du pied. La figure schématique 5 donne une idée de cette trajectoire, qui offre deux directions successives inverses l'une de l'autre.

» Au moment où le membre antérieur ABC atteint le sol, tous les rayons inférieurs, jusqu'au coude, sont en ligne droite et le boulet occupe la position B. Dès cet instant, il décrit un arc de cercle BB', ayant pour centre le point C, seconde articulation interphalangiennne, puis s'arrête en B'', pour marcher en sens inverse jusqu'en B'''. (C'est pour montrer ces deux

Fig. 5.



directions différentes que nous avons tracé deux arcs de cercle concentriques ne se confondant pas entre eux; des flèches indiquent le sens du mouvement sur la trajectoire.) Ce mouvement alternatif du boulet est dû à l'élasticité du muscle fléchisseur dont le tendon contourne l'articulation métacarpo-phalangiennne; son effet est celui d'un ressort; il adoucit, comme on sait, les réactions du cheval, de sorte que les chevaux *long-jointés* et *bas-jointés*, c'est-à-dire ceux dont le rayon phalangien est très long et très oblique, sont d'excellents chevaux de selle, à cause de la douceur de leurs réactions. »

(12 octobre 1885.)

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*. t. CIII;
séance du 27 septembre 1886.

Analyse cinématique des allures du cheval (1);

PAR MM. MAREY ET PAGÈS.

« *Mouvements du membre antérieur.* — La chrono-photographie permet de rectifier les idées qui régnaient jusqu'ici relativement au jeu des différentes articulations des membres, aussi bien chez les animaux que chez l'homme. S'appuyant sur des considérations géométriques incomplètes, et faisant l'hypothèse la plus simple, la plupart des observateurs ont assimilé chacun des membres à un rayon tournant alternativement autour de l'une de ses extrémités, de l'inférieure pendant le poser, de la supérieure pendant le lever. Dans cette hypothèse, lorsque le pied est à l'appui, le rayon formé par le membre pivoterait autour de son extrémité inférieure en décrivant à sa partie supérieure un arc de cercle; et, inversement, pendant le lever, le centre du mouvement étant à la pointe de l'épaule, le pied décrirait un arc de cercle à convexité inférieure. Tout en admettant l'oscillation pendulaire des membres, M. Colin, d'Alfort, fait intervenir les puissances musculaires aux diverses phases du lever; en sorte que son opinion est inter-

(1) Voir PAGÈS, *Comptes rendus*, séance du 12 octobre 1885.

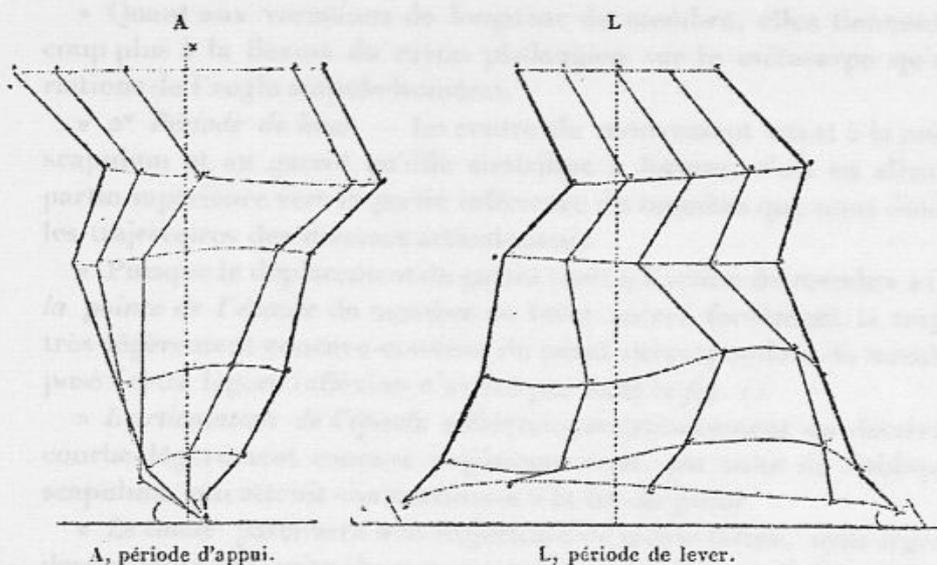
(2)

médiaire entre les conceptions des observateurs qui l'ont précédé et celles qui sont basées sur les résultats fournis par l'expérimentation graphique.

» En raison de l'extrême complexité des figures chrono-photographiques de la locomotion du cheval, il nous a semblé avantageux de ne représenter que certaines images, celles qui correspondent à des changements importants dans l'attitude du membre antérieur. Ce choix nous a conduit à diviser les périodes d'appui et de lever du pied, chacune en quatre temps de durées souvent fort inégales, mais nettement caractérisés par la flexion ou l'extension de certains rayons osseux, ou par des changements de courbure dans la trajectoire de certaines articulations. Nous aurons soin d'indiquer, à côté des figures représentant ces phases successives des allures, la durée qui correspond à chacune d'elles. Enfin, pour ce qui concerne l'évaluation des vitesses, il faudra nécessairement recourir ici à la chrono-photographie avec la série complète des images recueillies à des intervalles de temps égaux.

» ALLURE DU PAS. — La *fig. 1* représente théoriquement les phases successives de l'oscillation du membre antérieur. La période d'appui se divise

Fig. 1. — Oscillations du membre antérieur dans le pas.



naturellement en *quatre* périodes caractérisées surtout : la première, par la rétrogradation du boulet, la deuxième par le pivotement du métacarpe et de l'avant-bras autour de l'articulation métacarpo-phalangienne immobile,

la troisième par la rotation du rayon phalangien autour de la deuxième articulation médio-tarsienne, la quatrième par la rotation du sabot autour de son extrémité antérieure, qu'on désigne sous le nom de *pince*.

» Comme le centre du mouvement est dans la deuxième articulation des phalanges, il est nécessaire, dans l'analyse des trajectoires propres à chaque articulation, d'aller de ce point vers la partie supérieure du membre.

» 1° *Période d'appui*. — Immobile pendant les trois premiers temps de cette période qui comprennent les $\frac{2}{10}$ de l'appui, *le sabot* tourne ensuite autour de la pince en décrivant par sa partie postérieure ou talon un arc de cercle.

» *Le boulet*, rétrograde pendant le premier temps ($\frac{1}{10}$ de l'appui), reste immobile durant le deuxième temps ($\frac{2}{10}$ de l'appui) et décrit un arc de cercle autour du sabot dans le troisième temps ($\frac{5}{10}$ de l'appui). A partir de ce moment, le boulet tendrait à descendre par l'obliquité croissante du rayon phalangien et par sa flexion sur le métacarpe vers la fin de l'appui; mais il est sollicité à monter par le mouvement du sabot précédemment décrit et parcourt, en somme, un arc de cercle à convexité supérieure.

» La rétrogradation et l'abaissement de l'articulation métacarpo-phalangienne se traduisent dans *le carpe* par un arc concave en avant et en haut, c'est-à-dire en sens inverse de la courbe décrite par le boulet durant le premier temps. Plus tard, la rotation de l'avant-bras et du métacarpe autour du boulet immobile fait parcourir au carpe un arc de cercle dont le centre est à l'articulation métacarpo-phalangienne.

» Sollicité ensuite, d'une part à monter par l'élévation du boulet et de la première articulation phalangienne et, d'autre part, à descendre par l'obliquité croissante du métacarpe et par sa flexion sur l'avant-bras vers la fin du troisième temps, le carpe décrit une courbe convexe supérieurement pendant les deux dernières phases de l'appui.

» *Le coude* décrit d'abord, comme le carpe, une courbe concave en avant et en haut, qui résulte du mouvement inverse du boulet et de la progression plus ou moins rapide de l'animal; puis il parcourt un arc de cercle dont le centre est à l'articulation métacarpo-phalangienne immobile. Pendant les deux derniers temps de l'appui, sa trajectoire, convexe en haut, dépend du mouvement du carpe précédemment analysé, de l'obliquité croissante de l'avant-bras et finalement de sa flexion sur le bras, qui commence vers la fin du troisième temps.

» La trajectoire de *l'articulation de l'épaule* est une courbe légèrement concave supérieurement; elle est engendrée par le mouvement des parties inférieures précédemment étudiées et par la flexion du coude qui aug-

(4)

mente jusqu'au milieu du poser, pour faire place à un redressement pendant la deuxième moitié de cette phase du pas.

» Quant à la trajectoire de *la pointe de l'omoplate*, on pourrait sur la *fig. 1* la considérer comme une ligne droite; mais dans les cas ordinaires on s'aperçoit que le redressement progressif du scapulum durant la première moitié du poser ne corrige pas complètement l'abaissement simultané de l'articulation de l'épaule, et que l'obliquité croissante du même rayon dans la deuxième moitié de l'appui ne compense qu'imparfaitement l'élévation de cette même articulation; en sorte que la trajectoire de la pointe de l'omoplate est une courbe concavo-convexe se rapprochant très sensiblement de la ligne droite.

» En résumé, la trajectoire en arc de cercle que décrirait la partie supérieure de l'épaule, dans l'hypothèse d'un membre rigide oscillant autour du pied à l'appui, se transforme en une ligne presque droite. Au début et à la fin du poser, le membre antérieur présente une longueur maximum, mais il offre en même temps un maximum d'obliquité; cette circonstance atténue beaucoup la convexité de l'arc de cercle qui, si le membre avait une longueur invariable, devrait avoir pour centre la deuxième articulation médio-phalangienne.

» Quant aux variations de longueur du membre, elles tiennent beaucoup plus à la flexion du rayon phalangien sur le métacarpe qu'aux variations de l'angle scapulo-huméral.

» 2^o *Période de lever*. — Le centre du mouvement étant à la pointe du scapulum et au garrot qu'elle contribue à former, c'est en allant de la partie supérieure vers la partie inférieure du membre que nous étudierons les trajectoires des diverses articulations.

» Puisque le déplacement du garrot tient à l'action du membre à l'appui, *la pointe de l'épaule* du membre au lever suivra forcément la trajectoire très légèrement concavo-convexe du point correspondant du membre opposé (cette légère inflexion n'existe pas dans la *fig. 1*).

» *L'articulation de l'épaule* s'élèvera progressivement en décrivant une courbe légèrement concave supérieurement, par suite de l'obliquité du scapulum, qui atteint son maximum à la fin du poser.

» *Le coude* parcourra une trajectoire de même forme, mais légèrement descendante par suite du mouvement du scapulum et de l'ouverture progressive de l'angle scapulo-huméral.

» Les inflexions des trajectoires sont beaucoup plus accentuées dans les rayons inférieurs du membre.

» Il est possible, cependant, de distinguer ici, comme dans le poser,

quatre temps principaux à peu près d'égale durée; le premier commence aussitôt que le pied a quitté le sol et finit avec la flexion maximum du boulet correspondant au raccourcissement maximum du membre; le deuxième s'étend jusqu'à la flexion maxima du carpe; la fin du troisième temps correspond au même moment pour le coude.

» *Le carpe* décrit une double courbure, concave en haut dans les trois premiers temps, à cause de la flexion du coude, et convexe dans le quatrième temps, par suite de l'extension de cette articulation.

» *Le boulet* suit une ligne légèrement concave dans la première moitié de son parcours, par suite du mouvement du carpe et de la flexion progressive du métacarpe sur l'avant-bras; puis il se déplace en ligne droite, par l'action combinée du carpe qui s'élève et du métacarpe qui s'étend graduellement sur l'avant-bras. Enfin, pendant le quatrième temps, il s'abaisse assez brusquement par l'extension du membre tout entier.

» Durant le premier temps, *le sabot* décrit une courbe à concavité inférieure se rapprochant de plus en plus de celle du boulet, dont la disposition est inverse; les deux courbes se touchent presque dans un pas rapide. Ce mouvement du sabot est le résultat de la flexion rapide et intense du rayon phalangien qui se rapproche progressivement de la direction horizontale; à cet instant, la paroi inférieure du sabot a acquis sa plus grande obliquité et fait un angle de 45° environ avec le sol.

» La trajectoire du sabot, pendant les trois autres temps du lever, est une ligne presque droite, si ce n'est à son extrémité, où elle devient un peu convexe supérieurement. Ce déplacement du sabot, coïncidant avec le retour de sa paroi inférieure à la position horizontale, dépend de ce que l'élévation du boulet est corrigée par l'extension croissante du rayon phalangien.

» En résumé, l'arc de cercle ayant son centre au garrot, que devrait décrire le pied dans l'hypothèse d'une oscillation pendulaire, est transformé en une courbe se rapprochant sensiblement de la ligne droite dans la plus grande partie de son étendue. Au début du lever, le membre antérieur tend vers la verticalité, mais se raccourcit par la flexion du rayon phalangien sur le métacarpe et, à un moindre degré, par la flexion du métacarpe sur l'avant-bras; ce raccourcissement est maximum quand le membre est vertical. Dans tout le reste du soutien, le membre augmente d'obliquité et de longueur, principalement par l'extension des rayons inférieurs.

» De ce qui précède, il résulte que les rayons inférieurs, phalanges, métacarpe et avant-bras, sont les agents essentiels des changements de lon-

M. et P.

1.

gueur du membre et de la courbe décrite par le pied : le rayon phalangienn augmentant surtout au début, le métacarpe au milieu et l'avant-bras à la fin de cette période du pas.

» Nous n'avons examiné jusqu'ici que les trajectoires des différentes parties du membre antérieur; nous allons indiquer sommairement les *variations de leur vitesse*.

» A. *Phases de la vitesse pendant le poser*. — Immobile pendant les $\frac{2}{10}$ de l'appui environ, le pied pivote ensuite sur la pince et acquiert rapidement une certaine vitesse. Le boulet se meut dans le premier dixième de l'appui, en sens inverse de la progression de l'animal; il est ensuite immobile pendant les $\frac{3}{10}$ de l'appui; il s'élève enfin avec une vitesse graduellement croissante pendant tout le reste de cette période du pas.

» La rétrogradation du boulet se traduit dans le genou par une diminution de vitesse; son influence est moins sensible dans le coude; elle est à peu près nulle dans le garrot.

» L'arrêt de l'articulation métacarpo-phalangienn ne peut avoir qu'une faible influence sur le genou et le coude, grâce à la rotation simultanée du canon et de l'avant-bras qui fait que l'espace parcouru par ces deux articulations est proportionnel à leur distance du boulet immobile. Par conséquent, ni l'arrêt prolongé du pied, ni celui de l'articulation métacarpo-phalangienn, ni son mouvement de rétrogradation ne sauraient entraîner dans l'épaule, et à plus forte raison dans le garrot, des variations importantes de vitesse.

» C'est ainsi que, pendant le poser, le mouvement intermittent du sabot et du boulet, le mouvement irrégulièrement varié de ces deux points du membre et celui du genou, *se transforment, dans la partie supérieure du membre, en un mouvement continu et sensiblement uniforme*.

» B. *Phases de la vitesse pendant le lever*. — Les variations de vitesse des articulations supérieures ne sont pas plus intenses pour le membre au soutien que pour le membre à l'appui dont elles dépendent. Quant aux articulations inférieures, les changements de vitesse sont moins intenses qu'on ne serait tenté de le supposer; ils n'augmentent pas proportionnellement à leur distance au centre de mouvement.

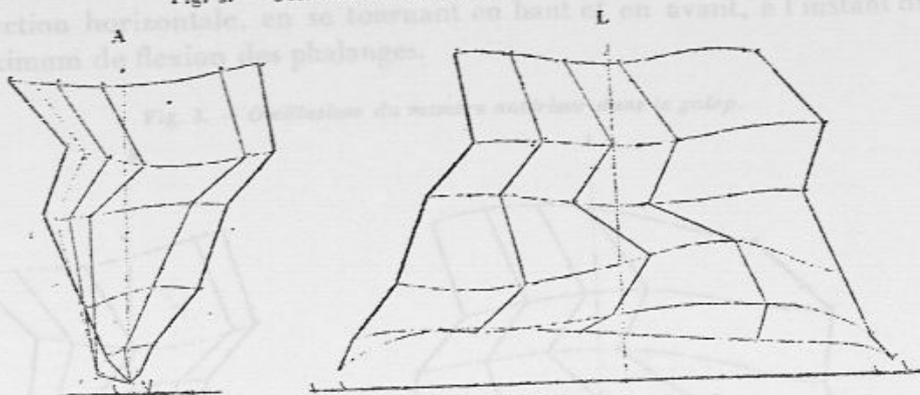
» *Le carpe* acquiert son maximum de rapidité dans le deuxième temps et son minimum pendant le quatrième temps où le ralentissement est très manifeste.

» *Le boulet* se meut avec une vitesse à peu près uniforme jusqu'au moment qui précède immédiatement le nouvel appui; dans *le pied*, la vitesse

présente également de faibles variations : son maximum, correspondant au troisième temps, est suivi, à la fin du quatrième, d'un ralentissement notable qui précède l'appui.

» ALLURE DU TROT (*fig. 2*). — Il suffira de comparer la *fig. 2* à la *fig. 1* pour s'assurer que l'oscillation du membre se fait dans le trot comme dans

Fig. 2. — Oscillations du membre antérieur dans le trot.



Durée relative des quatre temps

du poser.		du lever.	
1 ^{er} temps.....	$\frac{1}{6}$	1 ^{er} temps.....	$\frac{3}{17}$
2 ^e ".....	$\frac{1}{6}$	2 ^e ".....	$\frac{3}{17}$
3 ^e ".....	$\frac{3}{8}$	3 ^e ".....	$\frac{3}{17}$
4 ^e ".....	$\frac{1}{6}$	4 ^e ".....	$\frac{8}{17}$

le pas, avec cette différence, que les inflexions des diverses trajectoires et les variations de vitesse des différents points du membre y sont plus accentuées.

» Tout d'abord la rétrogradation intense et brusque du *boulet*, consécutive à la chute du corps, se traduit, dans *le carpe*, par une inflexion brusque de la trajectoire (une rétrogradation même dans le trot lent).

» Dans *le coude*, l'abaissement du boulet se fait peu sentir, et, si le *garrot* descend au milieu du poser, cela est dû bien moins au mouvement du boulet qu'à la flexion notable de *l'articulation de l'épaule*, flexion destinée à amortir la chute de l'animal et d'autant plus intense que l'allure est plus rapide.

» Ainsi, au poser, dans le trot, la pointe de l'épaule décrit un arc à concavité supérieure.

» Pendant le lever, l'extrémité supérieure du membre présentera, au milieu de sa trajectoire, une inflexion correspondant au milieu de l'appui

du pied opposé, tandis qu'au début et à la fin de cette période, la courbe est convexe par en haut; en sorte que, dans un pas complet, la trajectoire du garrot aura deux maxima et deux minima, ce qui permettra de la distinguer de la trajectoire du même point dans le pas et dans le galop. Les maxima de la courbe du garrot correspondent aux instants de *suspension*, c'est-à-dire au moment où aucun des pieds de l'animal ne pose sur le sol.

» Les mouvements de l'avant-bras, du métacarpe et du rayon phalangien sont beaucoup plus grands que dans le pas; l'avant-bras se rapproche de la direction horizontale lors du maximum de flexion du coude et peut l'atteindre dans le trot très rapide. Le rayon phalangien dépasse l'horizontalité et devient même fortement oblique en avant lorsque le boulet est au maximum de flexion, en sorte que, même dans un trot lent, la trajectoire du pied coupe celle du boulet en deux points.

» Quant au pied, il décrit un arc de cercle très surbaissé dont le point le plus élevé est d'autant plus éloigné que l'allure est plus rapide.

» Dans un pas de trot qui dure une demi-seconde, l'appui est de $\frac{1}{3}$ environ plus court que le lever; cet excès de la période de lever tient à ce qu'elle renferme, à ses instants extrêmes, les courtes phases de suspension. L'arrêt du boulet et sa rétrogradation, la descente brusque, le recul même du carpe, n'exercent qu'une faible action sur la vitesse des articulations supérieures et surtout du garrot que l'on peut considérer comme se mouvant uniformément.

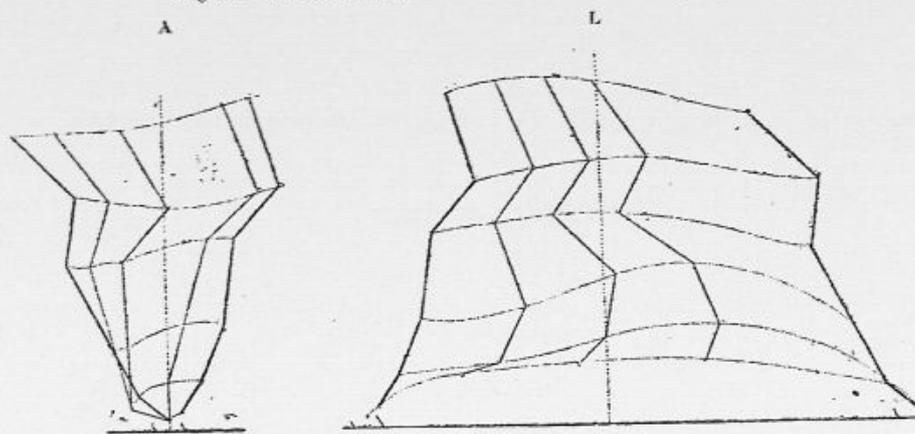
» ALLURE DU GALOP. — Dans le galop (*fig. 3*), la chute du corps, moins brusque, mais plus intense que dans le trot, détermine une rétrogradation et un abaissement notable du boulet, surtout dans celle des articulations métacarpo-phalangiennes qui correspond au membre sur lequel le cheval galope. Il en résulte une inflexion plus grande des trajectoires du genou et du coude.

» L'articulation de l'épaule se fléchit fortement au milieu de l'appui pour amortir le choc, et le garrot décrit une courbe à concavité supérieure, dont le minimum correspond au poser du membre sur lequel le cheval galope. D'où il résulte que la trajectoire de la pointe de l'épaule ne présente, dans un pas complet du galop, qu'un maximum et un minimum, ce qui permet de la distinguer des trajectoires propres aux autres allures.

» Pendant le lever, les rayons inférieurs du membre oscillent comme dans le trot, mais la flexion de ces rayons et le raccourcissement du membre qui en résulte sont plus accentués: aussi la trajectoire du carpe s'approche-t-elle de celle du coude et la rencontre même dans le galop rapide. La tra-

jectoire du pied croise celle du boulet en deux points assez éloignés, et même celle du genou quand l'allure devient très rapide. C'est dans le galop que la courbe décrite par le pied se rapproche le plus d'un arc de cercle. C'est aussi dans cette allure que la paroi inférieure du sabot présente les mouvements les plus étendus; elle atteint et dépasse même la direction horizontale, en se tournant en haut et en avant, à l'instant du maximum de flexion des phalanges.

Fig. 3. — Oscillations du membre antérieur dans le galop.



Durée relative des quatre temps

du poser.		du lever.	
1 ^{er} temps.....	$\frac{1}{6}$	1 ^{er} temps.....	$\frac{3}{17}$
2 ^e "	$\frac{1}{6}$	2 ^e "	$\frac{3}{17}$
3 ^e "	$\frac{3}{6}$	3 ^e "	$\frac{3}{17}$
4 ^e "	$\frac{1}{6}$	4 ^e "	$\frac{8}{17}$

» Quant aux variations de vitesse, elles sont plus grandes que dans le trot. Dans un pas de galop qui dure une demi-seconde, le lever est environ trois fois plus long que l'appui, et l'abaissement du boulet se traduit dans le garrot par un léger ralentissement.

» Au moment du poser, le sabot effectue un mouvement inverse et, dirigeant en bas sa face plantaire, dépasse aussi l'horizontalité, de telle sorte qu'il touche le sol, d'abord par le talon, puis par la pince. (Ce mouvement s'observe également dans le trot rapide.)

» Nous ferons remarquer, en terminant, que la tendance à l'économie

du travail que l'on constate, à des degrés divers, dans toutes les machines animales, paraît atteindre, chez le cheval, sa plus grande perfection.

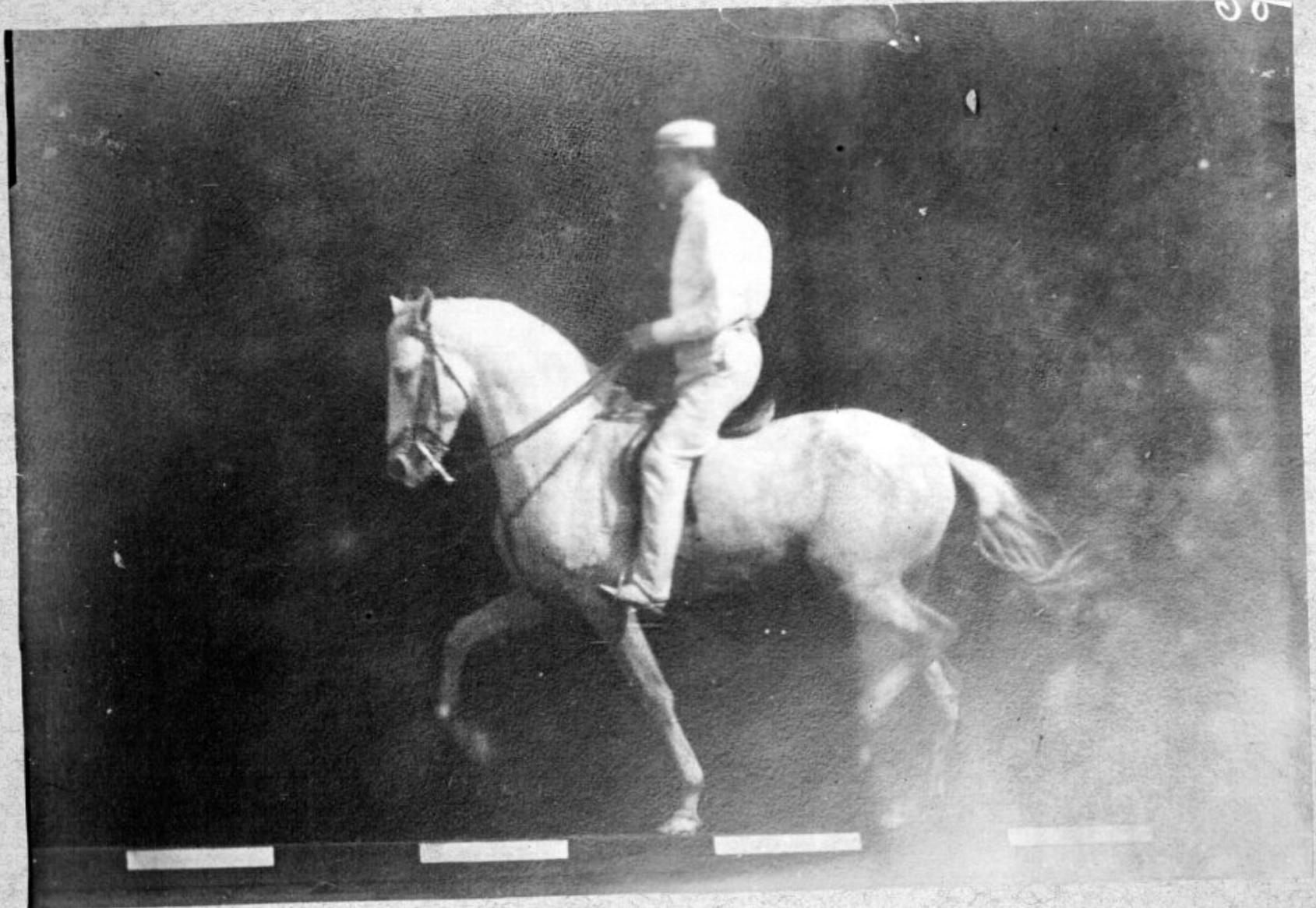
» Pour le pas, nous avons vu que, au poser, la transformation du mouvement circulaire de l'épaule en un mouvement presque rectiligne et horizontal réduisait beaucoup, annulait même, pourrait-on dire, les oscillations du train antérieur et, avec elles, le travail nécessaire à leur production; qu'au lever, la transformation de la trajectoire circulaire du pied en une courbe se rapprochant de la ligne droite diminuait le travail dépensé pendant l'oscillation du membre.

» Nous avons vu aussi que les variations de vitesse étaient presque nulles pour la partie supérieure du membre pendant le poser, et peu sensibles pour l'extrémité opposée lorsque le membre est au lever.

» Ainsi, non seulement la partie antérieure du corps se meut sensiblement en ligne droite, horizontalement et d'un mouvement uniforme, mais aussi les différents rayons du membre oscillant se déplacent avec le moins de travail possible.

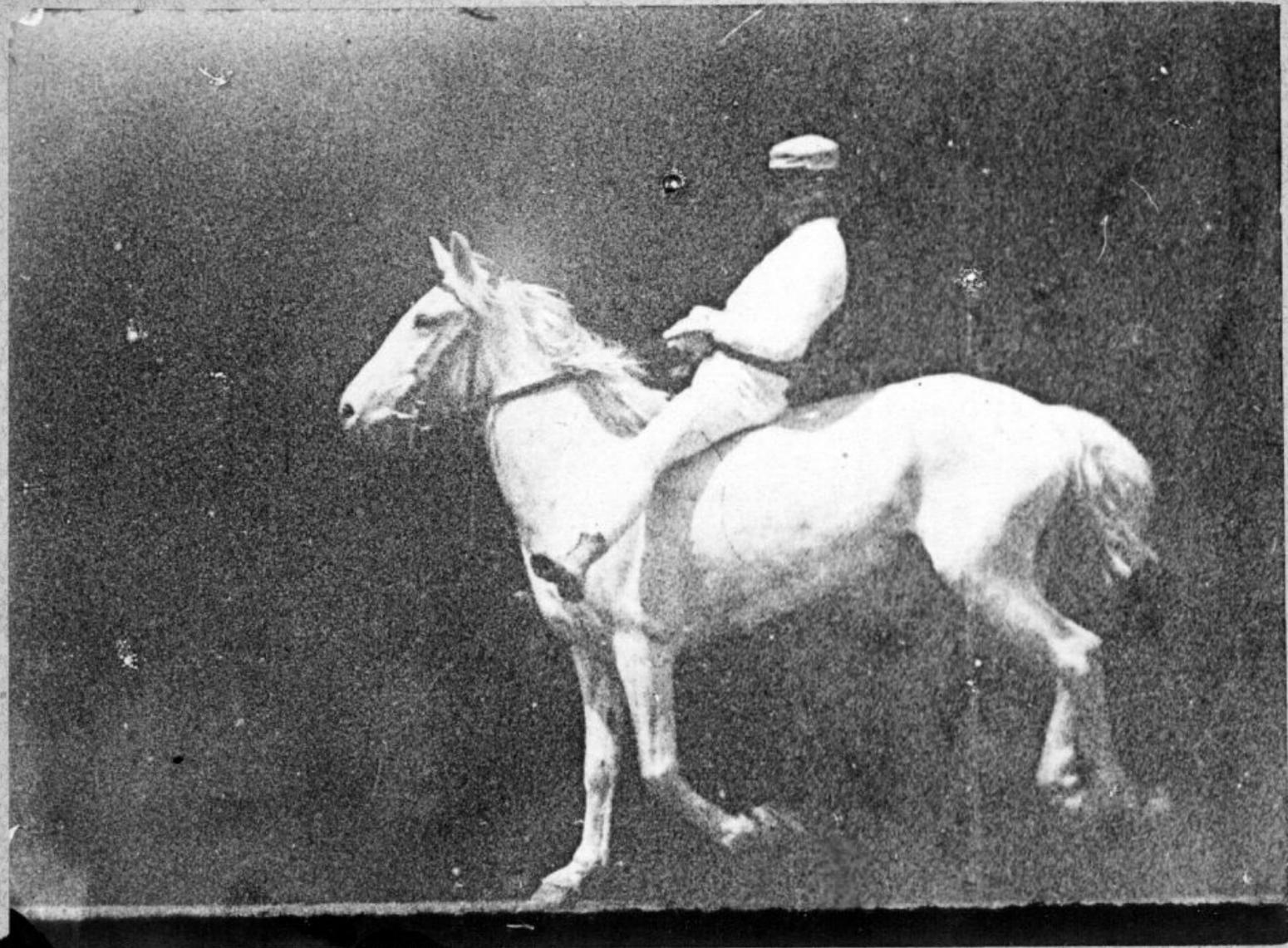
» Dans le trot et dans le galop, l'économie du travail est moins grande, mais elle est encore très manifeste (*).

(*) Voir la Note de MM. Marey et Demeny sur la *Mesure du travail mécanique effectué dans la locomotion de l'homme* (séance du 9 novembre 1885).



N° 86

Image instantanée d'un cheval au trot
(période d'appui)



N° 120

Cheval au galop (3^e temps)

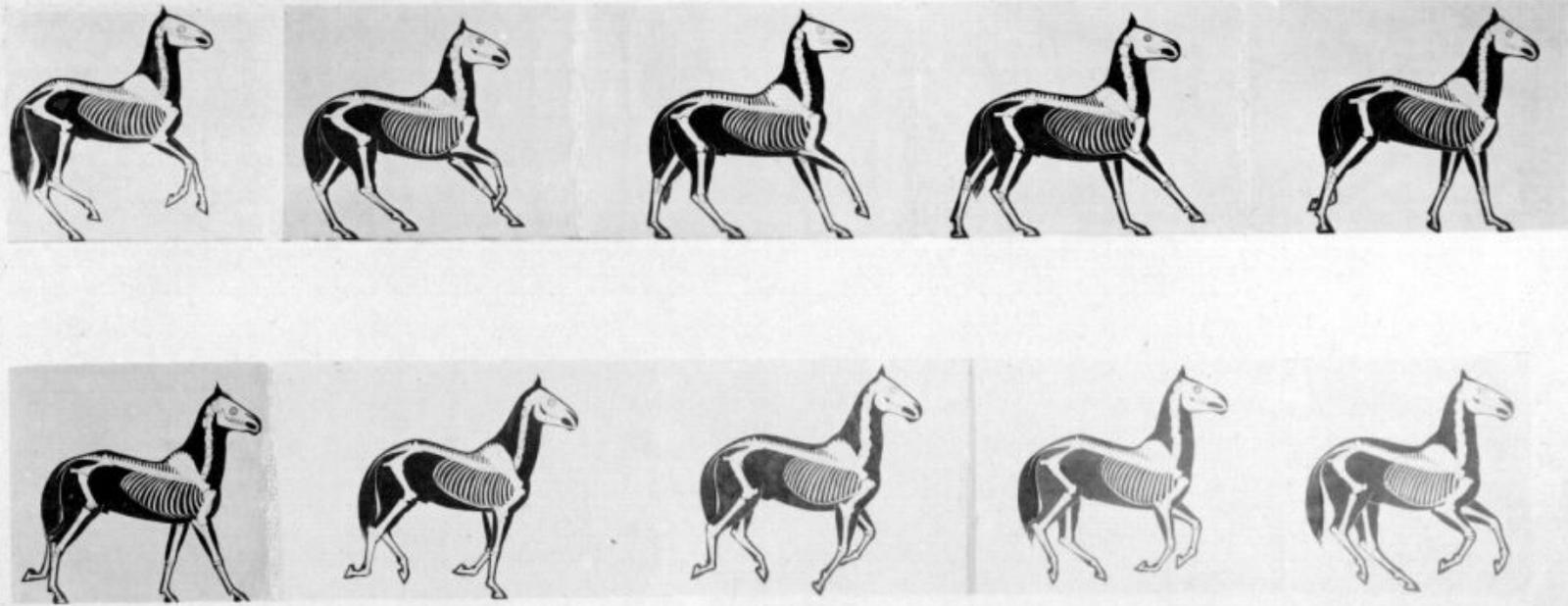
Appui unipédal droit antérieur



N° 119

Cheval au galop (2^e temps)

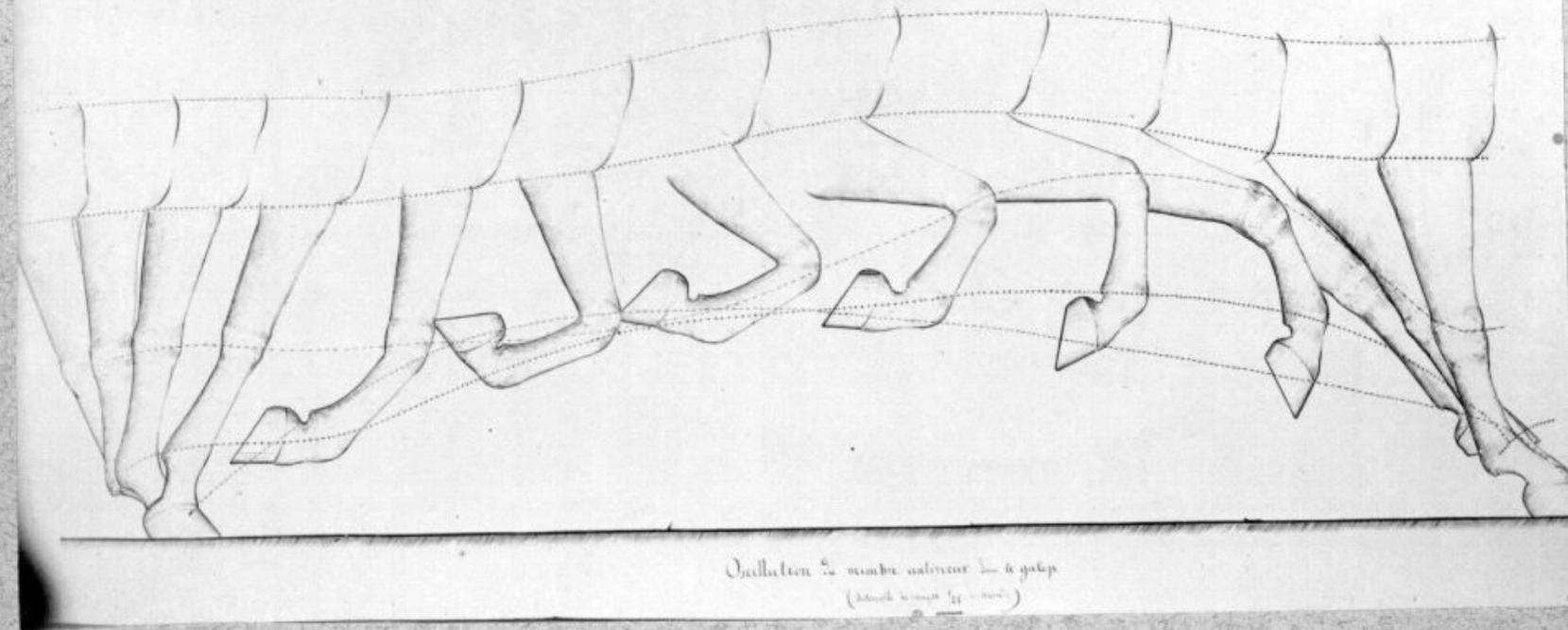
Appui bipédal diagonal droit



N° 76

Dessins représentant 10 attitudes successives

du cheval au petit galop.

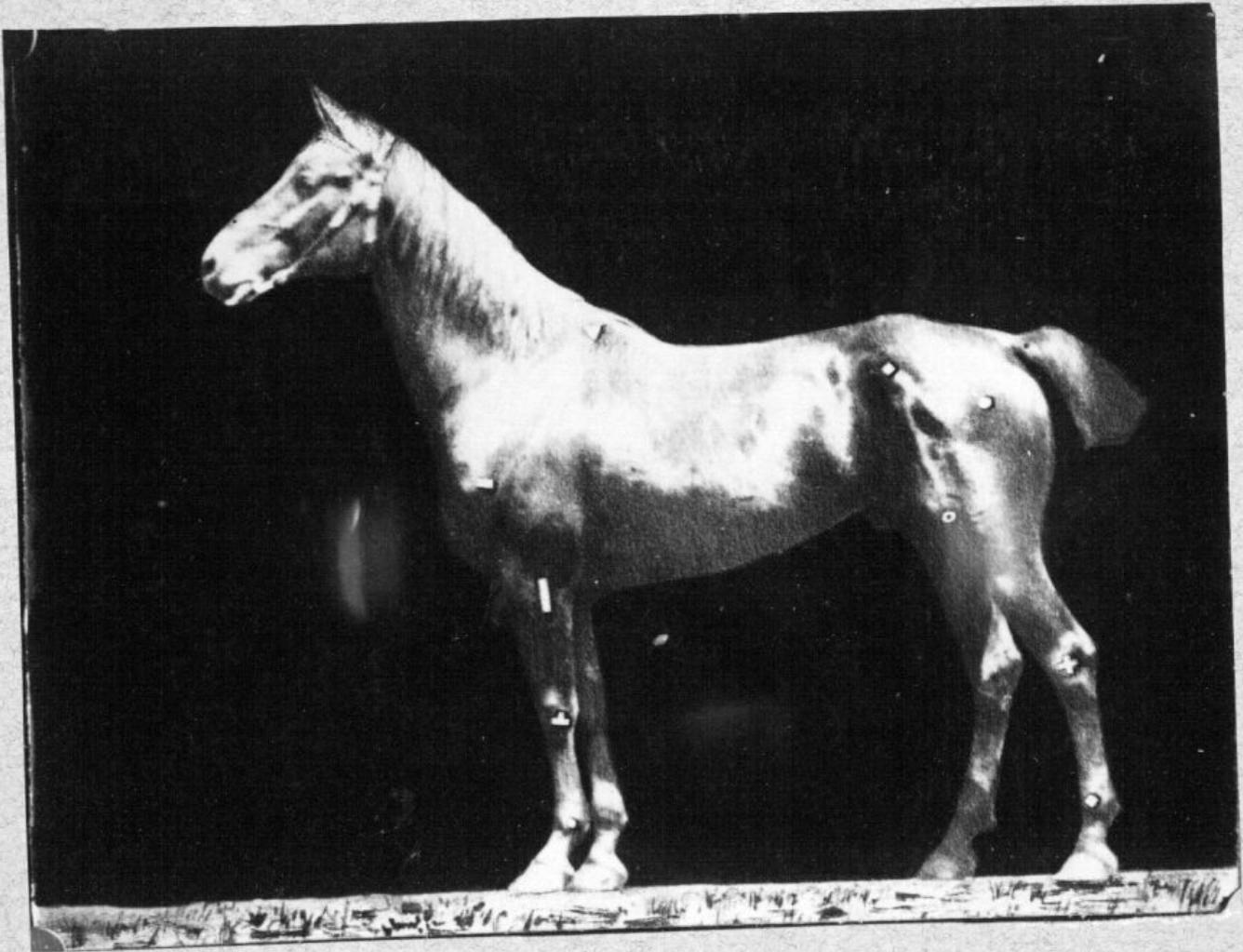


No 110

Oscillation du membre antérieur dans le galop
(détail de la page 110)

Oscillation du membre antérieur dans le galop

Intervalle des images $\frac{1}{25}$ de seconde



N° 111

Cheval noir portant des signes blancs de
formes différentes pour les expériences de chronophotographie.

Ces signes sont destinés à donner les déplacements des principaux centres
articulaires dans des intervalles de temps très rapprochés.

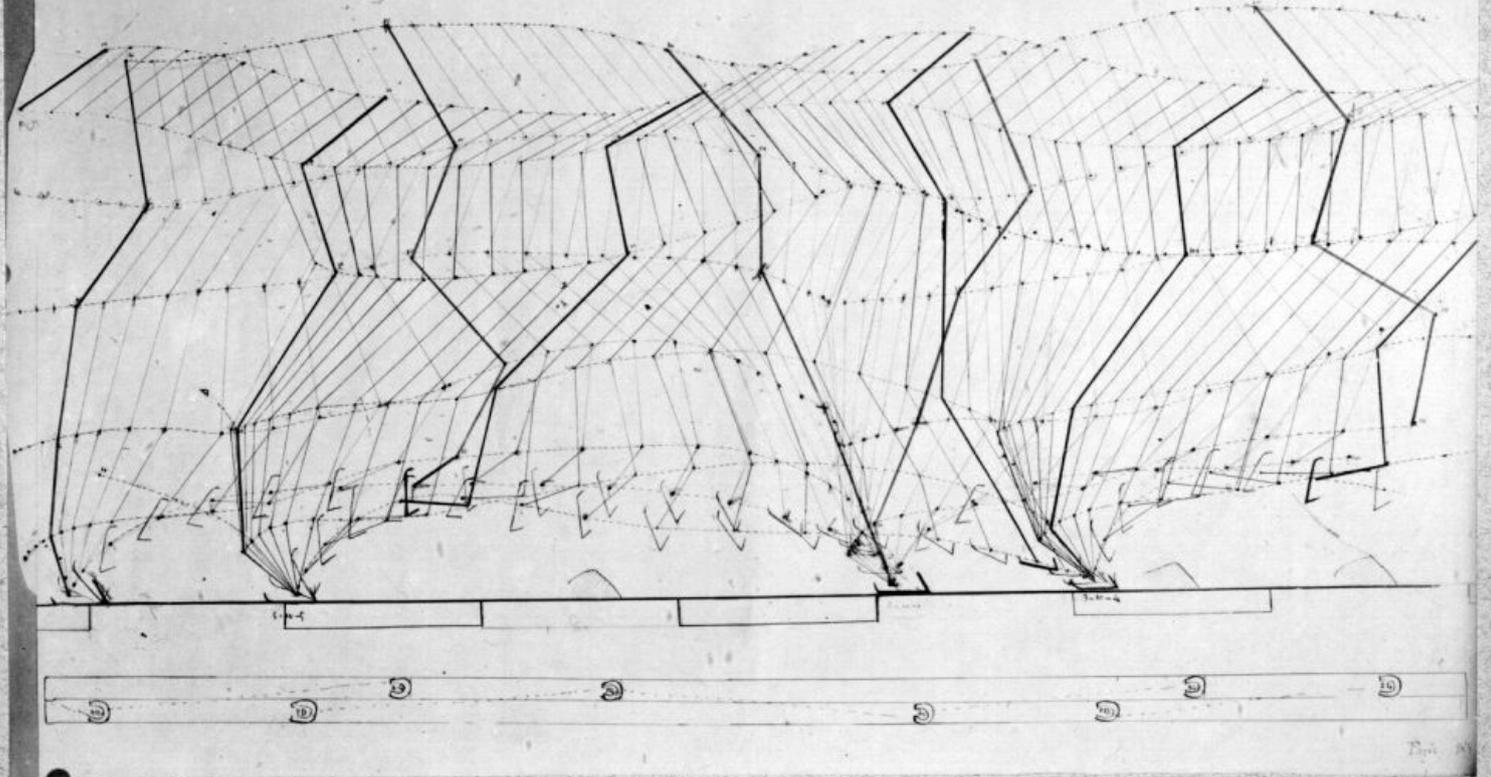


N° 129

photochronographie du pas du chevreuil
L'animal est noir et porte les signes blancs de différentes formes
à des articulations — comme dans la figure
précédente

Figure chronophotographique

*Cheval basalt - Galop à gauche - Bipède latéral droit -
- Clé n° 16 -*



N° 109

Cheval au galop

mouvement du bipède latéral droit

Analyse photochronographique
du
Vol des Oiseaux

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. XCVI,
séance du 14 mai 1883.

Analyse des mouvements du vol des oiseaux par la Photographie;

PAR M. MAREY.

« En présentant, l'an dernier, les premiers résultats de mes essais sur la photographie instantanée d'oiseaux pendant le vol, je montrais que l'intérêt véritable de ces expériences consiste à recueillir une série d'images représentant les attitudes successives de l'oiseau aux différentes phases d'une révolution de ses ailes. Le fusil photographique dont je me servais alors donnait à peu près douze images par seconde, de sorte que, sur les oiseaux dont les battements d'ailes sont lents, on pouvait recueillir trois ou quatre attitudes différentes de l'aile à chacune de ses révolutions ⁽¹⁾. Ainsi, la mouette, qui donne assez exactement trois battements à la seconde, se trouvait, par exemple, représentée d'abord avec les ailes en haut, puis successivement on la voyait abaissant ses ailes, les tenant tout à fait en bas, enfin les relevant; après cela recommençait une seconde série d'attitudes semblables aux précédentes; enfin une troisième série, pareille aux deux autres, complétait le cycle des douze images.

⁽¹⁾ *Comptes rendus*, t. XCIV, p. 683 et 823.

M.

(2)

» En prenant ainsi la photographie d'un grand nombre d'oiseaux, on ne tombait pas toujours sur les mêmes phases du mouvement des ailes; aussi fut-il possible, en choisissant parmi les différentes épreuves, d'en trouver qui se complétaient les unes par les autres, montrant des positions de l'aile intermédiaires aux quatre dont il vient d'être question. Avec huit attitudes successives également espacées dans le temps, on construit des disques de phénakisticope qui donnent d'une manière saisissante l'impression d'un oiseau volant. Mais, comme ces photographies sont obtenues en visant l'oiseau d'une manière permanente, elles ne donnent que l'indication de ses attitudes successives, mais rien n'indique le chemin effectué, ni la vitesse aux différents instants du vol. Il est pourtant indispensable d'avoir cette indication des espaces parcourus en fonction du temps.

» Un semblable problème s'était posé déjà à propos de la locomotion de l'homme et des animaux et je l'avais résolu d'une manière satisfaisante, en recueillant les images photographiques en série, sur une même plaque immobile (1).

» Un homme vêtu de blanc marchait ou courait au devant d'un écran noir. Pendant ce temps, un disque fenêtré, tournant au devant de l'appareil photographique, n'admettait la lumière dans l'objectif qu'à des instants très courts, séparés par des intervalles de temps égaux. Chaque admission de la lumière produisait sur la plaque photographique une image du marcheur, et comme, entre deux retours successifs de la fente du disque tournant, l'homme avait fait un certain chemin, ses images successives se formaient sur la plaque en des lieux différents : l'intervalle qui les séparait l'une de l'autre était exactement proportionnel à la distance parcourue pendant une rotation du disque.

» La même méthode était applicable à l'analyse du vol de l'oiseau.

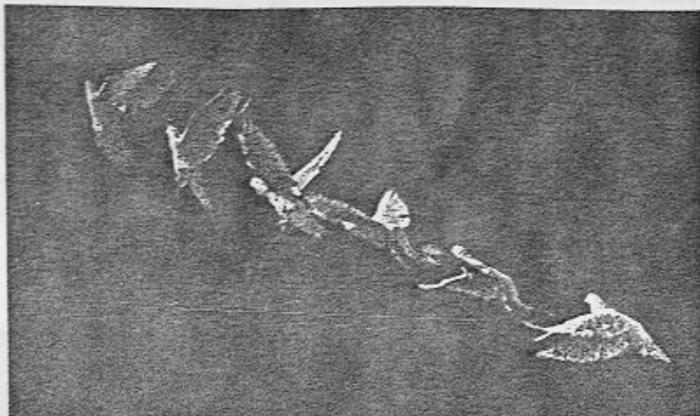
» Je pris un pigeon blanc, et, le faisant voler parallèlement au plan d'un écran noir au devant duquel je le lâchais, j'obtins une série d'images séparées par des intervalles variables suivant la vitesse du vol. La *fig. 1* est la reproduction, par la *similigravure*, d'une de ces photographies (2).

(1) *Comptes rendus*, 1882, 1^{er} semestre, p. 1013.

(2) On sait que, dans ce procédé, la main de l'homme n'intervient pas, ce qui donne aux reproductions la même valeur qu'aux épreuves originales au point de vue de l'authenticité des attitudes. Toutefois, l'introduction des hachures nécessaires pour le tirage en typographie altère un peu le modelé des formes de l'oiseau, qui sont si nettes dans les épreuves photographiques.

» On y peut voir, relativement à la netteté des images, une grande supériorité sur mes premières épreuves. Ce ne sont plus de simples silhouettes, comme on en avait le plus souvent avec l'emploi du fusil, mais des images assez bien formées pour pouvoir supporter un agrandissement de quatre à cinq diamètres. Ce progrès tient à la plus grande perfection de la mise au :

Fig. 1.



Images successives d'un pigeon qui vole, recueillies à des intervalles de $\frac{1}{4}$ de seconde.
Temps moyen de pose, $\frac{1}{127}$ de seconde.

point. En effet, il devient assez facile de régler l'appareil photographique lorsqu'on sait approximativement à quelle distance passera l'oiseau.

» Un autre avantage de la disposition nouvelle consiste en l'emploi d'un grand disque (1^m de diamètre) muni de fenêtres assez larges (0^m,03) et tournant avec rapidité (8 tours environ à la seconde). Les effets de la diffraction qui altèrent la pureté des images quand on opère avec de petites fentes deviennent insensibles quand la fente a plus de largeur.

» Dans les conditions ci-dessus décrites, les admissions de la lumière se faisaient huit fois par seconde, et le temps d'éclairage était d'environ $\frac{1}{900}$ de seconde. Cette brièveté du temps de pose est encore une condition nécessaire à la netteté des images, car elle ne permet pas à l'oiseau de se déplacer sensiblement pendant qu'on en prend la photographie.

» Si maintenant on considère la série des attitudes que présente l'oiseau aux différents instants de son vol, on trouve quelques images qui, au premier abord, sont assez étranges; ainsi l'oiseau, en abaissant ses ailes, les porte tellement en avant que sa tête disparaît à certains instants, com-

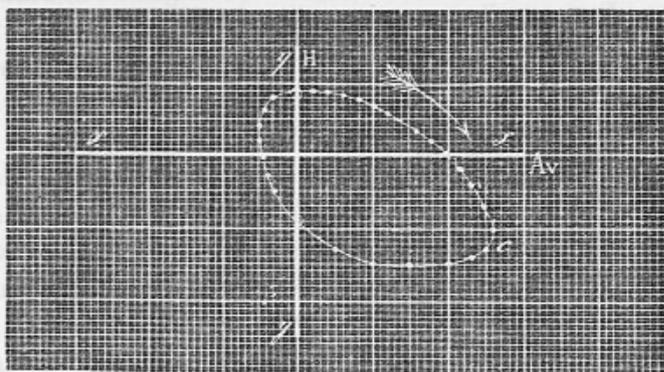
(4)

plètement couverte par les ailes, dont la pointe se trouve bien en avant du bec. Cette position singulière se voyait du reste sur certaines photographies inédites que M. Muybridge a obtenues et qu'il a bien voulu me montrer. Enfin on pouvait prévoir cette attitude d'après les résultats que m'a donnés autrefois l'inscription mécanique des mouvements de l'aile.

» Cette inscription, péniblement obtenue au moyen d'instruments compliqués et délicats ⁽¹⁾, ne paraît pas avoir inspiré beaucoup de confiance à ceux qui s'occupent de l'étude du vol. Toutefois, si l'on rapproche les images photographiques de la courbe tracée par les appareils inscripteurs, on trouve une concordance complète entre la courbe et les photographies. La *fig. 2*, en effet, montre que, sur le pigeon, l'extrémité de l'aile décrit une sorte d'ellipse très allongée; que l'articulation de l'épaule qui correspond par sa position à l'entrecroisement des deux coordonnées x et y se trouve à la partie postérieure du grand axe de cette ellipse et que, par conséquent, c'est en avant surtout que se porte l'aile de l'oiseau. La photographie justifie donc pleinement les résultats donnés par la méthode graphique.

» Dans la *fig. 2*, une flèche indique le sens du mouvement de l'aile :

Fig. 2.



Courbe fermée représentant la trajectoire de la pointe de l'aile d'un pigeon. Une flèche indique le sens du mouvement. Cette courbe a été obtenue au moyen d'appareils inscripteurs spéciaux.

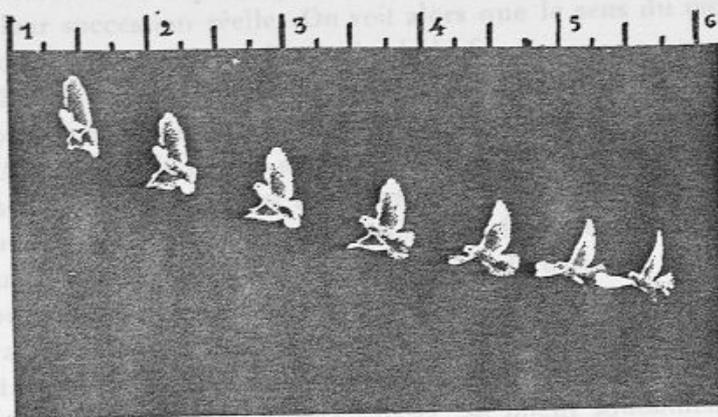
ce mouvement se fait en bas et en avant, puis en haut et en arrière. La photographie doit justifier cette conclusion tirée de l'inscription mécanique du mouvement. Mais, si l'on regarde l'ordre suivant lequel se présentent les attitudes successives dans une image collective, on trouve, suivant les cas,

(1) *Comptes rendus*, t. LXXIV, p. 589.

des ordres de succession différents : cela dépend du rapport qui existe entre l'intervalle de temps qui sépare les images successives et la fréquence des mouvements de l'aile. Ainsi, en ralentissant un peu la rotation du disque fenêtré, on a eu la série d'images représentée *fig. 3*. Dans cette série, à chaque image l'oiseau se retrouve toujours dans la même attitude : c'est que la période des battements de ses ailes coïncidait avec celle des éclairages de l'appareil photographique. Des expériences antérieures m'ont appris, en effet, que le pigeon donne environ huit coups d'aile par seconde ; or c'était précisément la vitesse de la rotation du disque fenêtré : il était donc naturel que chaque nouvelle admission de la lumière retrouvât toujours le pigeon dans la même attitude. Le seul changement d'une image à l'autre consistait en une translation de l'oiseau.

» La *fig. 3* montre un pigeon dans le milieu de la phase d'abaissement

Fig. 3.



Images successives d'un pigeon qui vole, prises à des intervalles de $\frac{1}{4}$ de seconde.

Le temps de pose est de $\frac{1}{1000}$ de seconde. Les espaces parcourus se mesurent au moyen de l'échelle métrique placée en haut de la figure.

de ses ailes. Il n'y a pas de doute à cet égard, les plumes s'infléchissent sur la résistance de l'air brusquement frappé, et l'aile se courbe à son extrémité, présentant l'apparence d'une surface à concavité supérieure. D'un bout à l'autre de la série des images, cette attitude se reproduit, sauf quelques différences tenant au changement d'inclinaison du corps de l'oiseau. Ainsi, vers la fin de son vol ascendant, le pigeon redressait son corps et l'inclinait sur le côté, de manière à présenter sa face ventrale.

On observera en même temps que les figures successives sont séparées par un intervalle assez régulièrement croissant. Cela signifie qu'entre deux

éclairages consécutifs l'oiseau avait parcouru des distances de plus en plus grandes. Tous les oiseaux présentent, au début de leur vol, une accélération de ce genre. Veut-on mesurer en mètres ces espaces franchis par l'oiseau, l'échelle métrique placée en haut de la figure permet cette évaluation et montre que l'oiseau parcourait d'abord $1^m,20$ entre deux coups d'aile, c'est-à-dire en $\frac{1}{8}$ de seconde, soit $9^m,60$ par seconde; du cinquième au sixième coup d'aile, l'espace franchi est de $1^m,70$, soit $13^m,60$ par seconde.

» On remarquera toutefois que, dans cette expérience, le vol ne s'effectuait pas parallèlement au plan de la glace sensible, mais qu'en s'élevant l'oiseau se rapprochait un peu de l'appareil. La *fig. 3* ne serait donc pas favorablement choisie pour déterminer la vitesse du vol.

» Dans la *fig. 1*, au contraire, les espaces successivement parcourus vont toujours en se raccourcissant : cela tient à ce que l'oiseau s'élevait en volant; or c'est toujours aux dépens de la vitesse que se produisent ces mouvements ascendants.

» En faisant varier légèrement la vitesse de rotation du disque tournant, il est clair qu'on ne rencontrera plus la même période des révolutions de l'aile de l'oiseau et que, si la rotation est convenablement réglée, on obtiendra des images dans lesquelles l'aile se montrera à des phases successives de sa révolution; or ces phases seront d'autant plus rapprochées les unes des autres que la période de révolution du disque fenêtré se rapprochera davantage de celle de l'aile.

» On pourra ainsi faire une analyse stroboscopique des mouvements du vol. Cette analyse a déjà été tentée il y a quelques années par MM. Gauthot et Penaud, mais la méthode optique donne des sensations trop fugitives pour qu'on puisse bien saisir la succession des mouvements, tandis que la photographie livre à l'étude un document permanent beaucoup plus précieux.

» Suivant que la révolution du disque sera un peu plus ou un peu moins rapide que celle de l'aile, on verra, dans la série des images, une succession différente des mouvements. Pour que la succession des attitudes de l'aile soit dans le sens direct, c'est-à-dire dans l'ordre où ces mouvements s'effectuent dans le vol, il faut que la rotation du disque soit un peu plus lente que celle de l'aile de l'oiseau. Chaque nouvel éclairage de l'appareil rencontrera l'aile à une phase plus tardive de son parcours, et les images s'échelonneront sur la plaque dans l'ordre réel du mouvement. Avec une rotation plus rapide, l'aile se trouverait au contraire toujours en retard et les images donneraient l'apparence de mouvements renversés. C'est ce qui a eu lieu (*fig. 1*).

» Pour déterminer si une série d'images donne les mouvements en sens direct ou en sens renversé, il y a différents moyens.

» D'abord il est facile de distinguer une aile qui s'abaisse d'une aile qui s'élève : la première seule présente l'inflexion des plumes sur la résistance de l'air et la forme concave par en haut dont nous avons parlé. Si donc une série d'attitudes voisines l'une de l'autre montre l'aile infléchie par la résistance de l'air, cette forme suffira pour caractériser le sens du mouvement, car une aile portée en avant et courbée sur l'air signifie que le sens du mouvement est en avant et en bas.

» Un autre moyen consiste à multiplier le nombre des images de manière à être sûr que ce nombre excède beaucoup celui des coups d'aile, et que, par exemple, quatre ou cinq images consécutives se produisent dans une même révolution du vol. Si le nombre des images était trop grand, il en résulterait de la confusion, mais avec un disque muni de cinq fenêtres, et tournant environ huit fois par seconde, on est assuré d'obtenir les images avec leur succession réelle. On voit alors que le sens du mouvement est bien celui que représente la courbe de la *fig. 2*.

» Enfin, si l'on examine la position de l'aile aux différentes phases de son parcours, la photographie révèle les détails les plus intéressants.

» Assurément le pigeon se prête mal à de pareilles études, à cause de la fréquence trop grande des battements de ses ailes; mais, malgré cela, on observe déjà certains actes qui échappent à l'examen direct du vol. Ainsi, en suivant l'aile dans son parcours à partir du moment où elle est en élévation extrême, on voit qu'elle se porte très vivement en avant et cache latéralement la tête de l'oiseau; puis l'aile s'abaisse et s'infléchit sur l'air pendant toute sa phase d'abaissement. A la fin de l'abaissement, les articulations carpiennes, étendues jusqu'ici, se plient soudainement, et l'aile forme au niveau du corps un angle saillant; les pennes s'écartent l'une de l'autre, et leur imbrication devient apparente. Des espaces libres que l'on a comparés à ceux qui séparent les lames d'une persienne se produisent et semblent avoir pour effet de laisser l'air traverser l'aile remontante. Cette fonction des pennes, déjà maintes fois signalée par les auteurs qui se sont occupés du vol des oiseaux, était jusqu'ici déduite plutôt de l'anatomie que réellement constatée. Existe-t-elle à tous les instants du vol? J'ai quelques raisons de croire qu'elle ne se produit que dans les coups d'aile de départ et que, sur l'oiseau lancé à pleine vitesse, la flexion du carpe et la séparation des pennes cessent de se produire.

» Mais, pour juger cette question et beaucoup d'autres encore, il faudra

(8)

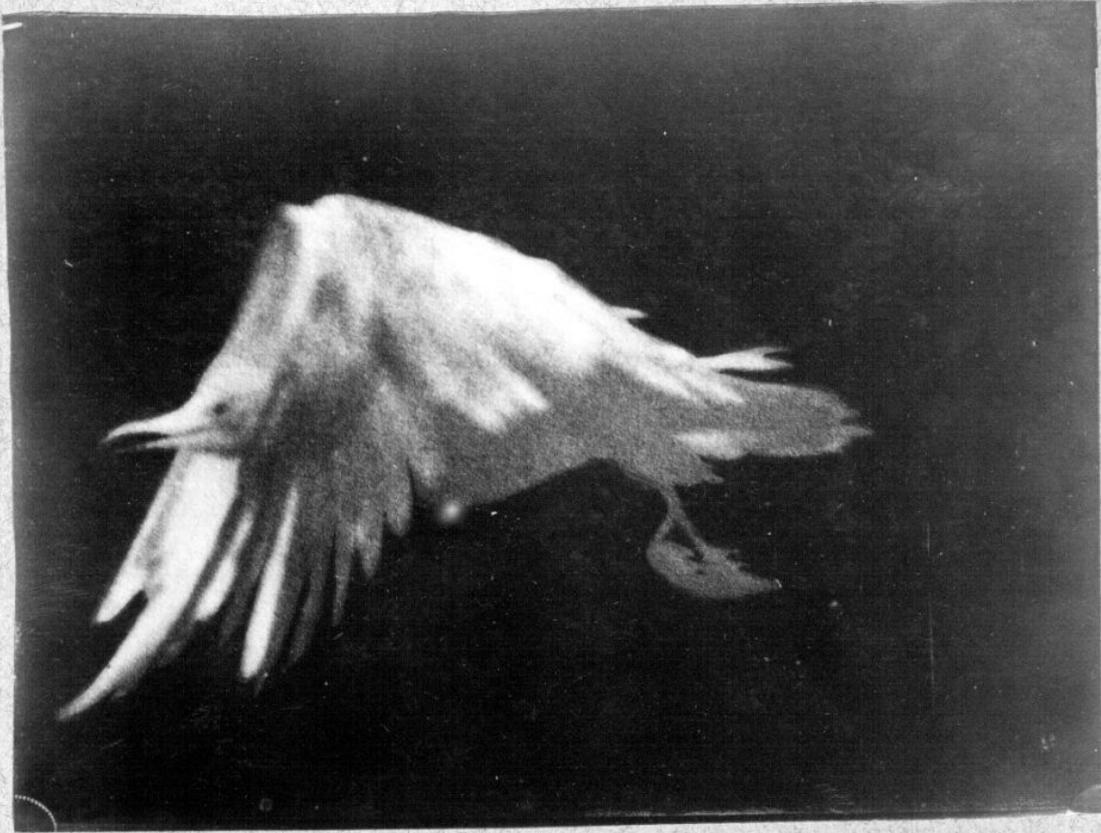
multiplier les expériences, prendre des images en séries sous différents angles, de manière à voir l'oiseau tantôt de profil, tantôt fuyant ou s'approchant. Enfin, et surtout, il faudra opérer sur des oiseaux de différentes espèces, afin de saisir les caractères particuliers du vol de chacune d'elles. Je ne prétends aujourd'hui que donner un aperçu de la méthode et des résultats qu'elle semble destinée à donner pour l'analyse du mécanisme si compliqué du vol. »



N° 146

Goëland photographié pendant le vol au moment de
la remontée de l'aile (Epreuve agrandie et retouchée)

Goéland au vol



Remontée de l'aile



N° 113



N° 85

Pigeon au vol

images successives ayant pour chacune

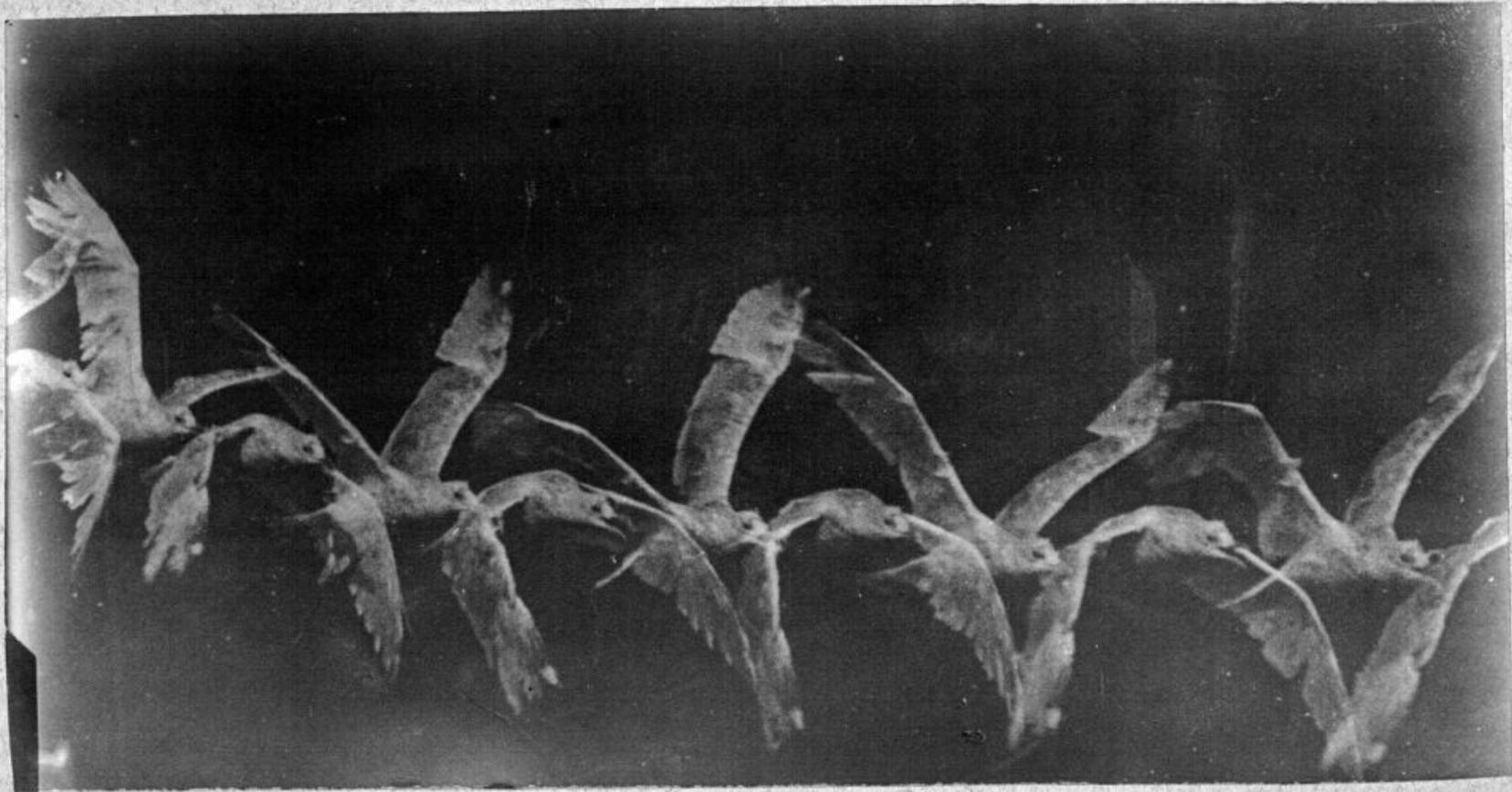
$\frac{1}{1000}$ de seconde

PHYSIOLOGIQUE
ANNEXE DU COLLÈGE DE FRANCE



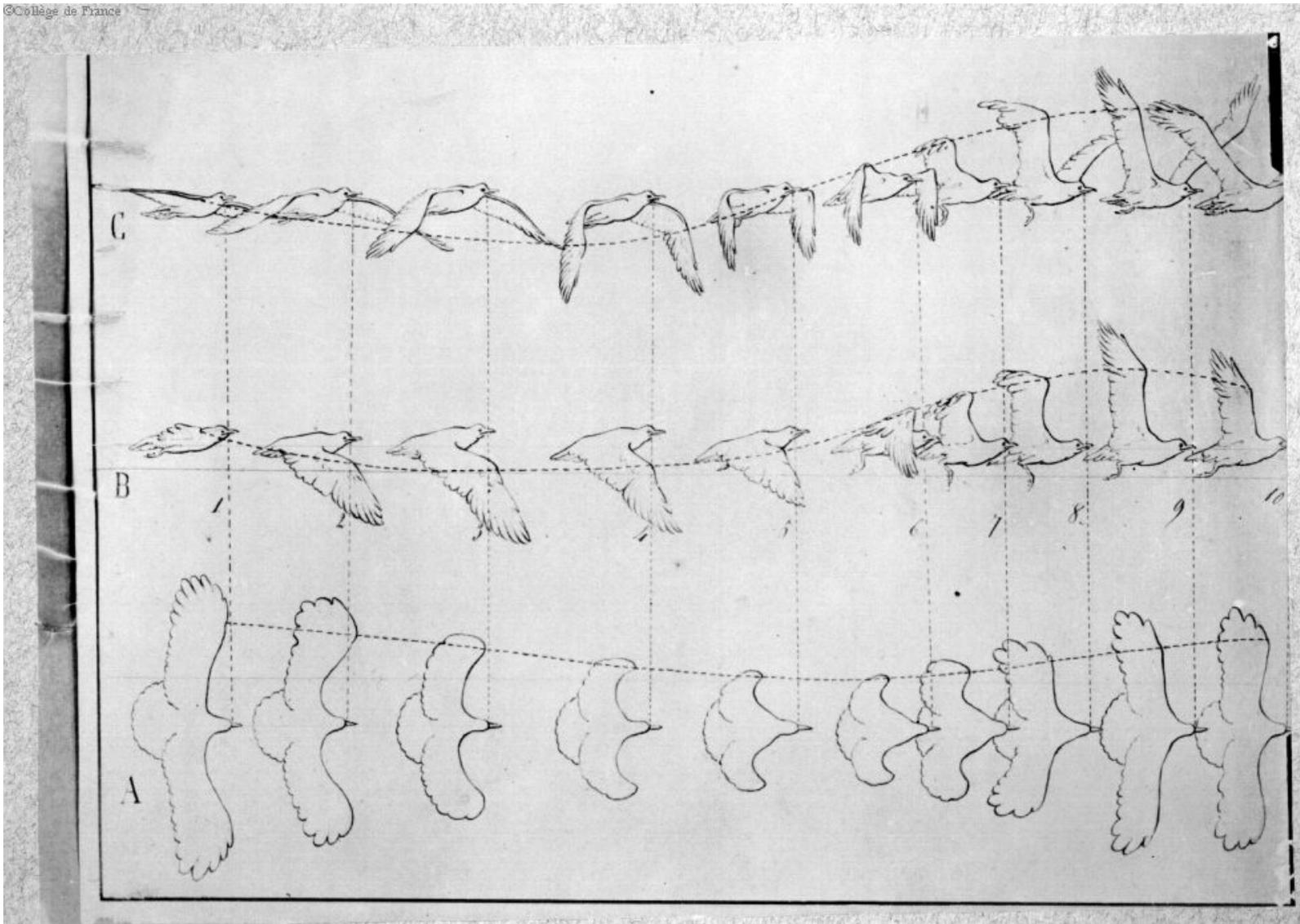
N° 126

Images successives d'un goéland au vol



N° 137

Images successives et fréquentes d'un
goéland au vol



N. 245

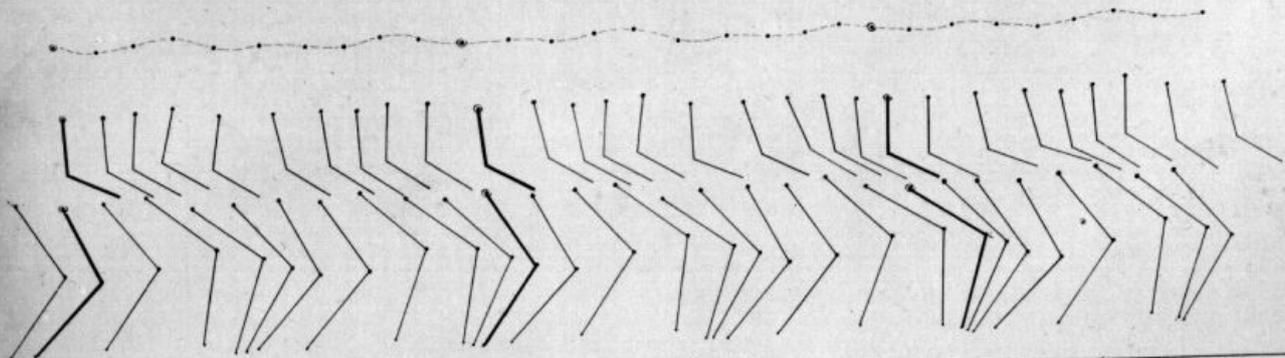
Dessins représentant sur trois plans de projection
les attitudes successives d'un goeland au sol pendant
une révolution complète de suite

Pathologie de la locomotion Humaine

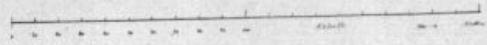
Pathologie de la locomotion humaine

Ankylose du genou droit avec grand raccourcissement.

102



23 Septembre 1866.



Course (côté droit)

R^e Leblanc

N^o 254

Sujet atteint d'une ankylose du genou droit portant un appareil à pilon et courant sur la piste d'expérience.

Empreintes du pied sur une feuille de papier enfumée



N° 74

1. 2. Pied droit et pied gauche avant la marche

3. 4. id. après marche de 4 kilomètres.

5. 6. empreinte de la base de sustentation le corps soulevé sur la pointe des pieds

Ce cas présent est pathologique, on voit (1) l'écrasement de la voûte plantaire. (2) considérable au pied gauche. (3) idem après 4 kilomètres.

Table des matières