

Bibliothèque numérique

medic@

**Marey, Etienne-Jules. - Marey /
1887-89 / Station / physiologique / IV /
Mélanges**

Paris, 1889 (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>

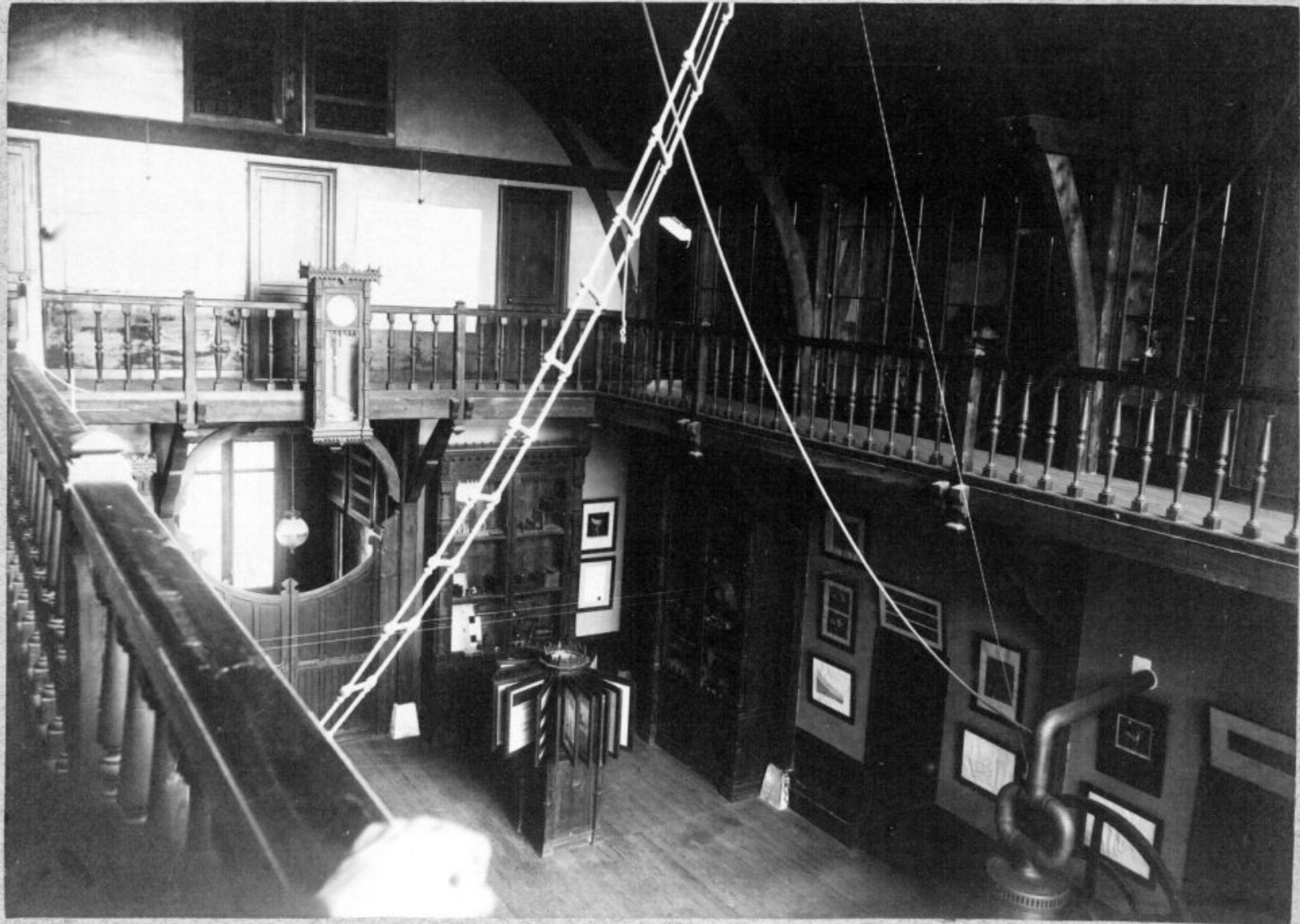
COLLECTION FRANCE

INSTITUT MAREY

N° 111

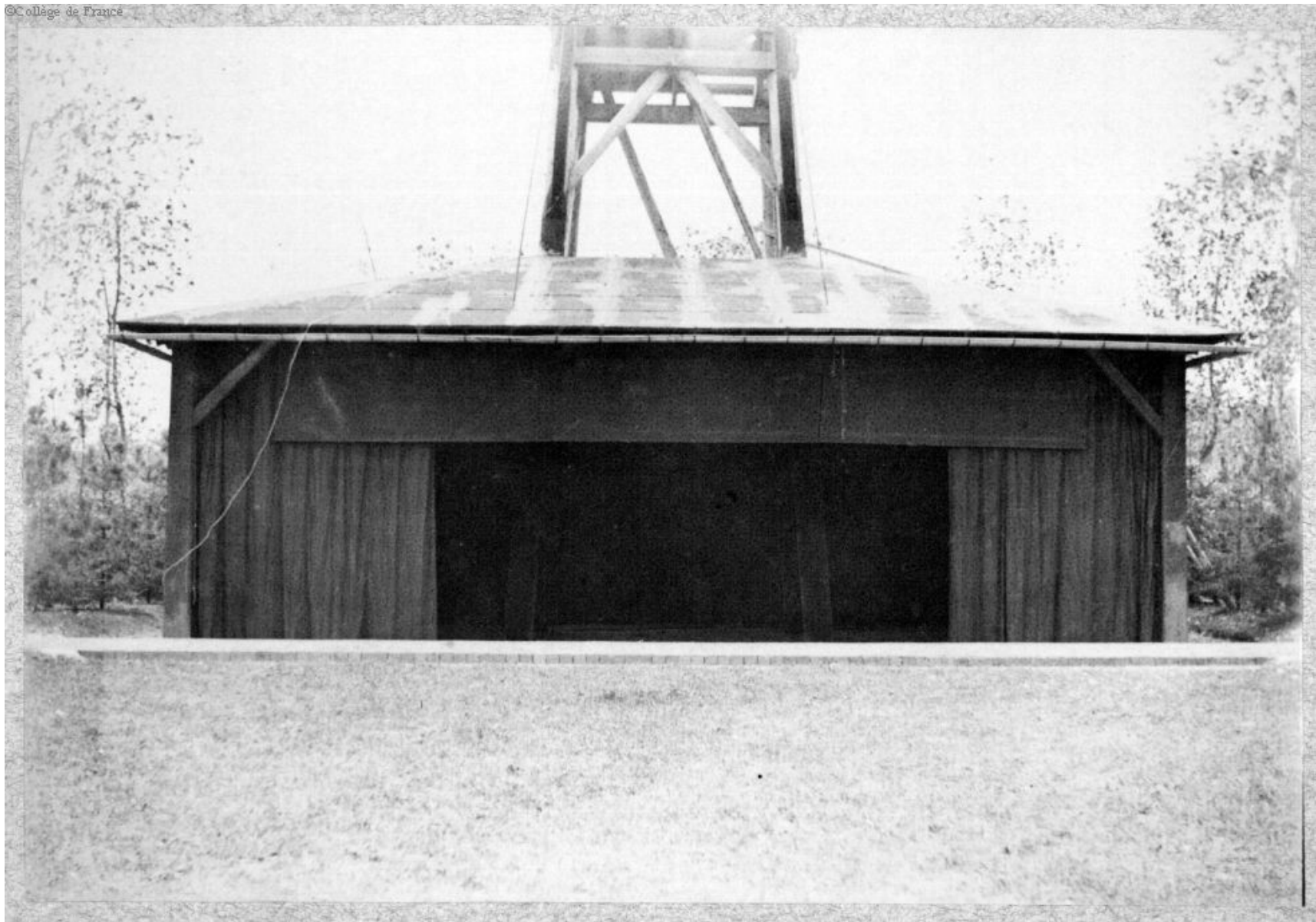


Vue intérieure des Grand Hall de la
Station Physiologique

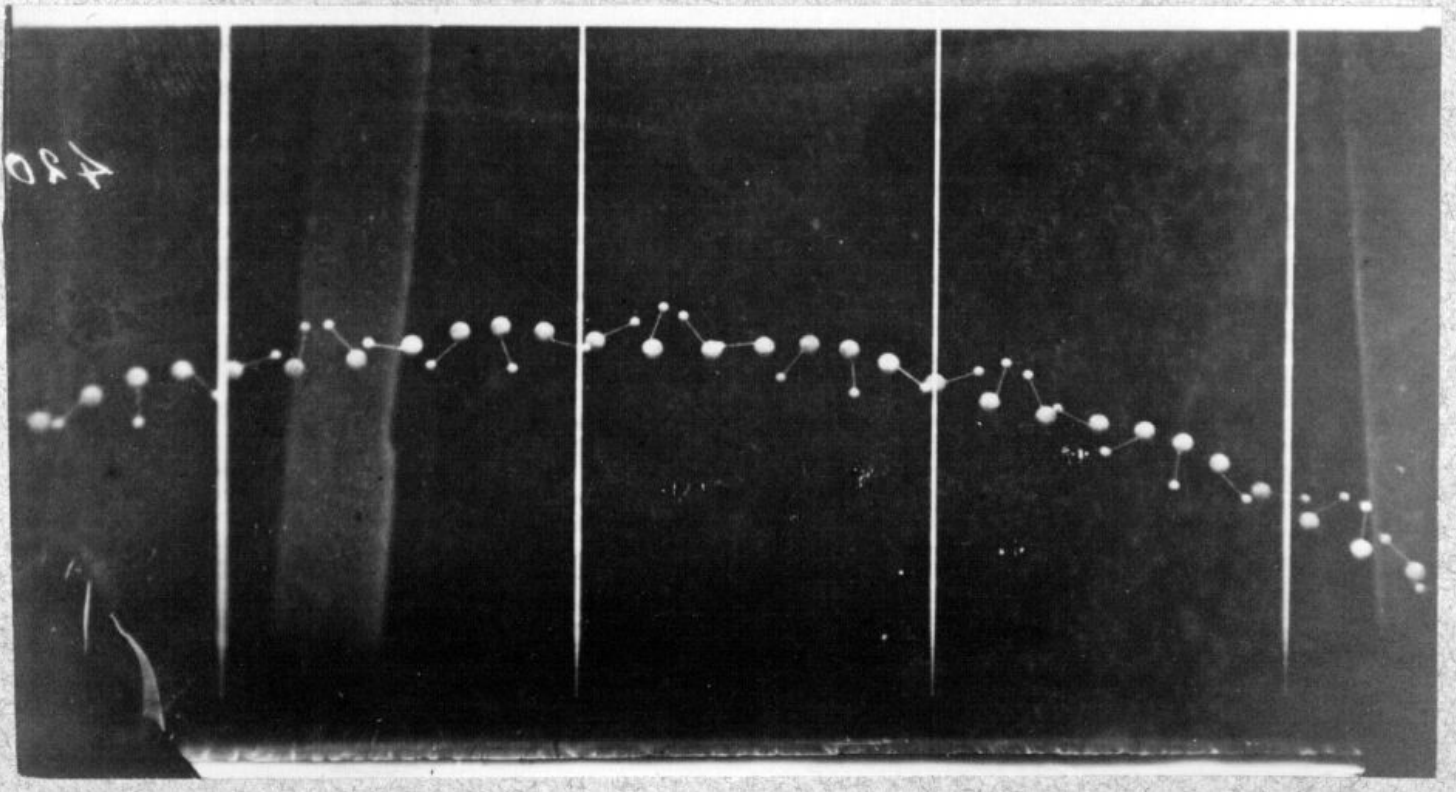
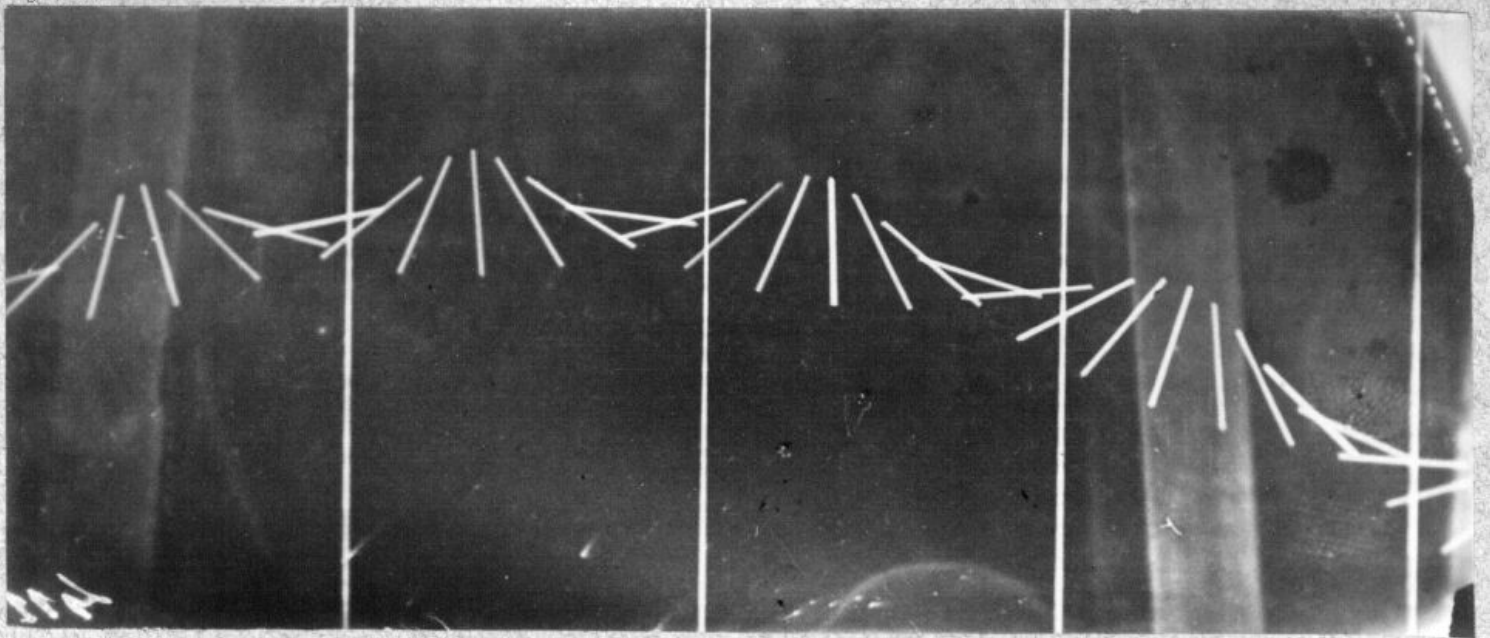


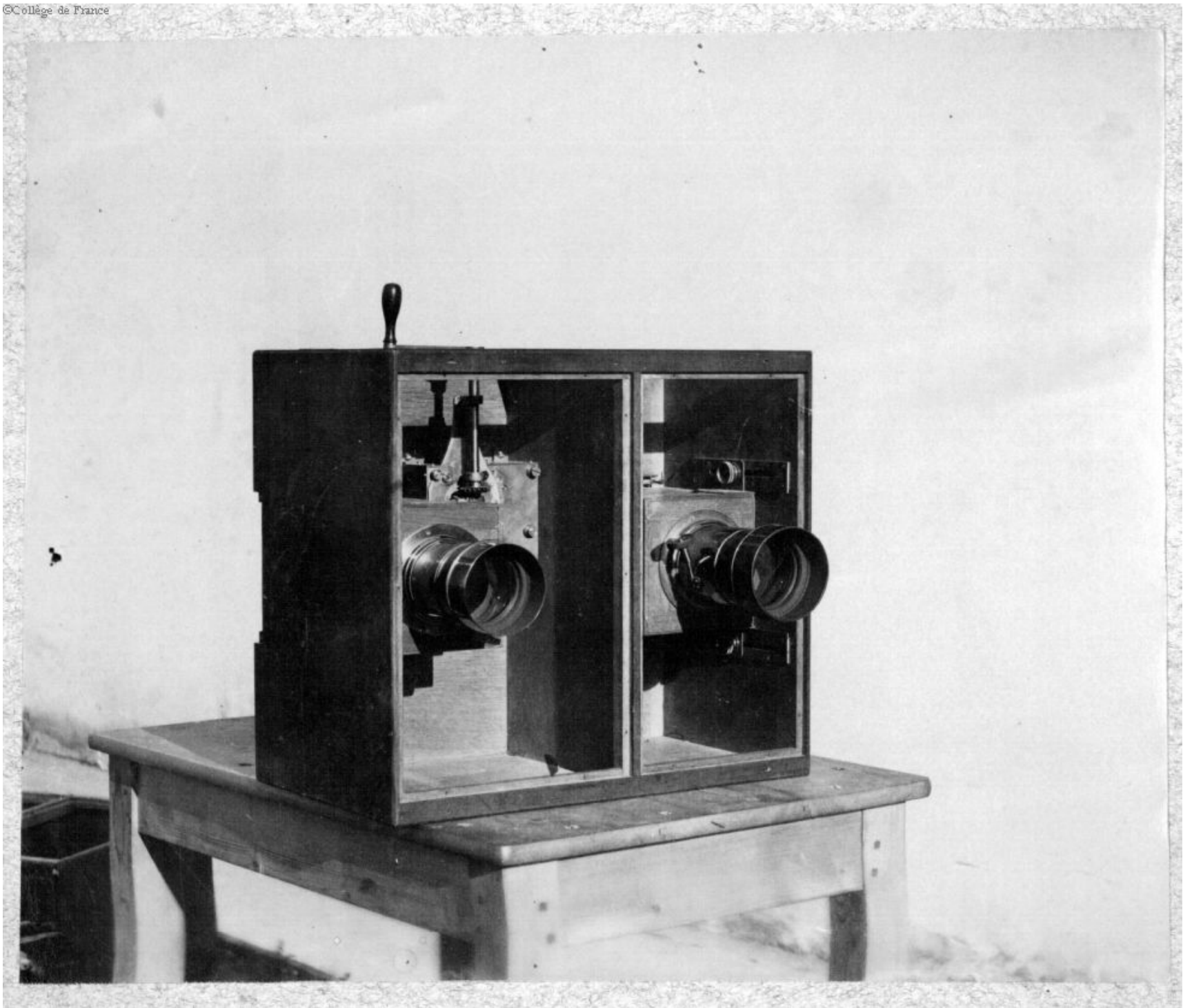
*Vue intérieure du Hall de la Station
Physiologique prise du balcon du 1^{er} étage*



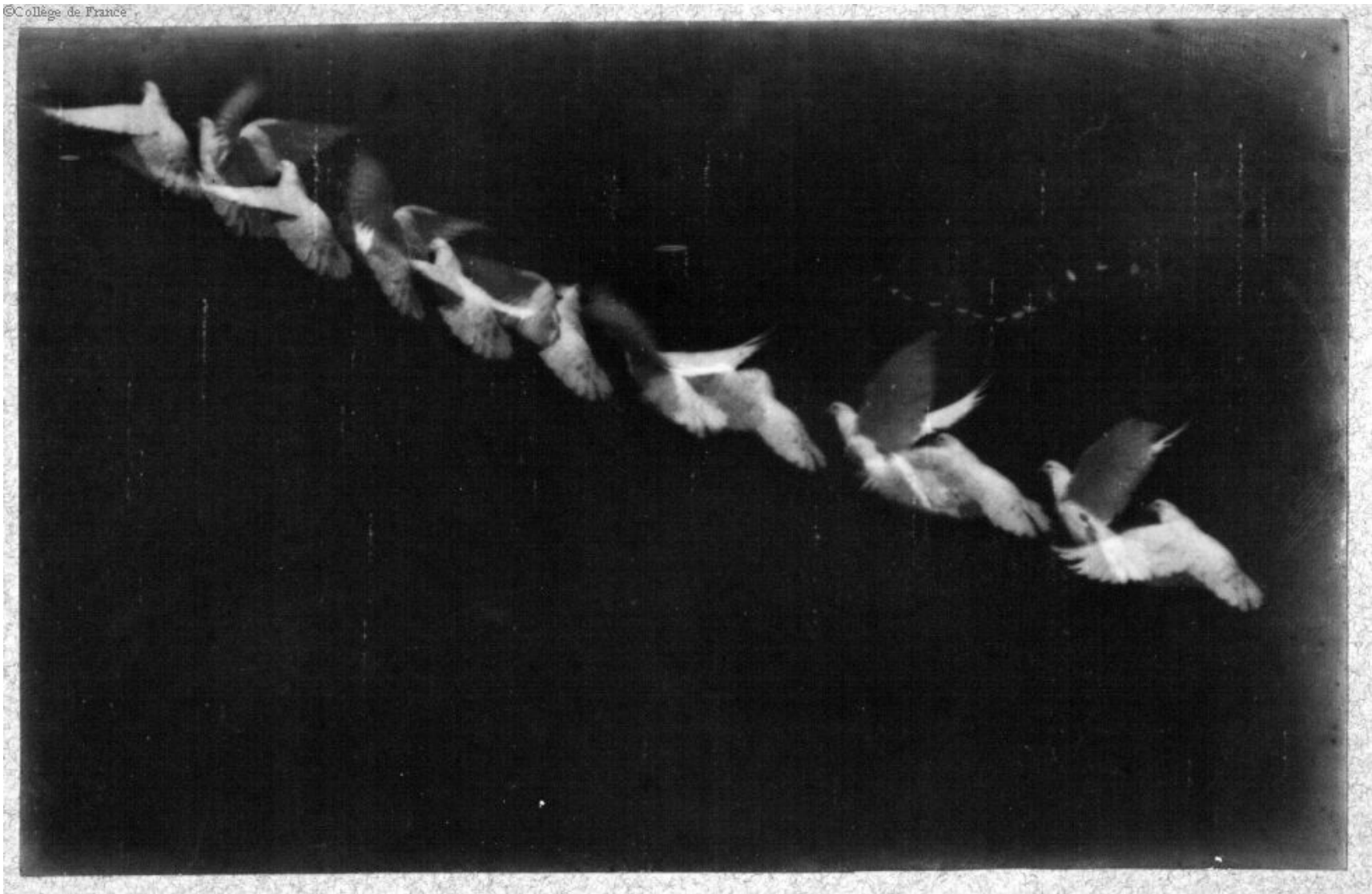












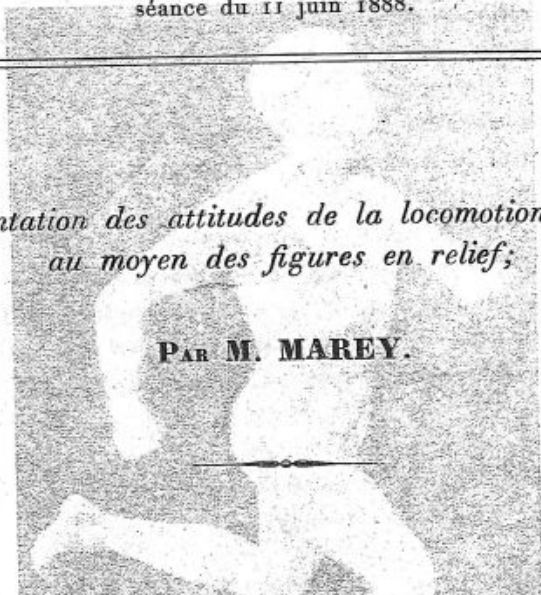
INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CVI;
séance du 11 juin 1888.

*Représentation des attitudes de la locomotion humaine
au moyen des figures en relief;*

PAR M. MAREY.



« En présentant l'an dernier à l'Académie une série de figures en relief d'un oiseau qui vole, j'ai pensé que cette représentation du mouvement était la seule qui pût en donner une idée complète. Je souhaitais vivement de voir appliquer la même méthode pour traduire les mouvements de l'homme et des animaux avec leurs phases successives. La photochronographie donne, pour la construction de figures en relief, tous les documents nécessaires, mais il fallait qu'un artiste voulût bien consacrer son talent à l'exécution de ces figures.

» M. Engrand accepta de représenter un coureur à un instant du pas de course d'après les images instantanées et synchrones qui le montrent sous des aspects différents; l'une de ces images était donnée par un appareil placé verticalement au-dessus du coureur, à une hauteur de 12^m.

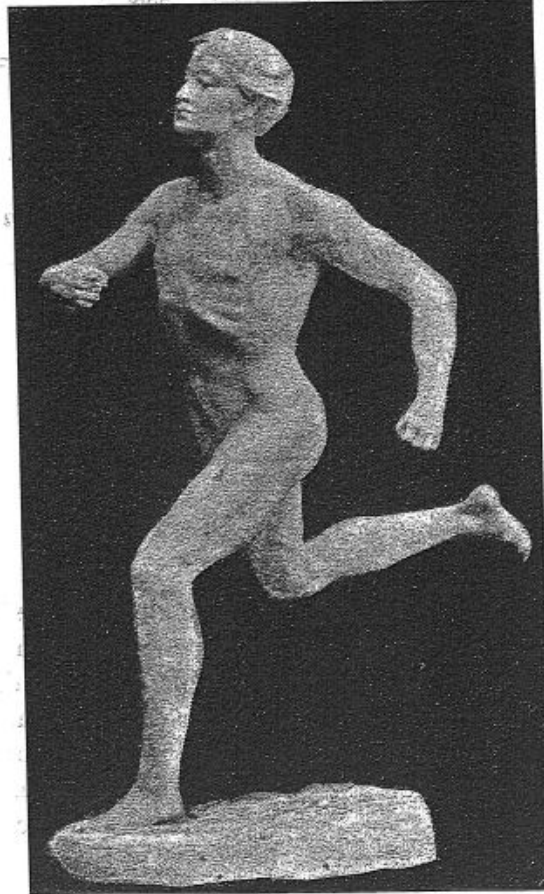
» Ce serait une entreprise de longue haleine que de traduire par une dizaine de statuettes une série d'attitudes représentant les phases successives d'un pas de marche ou de course; mais le spécimen isolé que j'ai

M.

(2)

l'honneur de présenter à l'Académie suffit déjà pour montrer le parti qu'on tirerait de ce mode de représentation, dont la fidélité est parfaite.

» Le physiologiste familiarisé avec la succession des mouvements de la locomotion humaine éprouve parfois, devant certaines représentations artistiques de marcheurs ou de coureurs, une fâcheuse impression. C'est



Phototypie de la statuette du coureur.

quelque chose d'analogue à ce qu'on ressent devant les paysages peints à une époque où les lois de la perspective étaient moins observées qu'aujourd'hui.

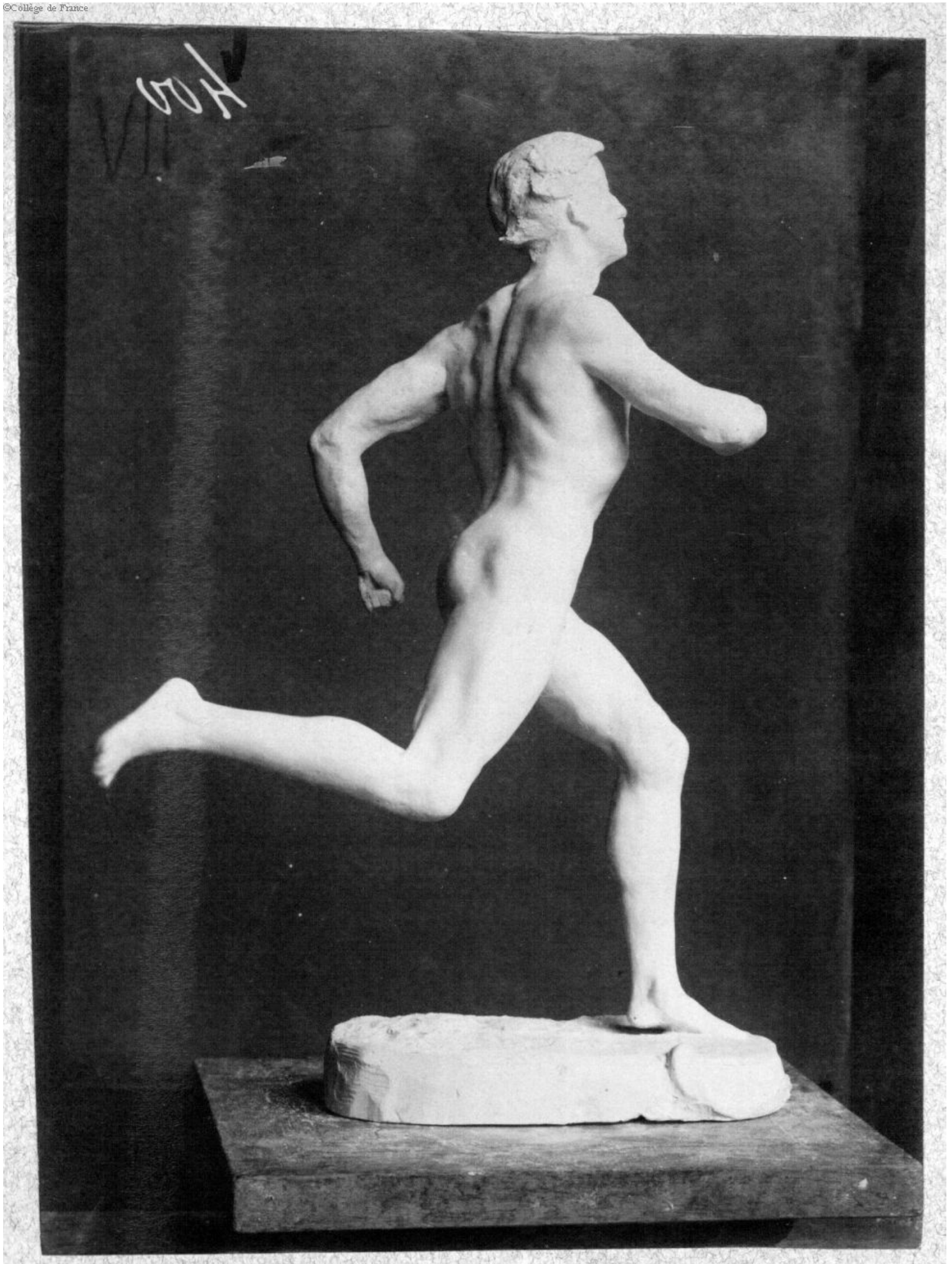
» On s'explique la difficulté que doivent éprouver les artistes à représenter l'homme et les animaux en action, quand on sait que les observateurs

les plus exercés se déclarent incapables de saisir les phases successives des mouvements de la locomotion. A ce titre, la photochronographie semble appelée à rendre des services aux Arts comme à la Science, puisqu'elle analyse les mouvements les plus rapides et les plus compliqués.

» Les belles expériences de M. Muybridge ont déjà exercé sur l'Art une influence incontestable; il ne paraît pas douteux qu'une série de figures en relief traduisant, avec leur succession réelle, les attitudes si variées de la marche et de la course ne fournisse aux artistes et aux physiologistes d'utiles indications.

» Bientôt, j'espère, des objectifs plus puissants que ceux dont je dispose permettront, d'après le modelé des épreuves, d'apprécier l'état d'action ou de repos des différents groupes musculaires, comblant ainsi une lacune de la physiologie des mouvements. De leur côté, les artistes trouveront dans ces images le moyen de rendre encore plus fidèle la représentation des êtres animés.

» Pour le moment, je n'ai pu fournir à M. Engrand que l'attitude réelle correspondant à l'un des instants du pas de course; c'est à lui qu'appartient entièrement tout le reste de son œuvre. »



INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, tome CIV,
séance du 24 janvier 1887.

Le mécanisme du vol des oiseaux étudié par la Photochronographie ;

PAR M. MAREY.

« En décrivant la méthode nouvelle que j'ai désignée sous le nom de *Photochronographie* ⁽¹⁾, j'ai montré qu'elle se substituait avantageusement à l'inscription mécanique dans les cas où il s'agit de déterminer les mouvements rapides et étendus d'un corps dont aucun obstacle matériel ne doit entraver le déplacement. Cette extension donnée à la méthode graphique ouvrait le champ à des applications nouvelles. On a vu avec quelle facilité la Chronophotographie se prête à l'étude de la locomotion de l'homme ; appliquée à l'analyse du vol des oiseaux, la même méthode devait sans doute résoudre les problèmes de Cinématique et de Dynamique relatifs à ce genre de locomotion.

» Il fallait d'abord obtenir des images nettes de l'oiseau quelle que fût la rapidité de ses mouvements. Des essais successifs m'ont donné des images de plus en plus parfaites, grâce à la brièveté croissante des temps de pose. Quand on réduit à $\frac{1}{2000}$ de seconde l'introduction de la lumière dans l'ap-

(1) Séance du 7 août 1882.

M.

(2)

pareil photographique, l'image de l'oiseau est suffisamment nette, même si on le surprend dans la phase la plus rapide du mouvement de ses ailes.

» J'ai déjà présenté à l'Académie ces photographies à courtes poses, mais je n'en avais pas encore obtenu de reproductions par l'héliogravure ; la *fig. 1* est un spécimen de ce genre de reproduction : elle représente assez

Fig. 1.



Images successives d'un goéland au vol.

nettement quelques-unes des attitudes que prend un goéland aux différentes phases de son vol.

» Mais, comme le nombre de ces attitudes est insuffisant pour faire saisir toutes les phases de chaque révolution de l'aile et comme, d'autre part, en multipliant indéfiniment le nombre des images, on arrive à la confusion, j'ai recouru, pour établir la succession des attitudes de l'oiseau, à la *Stroboscopie* ⁽¹⁾.

» Dans une longue série d'images pareilles à celles de la *fig. 1*, c'est-à-dire assez éloignées les unes des autres pour être bien distinctes, j'ai choisi, pour les disposer en série, celles qui correspondaient à des instants

Fig. 2.



Images d'un goéland décalquées et disposées en série suivant l'ordre dans lequel elles se succèdent pendant une révolution de l'aile.

successifs et de plus en plus avancés d'une révolution de l'aile. On voit

(¹) *Comptes rendus*, séance du 14 mai 1883.

(3)

dans la *fig. 2* onze positions successives de l'aile, correspondant à des intervalles de temps égaux entre eux.

» La durée d'une révolution de l'aile du goéland, mesurée chronographiquement, était en moyenne de $\frac{1}{5}$ de seconde et, comme dans cette durée onze images ont été représentées à des intervalles de temps égaux, il s'ensuit que ces intervalles sont de $\frac{1}{55}$ de seconde.

» Ce nombre d'images est déjà suffisant pour donner une idée des changements de hauteur, d'orientation, d'inclinaison de l'aile, autant du moins que permet de les estimer la projection de ces mouvements sur un plan vertical parallèle à la direction du vol.

» Il faut noter que les images disposées en série dans la *fig. 2* n'occupent pas, les unes par rapport aux autres, leurs véritables positions. On les a espacées pour les rendre bien distinctes, mais un goéland qui s'envole ne parcourt pas en $\frac{1}{55}$ de seconde un espace proportionnel à celui qui sépare ces images successives. Il importe donc de mesurer exactement le chemin parcouru pendant chacune des phases de la révolution de l'aile, ainsi que les changements de hauteur ou d'inclinaison du corps de l'oiseau : ces changements de vitesse et de hauteur du corps de l'animal constituent, en réalité, les effets mécaniques du coup d'aile.

» Au risque d'amener un peu de confusion dans les images en les superposant en partie les unes aux autres, il faut en multiplier le nombre et le porter à vingt-cinq ou à cinquante par seconde. Or, un disque percé de deux fentes et faisant cinq tours, ce qui donne dix images par seconde, avait servi pour la *fig. 1* ; en prenant un disque à cinq fentes et en conservant la même vitesse de rotation, on a obtenu la *fig. 3*, qui donne vingt-

Fig. 3.



Vol du goéland, 25 images par seconde. Cinq révolutions de l'aile sont contenues dans cette figure.

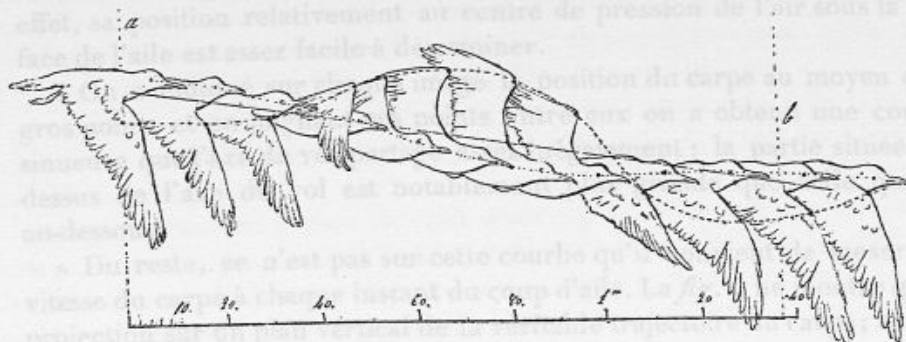
cinq images à la seconde et où la révolution de l'aile est représentée par cinq attitudes successives (1).

(1) Il est naturellement fort rare que la durée d'une révolution de l'aile corresponde à un nombre entier de tours du disque fenêtré ; c'est même sur l'inégalité de ces deux

(4)

» Si nous portons la rotation du disque fenêtré à dix tours par seconde, nous obtiendrons la *fig. 4* qui donne cinquante images à la seconde et

Fig. 4.



Vol du goéland, 50 images par seconde. De *a* en *b* est représentée une révolution de l'aile. Une ligne droite marque la direction de l'axe du vol. Une ligne ponctuée permet de suivre les oscillations verticales de l'œil de l'oiseau. Une autre ligne formée de petits traits représente la trajectoire du carpe dans une révolution de l'aile. En bas, une échelle pour mesurer les dimensions de l'oiseau et les espaces parcourus.

fournit des renseignements plus complets sur les mouvements de l'aile et sur les réactions de ces mouvements, c'est-à-dire sur les changements de vitesse et de hauteur éprouvés par la masse du corps de l'oiseau.

» Ce qui frappe au premier coup d'œil, c'est la direction descendante du vol; une droite menée à travers la série des images représente la direction générale ou l'*axe du vol*. Par rapport à cette ligne, le corps de l'oiseau s'élève et s'abaisse tour à tour, en même temps qu'il s'incline diversement sur l'horizon. Si l'on avait pu représenter une plus longue série d'images, on verrait que ces mouvements du corps se reproduisent périodiquement aux mêmes phases de chacune des révolutions de l'aile. Nous allons passer en revue les différentes notions que donne l'analyse de la *fig. 4*.

» 1° *Angle que fait l'axe du vol avec l'horizon.* — L'échelle métrique placée en bas de la figure est parallèle au plan horizontal du sol; cela permet de mesurer l'angle de 9° environ que l'axe du vol fait avec l'horizon.

périodes qu'est basé le classement stroboscopique des images. Dans la *fig. 3*, si l'on prend pour origine d'une révolution de l'aile la première image située à gauche, la sixième ne correspondra pas au dernier instant de la révolution, tandis que la septième appartiendrait déjà à la révolution suivante. Ce sera donc entre la sixième et la septième image que se fermera le cycle des mouvements de l'aile.

» 2° *Fréquence des battements de l'aile.* — Le nombre des images contenues dans une révolution de l'aile, entre les points *a* et *b*, est de 10 et une fraction; cela implique, à raison de cinquante images à la seconde, une durée de $\frac{2}{10}$ de seconde environ pour la révolution de l'aile, soit à peu près cinq coups d'aile à la seconde.

» 3° *Vitesse de l'oiseau.* — Mesuré sur l'échelle métrique, le parcours de l'oiseau, pendant une révolution de l'aile, est de 1^m,37 : soit 6^m,85 par seconde, ou 411^m à la minute, ou 24 660^m à l'heure. Cette vitesse correspond au début du vol, au moment où l'oiseau vient d'être lâché et prend péniblement son essor; mais, quand on examine une longue série d'images, on y voit la vitesse augmenter sensiblement à chaque coup d'aile.

» Si l'on veut apprécier les variations périodiques de la vitesse de l'oiseau pendant la durée d'un coup d'aile, il faut choisir, sur chaque image, un même point qui ne soit jamais caché, quelle que soit la position de l'aile; l'œil est un très bon point de repère pour ces mesures. La vitesse de l'œil de l'oiseau, c'est-à-dire l'espace parcouru entre deux images consécutives ou en $\frac{1}{50}$ de seconde, se mesure soit sur la trajectoire de l'œil, soit sur la projection horizontale de cette courbe. En adoptant cette dernière mesure, on trouve pour la vitesse de l'œil les valeurs suivantes : *maximum*, 0^m,16 en $\frac{1}{50}$ de seconde, soit 8^m à la seconde; *minimum*, 0^m,12 dans l'intervalle de deux images, ou 6^m à la seconde. La vitesse atteint son maximum à la fin de l'abaissement de l'aile, son minimum à la fin de la remontée.

» 4° *Oscillations verticales du corps.* — Mesurées d'après les déplacements de l'œil en haut et en bas de l'axe du vol, ces oscillations ont une amplitude de 0^m,08, soit 0^m,04 au-dessus et 0^m,04 au-dessous de cet axe. Les deux phases positive et négative de l'oscillation ont sensiblement la même durée, car toutes deux contiennent le même nombre d'images de l'oiseau. La phase positive ou convexe par en haut correspond à l'abaissement de l'aile; la phase négative, à son relèvement.

» 5° *Changements d'inclinaison du corps.* — L'axe longitudinal de l'oiseau, c'est-à-dire la ligne qui passerait du bec à l'extrémité de la queue, est sensiblement horizontal dans l'intervalle des deux oscillations dont nous venons de parler. Mais, pendant la phase d'abaissement de l'aile, on voit se relever l'extrémité antérieure de l'axe du corps; cette extrémité s'abaisse au contraire pendant la remontée de l'aile.

» 6° *Trajectoire de l'aile.* — Comme les articulations du coude et du carpe s'ouvrent et se ferment tour à tour, et comme, d'autre part, la surface de l'aile se courbe et s'incline de différentes façons pendant le vol, il est

indispensable de spécifier le point dont on veut déterminer la trajectoire. Le carpe est le point que j'ai choisi, d'abord parce qu'il est visible dans toutes les images, ensuite parce qu'il est particulièrement intéressant. En effet, sa position relativement au centre de pression de l'air sous la surface de l'aile est assez facile à déterminer.

» On a indiqué sur chaque image la position du carpe au moyen d'un gros point, et en joignant ces points entre eux on a obtenu une courbe sinueuse que l'axe du vol partage assez inégalement : la partie située au-dessus de l'axe du vol est notablement plus grande que celle qui est au-dessous.

» Du reste, ce n'est pas sur cette courbe qu'il convient de mesurer la vitesse du carpe à chaque instant du coup d'aile. La *fig. 4* ne montre que la projection sur un plan vertical de la véritable trajectoire du carpe ; celle-ci est une courbe à trois dimensions.

» Les figures que nous avons obtenues jusqu'ici ne donnent qu'une vue perspective des mouvements de l'aile, qui est toujours représentée dans une attitude plus ou moins oblique, parfois tout à fait *en raccourci*.

» Pour avoir une idée exacte des positions successives de l'aile par rapport aux trois dimensions de l'espace, il y a plusieurs manières. La plus simple serait de prendre simultanément deux séries d'images stéréoscopiques de l'oiseau ; mais ces photographies, tout intéressantes qu'elles seraient, puisqu'elles donneraient la sensation du relief pour les positions et les attitudes de l'oiseau, se prêteraient mal à des mesures précises.

» Il m'a paru préférable de prendre trois séries d'attitudes projetées sur trois plans perpendiculaires entre eux. Les images représentées ci-dessus sont des projections de l'oiseau sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol ; j'en ai obtenu d'autres en projection sur un plan vertical perpendiculaire à l'axe du vol, et d'autres enfin projetées sur un plan horizontal parallèle à cet axe.

» Les résultats de cette nouvelle série d'expériences feront l'objet d'une prochaine Note. »

Mouvements de l'aile de l'oiseau représentés suivant les trois dimensions de l'espace.

(Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CIV; séance du 7 février 1887.)

« Dans une Note récente ⁽¹⁾, j'ai montré qu'une seule série d'images chronophotographiques recueillies en projection sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol ne donnait pas des renseignements suffisants pour expliquer le mécanisme de l'aile de l'oiseau. Mais ces images expliquent fort bien les réactions des coups d'aile, c'est-à-dire les mouvements imprimés à la masse du corps. En effet, si l'on admet que les mouvements des deux ailes soient symétriques, ils ne peuvent que déplacer le corps de l'oiseau dans un plan vertical, en produisant les changements de vitesse, de hauteur et d'inclinaison du corps dont nous avons donné la mesure. Quant aux mouvements des ailes, ils se font suivant les trois dimensions de l'espace; j'ai dû, pour les déterminer, recourir à trois séries d'images projetées sur trois plans différents.

» Cherchons d'abord à préciser les conditions idéales de cette expérience.

» L'oiseau volant en pleine lumière, il faut braquer sur lui trois appareils photochronographiques bien réglés, de manière à donner dans le même temps un même nombre d'images. Bien plus, il faut que le syn-

(¹) Séance du 24 janvier 1887.

chronisme soit établi entre les appareils, de sorte que, dans tous les trois, les images se forment au même instant.

» Il faut enfin que les trois champs obscurs soient disposés de telle façon que l'oiseau, vu simultanément de chacun des trois appareils, se projette sur chacun de ces trois champs. Un dispositif électromagnétique ouvrirait et fermerait simultanément les trois chambres photographiques.

» Ainsi, outre l'appareil unique avec son champ obscur qui a servi aux expériences précédemment décrites, il en faudrait deux autres avec leurs champs respectifs.

» Un des nouveaux appareils serait suspendu à 12^m ou 15^m de hauteur pour prendre les images de l'oiseau vu d'en haut, tandis que le champ obscur correspondant à cet appareil serait formé par une tranchée profonde creusée dans le sol et noircie intérieurement, de telle sorte qu'elle ne pût recevoir ni émettre aucune lumière.

» Le troisième appareil photochronographique serait braqué en avant de l'oiseau et sur le prolongement de l'axe du vol; il occuperait donc l'une des extrémités de la tranchée, tandis qu'à l'autre extrémité un hangar profond et noirci intérieurement constituerait le troisième champ obscur. Ce hangar serait donc orienté à angle droit avec celui qui a servi aux précédentes expériences.

» Mais, comme les frais considérables qu'exigerait une telle installation excèdent les ressources dont je dispose, j'ai dû opérer dans des conditions plus simples, mais nécessairement imparfaites. Voici ce que j'ai fait.

» Ne possédant pour le moment qu'un seul appareil photochronographique, j'ai procédé par expériences successives.

» On prit d'abord une série d'images de l'oiseau vu dans le sens transversal, c'est-à-dire dans les conditions déjà connues, et cela donna la *fig. 5*.

» On prit ensuite l'oiseau et on le porta au fond du hangar obscur, d'où on le laissa s'envoler. Dès que le goéland émergea dans la lumière, on en prit une série d'images dans lesquelles l'oiseau était vu par devant. Et comme le goéland, suivant son caprice, volait plus ou moins directement dans la direction de l'appareil photographique, on obtint des séries d'images (*fig. 6*) prises sous des incidences variées et dont la comparaison est fort utile pour la détermination des mouvements de l'aile.

» Si les photographies sont prises quand l'oiseau vole directement du côté de l'appareil photographique, on risque beaucoup de voir les images

de l'oiseau pendant que celui-ci vole sur un champ obscur.

(9)

se confondre par superposition, à moins qu'elles ne soient prises en petit nombre; aussi la direction oblique du vol est-elle préférable.

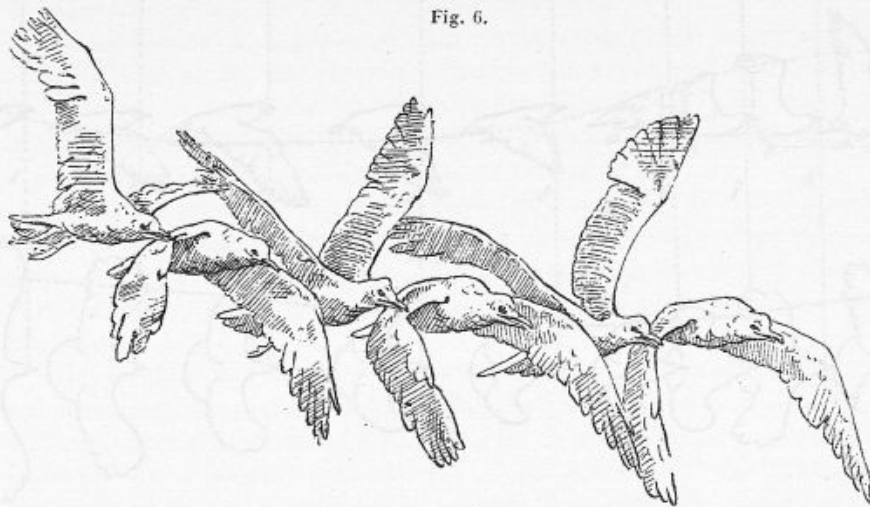
Fig. 5.



Vol du goéland projeté sur un plan vertical parallèle à l'axe du vol. Cinquante images par seconde; durée de la pose, $\frac{1}{2000}$ de seconde.

» L'expérience représentée *fig. 7* donne des images assez nombreuses

Fig. 6.



Goéland volant obliquement dans la direction de l'observateur. Dix images par seconde; pose, $\frac{1}{2000}$ de seconde.

sur lesquelles on a figuré, en lignes ponctuées, les contours que la superposition tendrait à rendre invisibles (1).

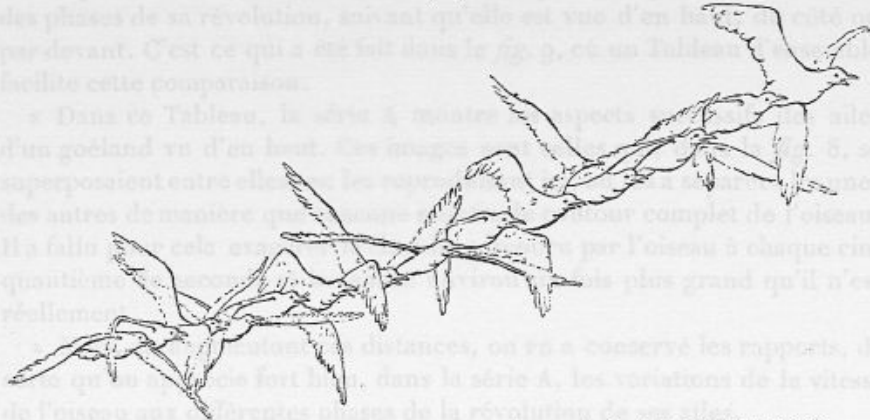
(1) Les figures photochronographiques ont une sorte de transparence qui permet d'apprécier les contours complets de deux images superposées; cela tient à ce que les points où la superposition s'est produite ont reçu deux fois plus de lumière que les autres: les images y présentent donc une intensité plus grande.

M.

(10)

Restait à réaliser la troisième expérience, qui consiste à établir l'ap-

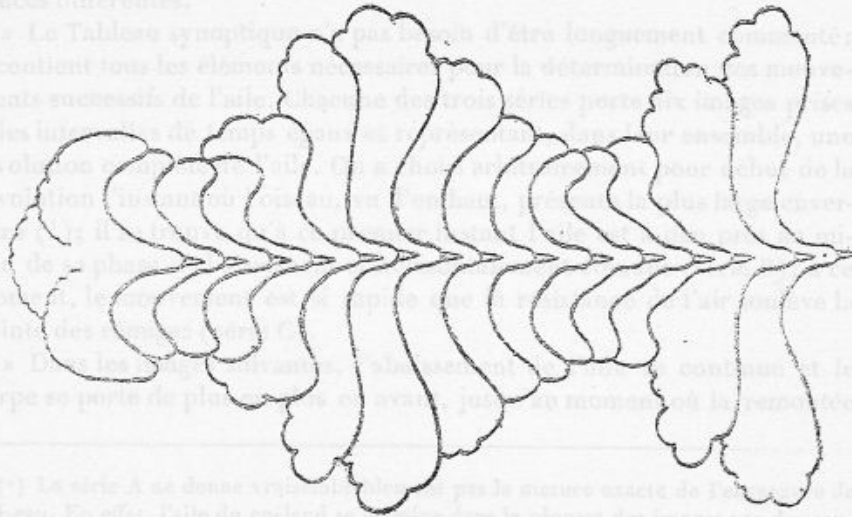
Fig. 7.



Goéland volant obliquement dans la direction de l'appareil, vingt images par seconde.

pareil photochronographique en un lieu élevé situé verticalement au-dessus

Fig. 8.



Déplacements de l'aile du goéland projetés sur un plan horizontal. Cinquante images par seconde : durée de pose, $\frac{1}{5000}$ de seconde. (J'ai simplement décalqué le contour apparent de l'aile et les positions de la tête de l'oiseau : les autres détails eussent été inintelligibles dans un dessin au trait.)

le l'oiseau pendant que celui-ci volerait sur un champ obscur.

(11)

» Quatre hautes poutres de sapin profondément fichées en terre et solidement assemblées entre elles me donnèrent une charpente pyramidale de 1,4^m de hauteur, praticable intérieurement au moyen d'échelles. Puis, sur d'autres poutres obliques, j'établis un plancher horizontalement suspendu à 1,2^m au-dessus du sol; on y installa l'appareil photographique avec l'objectif tourné en bas.

Fig. 9.

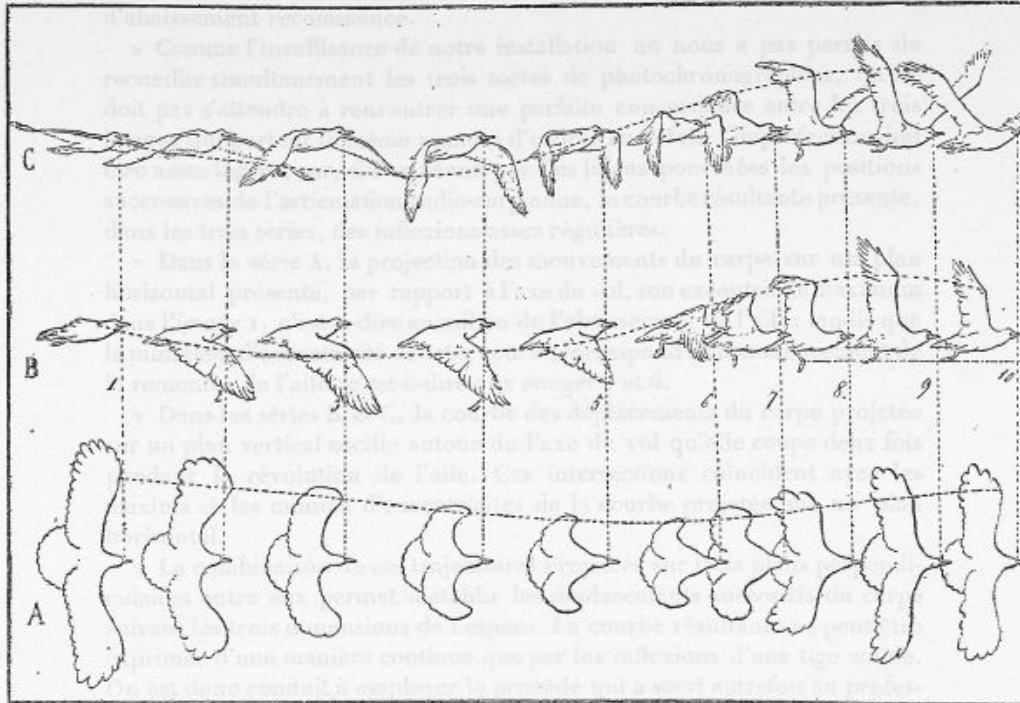


Tableau synoptique des projections de l'aile sur trois plans différents à dix instants successifs d'une révolution.

» Enfin, pour former en dessous un fond obscur, j'étendis sur le sol une bande de velours noir de 11^m de long et de 2^m, 5 de large, sur laquelle des écrans opaques projetaient leurs ombres. J'obtins ainsi un champ obscur, bien imparfait sans doute, mais à peu près suffisant pour donner des images lisibles.

» Pour tirer de ces trois séries de figures les renseignements qu'elles

renferment relativement aux mouvements de l'aile, il faut, sur chacune d'elles, noter les instants synchrones pour que l'œil puisse suivre aisément et comparer entre eux les différents aspects que l'aile présente à chacune des phases de sa révolution, suivant qu'elle est vue d'en haut, de côté ou par devant. C'est ce qui a été fait dans la *fig. 9*, où un Tableau d'ensemble facilite cette comparaison.

» Dans ce Tableau, la série A montre les aspects successifs des ailes d'un goéland vu d'en haut. Ces images sont celles qui, dans la *fig. 8*, se superposaient entre elles; en les reproduisant ici, on les a séparées les unes des autres de manière que chacune montre le contour complet de l'oiseau. Il a fallu pour cela exagérer le chemin parcouru par l'oiseau à chaque cinquantième de seconde et le rendre environ six fois plus grand qu'il n'est réellement.

» Mais, en augmentant ces distances, on en a conservé les rapports, de sorte qu'on apprécie fort bien, dans la série A, les variations de la vitesse de l'oiseau aux différentes phases de la révolution de ses ailes.

» Des lignes ponctuées réunissent les images correspondantes des séries A, B et C, de manière à guider l'œil dans la comparaison des aspects que l'aile présente, quand on la voit, à un même instant, sous trois incidences différentes.

» Le Tableau synoptique n'a pas besoin d'être longuement commenté; il contient tous les éléments nécessaires pour la détermination des mouvements successifs de l'aile. Chacune des trois séries porte dix images prises à des intervalles de temps égaux et représentant, dans leur ensemble, une révolution complète de l'aile. On a choisi arbitrairement pour début de la révolution l'instant où l'oiseau, vu d'en haut, présente la plus large envergure ⁽¹⁾; il se trouve qu'à ce premier instant l'aile est à peu près au milieu de sa phase d'abaissement et horizontalement étendue (série B); à ce moment, le mouvement est si rapide que la résistance de l'air soulève la pointe des rémiges (série C).

» Dans les images suivantes, l'abaissement de l'aile se continue et le carpe se porte de plus en plus en avant, jusqu'au moment où la remontée

⁽¹⁾ La série A ne donne vraisemblablement pas la mesure exacte de l'envergure de l'oiseau. En effet, l'aile du goéland se termine dans la plupart des images par des contours arrondis qui appartiennent à des plumes tectrices et non aux rémiges dont la pointe est effilée. Mais l'oiseau qui a servi dans cette expérience avait les rémiges d'une couleur un peu foncée; ces plumes n'ont pas donné leur image sur le fond imparfaitement obscur dont j'ai dû me contenter.

commence (*image 4*); le carpe se fléchit alors et les rémiges pendent verticalement. La flexion du coude qui s'opère en même temps diminue encore l'envergure de l'oiseau, de sorte que les ailes se serrent contre le corps pendant les premiers temps de leur remontée jusqu'à la sixième image. A partir de cet instant, le déploiement de l'aile commence; le carpe et le coude s'étendent à la fois, par le mécanisme admirable si bien décrit par Borelli. A la neuvième image, l'aile est complètement déployée, et la phase d'abaissement recommence.

» Comme l'insuffisance de notre installation ne nous a pas permis de recueillir simultanément les trois sortes de photochronographies, on ne doit pas s'attendre à rencontrer une parfaite concordance entre les trois images qui portent le même numéro d'ordre. Toutefois, l'imperfection doit être assez légère; car, si l'on réunit par des lignes ponctuées les positions successives de l'articulation radio-carpienne, la courbe résultante présente, dans les trois séries, des inflexions assez régulières.

» Dans la série A, la projection des mouvements du carpe sur un plan horizontal présente, par rapport à l'axe du vol, son excentricité maximum dans l'*image 1*, c'est-à-dire au milieu de l'abaissement de l'aile; tandis que le minimum d'excentricité de cette courbe correspond au commencement de la remontée de l'aile, c'est-à-dire aux *images 5* et *6*.

» Dans les séries B et C, la courbe des déplacements du carpe projetée sur un plan vertical oscille autour de l'axe du vol qu'elle coupe deux fois pendant la révolution de l'aile. Ces intersections coïncident avec les maxima et les minima d'excentricités de la courbe projetée sur un plan horizontal.

» La combinaison de ces trajectoires projetées sur trois plans perpendiculaires entre eux permet d'établir les déplacements successifs du carpe suivant les trois dimensions de l'espace. La courbe résultante ne peut être exprimée d'une manière continue que par les inflexions d'une tige solide. On est donc conduit à employer le procédé qui a servi autrefois au professeur Carlet quand il a représenté, au moyen de fils de métal tordus en sens divers, les trajectoires du pubis et des grands trochanters d'un homme qui marche.

» La même nécessité s'imposerait, du reste, pour tous les points de l'aile de l'oiseau dont on voudrait déterminer la trajectoire dans l'espace; il s'ensuit que l'expression complète des mouvements du vol ne peut être donnée que par une figure solide.

» J'essaye en ce moment de modeler une série de maquettes d'oiseaux

(14)

présentant les dix attitudes successives du *Tableau 5* ; puis, j'ajusterai entre elles ces figurines, de façon qu'elles s'entre-pénètrent pour occuper les positions relatives qu'elles doivent prendre à des intervalles de temps de $\frac{1}{50}$ de seconde. De cette façon, j'espère obtenir la représentation parfaite des mouvements de l'aile et, en général, toutes les notions relatives à la cinématique du vol. »

Figures en relief, représentant les attitudes successives d'un goéland pendant une révolution de ses ailes.

(Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CIV; séance du 21 mars 1887.)

» D'après les images photographiques recueillies sous différentes incidences ⁽¹⁾, j'ai modelé une série de figures en relief qui permettent d'apprécier dans leur ensemble les déplacements de chacun des points du corps de l'oiseau à des instants successifs d'une révolution de ses ailes. Et, comme l'antique industrie de la fonte à *cire perdue* s'est conservée à Naples, j'ai fait couler en bronze cette série de maquettes que j'adresse à l'Académie.

» Les dix figures, disposées en série, montrent les attitudes successives que prend l'oiseau à des intervalles de temps de $\frac{1}{30}$ de seconde ⁽²⁾; la durée de chacune de ces attitudes serait celle de l'éclaircissement qui a donné les images photographiques, c'est-à-dire 0,0005 de seconde.

» Dans leur ensemble, ces figures forment un cycle complet embrassant une révolution entière des ailes, depuis le moment où, complètement étendues et élevées à leur maximum (*fig. 1*), elles s'appêtent à s'abaisser, jusqu'à celui où elles achèvent leur remontée (*fig. 10*) et vont s'étendre complètement. On pourra disposer circulairement ces images, de manière à obtenir la reproduction du mouvement dans les conditions du zootrope.

⁽¹⁾ Voir les Notes du 24 janvier et du 7 février 1887.

⁽²⁾ Ces images en relief représentent, quand on les voit de côté, l'apparence représentée ci-dessus (*fig. 2*, p. 2).

» L'intervalle qui sépare deux attitudes successives est huit fois plus grand que dans la réalité; sans cela les figures se seraient confondues entre elles, car l'oiseau ne parcourt pas en $\frac{1}{50}$ de seconde une longueur égale à celle de son corps. Mais, en augmentant les espaces parcourus par l'oiseau, on a conservé leurs valeurs relatives afin de rendre sensibles l'accroissement de la vitesse de l'oiseau pendant l'abaissement de ses ailes et son ralentissement pendant leur élévation.

» Si l'on tend un fil horizontalement au-dessus des corps des oiseaux, on voit que le dos s'élève quand les ailes s'abaissent, et réciproquement.

» L'aile qui s'abaisse se porte en avant; elle étreint pour ainsi dire l'air le long des flancs et sous le corps de l'oiseau. Pendant toute cette phase, l'aile est déployée, c'est-à-dire que les articulations du coude et du carpe sont ouvertes. A la septième image, la flexion du coude et celle du carpe se produisent solidairement; l'aile remonte fléchie et les rémiges pendent presque verticalement. Le déploiement de l'aile s'effectue à la dixième image, c'est-à-dire à la fin de la remontée.

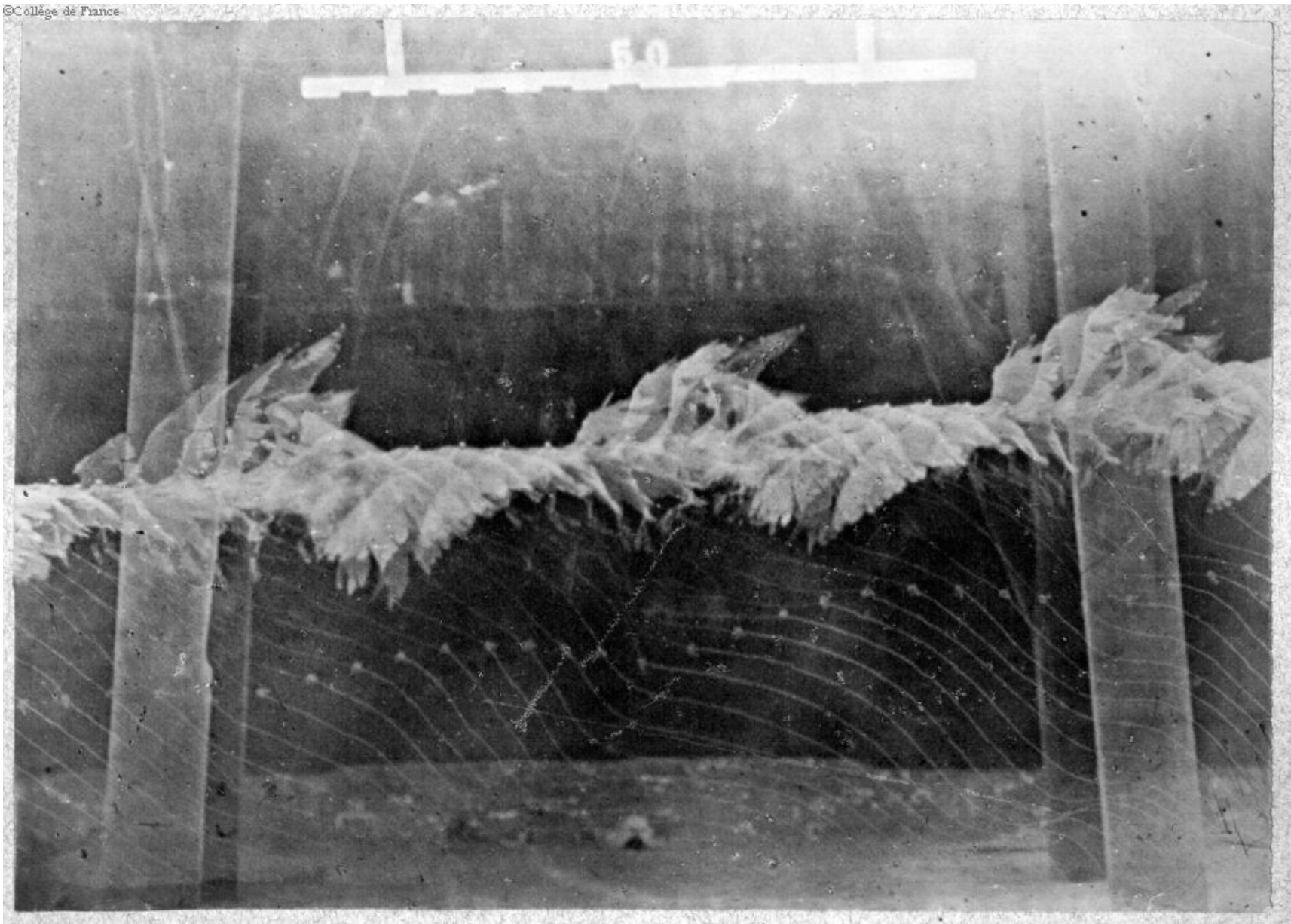
» Il ne faut pas chercher dans ces figures une fidélité parfaite au point de vue anatomique (¹), mais seulement la vérité des attitudes, la vitesse angulaire de l'aile, ses changements d'inclinaison, ses torsions sous l'influence de la résistance de l'air. Tous ces éléments seront indispensables pour calculer le travail que l'oiseau exécute en volant.

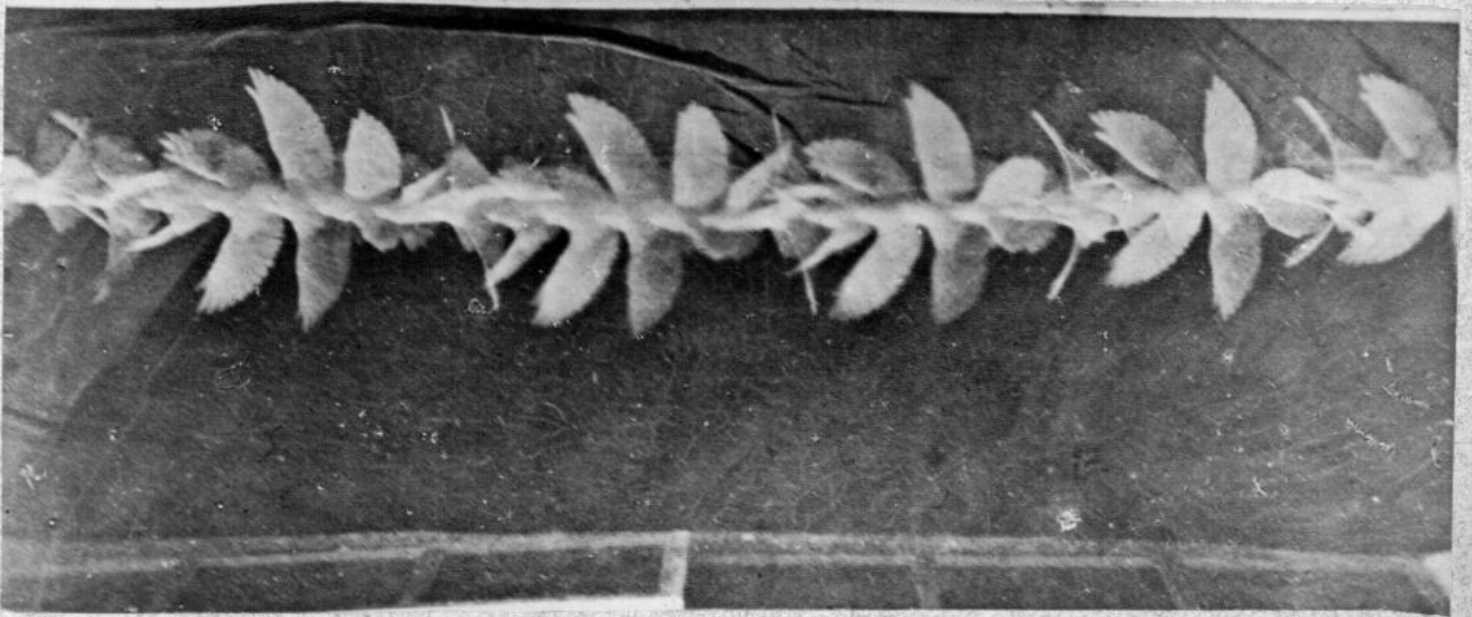
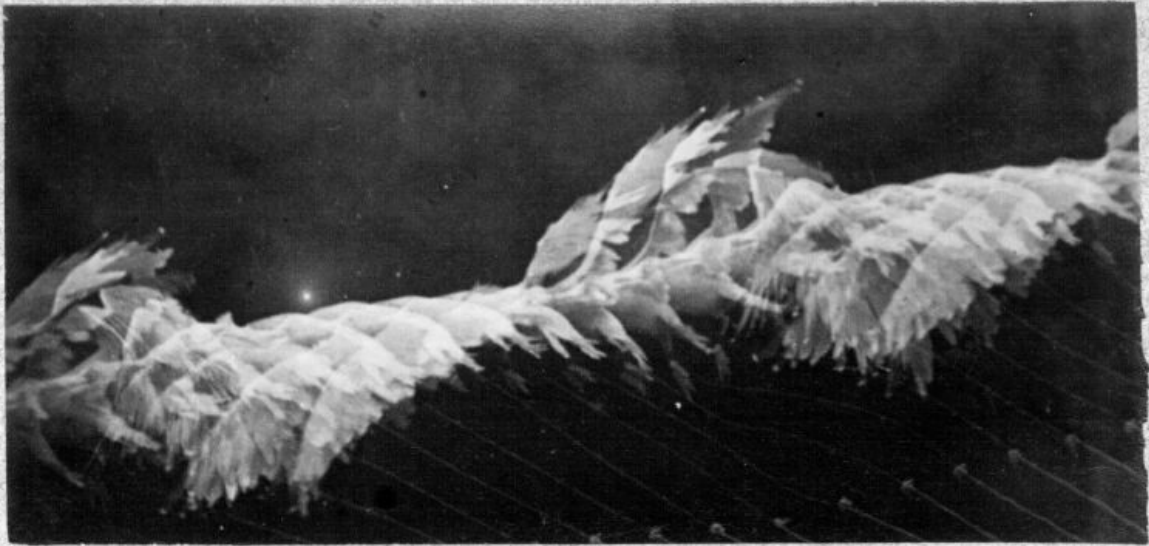
» Mais, avant d'aborder cette étude, je prépare d'autres documents relatifs à la cinématique du vol. J'achève d'après le pigeon une série d'images dont la comparaison avec celles du goéland montrera les différences notables que présentent les mouvements du vol suivant la forme et l'étendue des ailes. »

(¹) Les photographies qui m'ont servi de modèle étaient incomplètes sur certains points. Ainsi, les pattes étaient invisibles dans les *fig.* 4, 5 et 6 : je les ai placées arbitrairement dans des attitudes intermédiaires entre l'allongement en arrière et la position pendante, qui s'observent, l'une dans l'abaissement, l'autre dans l'élévation des ailes.

La queue n'était visible que dans les images de profil; on n'a pu représenter que ses alternatives d'élévation et d'abaissement, sans tenir compte des élargissements ou des resserrements qui existent à coup sûr.

Enfin le bec du goéland, par sa couleur peu photogénique, n'était pas distinct dans les images photographiques : je lui ai donné des dimensions exagérées, me proposant de le réduire ultérieurement avec la lime et de lui donner, d'après nature, sa forme véritable.





INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CIV;
séance du 13 juin 1887.

Figures en relief représentant les attitudes successives d'un pigeon pendant le vol;

PAR M. MAREY.

« J'ai montré à l'Académie une série de figures de bronze exprimant les attitudes successives des ailes d'un goéland qui vole (1). Aujourd'hui c'est le vol du pigeon que j'ai représenté de la même manière. Les attitudes successives sont au nombre de onze; elles sont prises à des phases équidistantes d'une révolution de l'aile.

» En disposant ces figures sur un zootrope (instrument dérivé du phénakistiscope de Plateau), on reproduit l'apparence d'un oiseau qui vole. Le grand nombre des images et la rotation lente de l'instrument donnent aux mouvements apparents une telle lenteur que l'œil les suit aisément dans toutes leurs phases. Les figurines de bronze ont été peintes en blanc; des teintes appropriées ont été données au bec, aux pattes et aux yeux, pour compléter l'illusion. Enfin, le relief des images donne aux attitudes

(1) Note du 21 mars 1887.

(2)

une grande variété, car, suivant que l'on observe telle ou telle région du cercle parcouru, l'oiseau est vu d'arrière, de travers ou d'avant.

» Ces études synthétiques n'ont pas été entreprises pour restituer simplement aux yeux la sensation qu'ils éprouvent en présence d'un oiseau qui vole. C'est, au contraire, parce que ces sensations étaient trop confuses que j'ai voulu les rendre nettes et intelligibles, en ralentissant autant qu'il serait nécessaire les mouvements des ailes de l'oiseau.

» Dans la disposition présente, les onze attitudes se succèdent à des intervalles qui, dans le vol du pigeon, correspondent chacun à $\frac{1}{100}$ de seconde. Il faudrait que le zootrope fit neuf tours par seconde pour rendre aux yeux la véritable apparence du vol du pigeon avec la confusion qui le rend inobservable.

» En n'imprimant au zootrope qu'un tour par seconde, le mouvement est neuf fois plus lent et déjà assez facile à observer. Avec une vitesse d'un demi-tour seulement, on suit avec facilité toutes les phases du mouvement des ailes. Il est vrai que cette extrême lenteur fait disparaître la continuité des impressions rétiniennes et que l'illusion cesse. Mais la nature et le sens des mouvements de l'aile ne s'apprécient pas moins bien pour cela.

» Du reste, si l'on voulait rendre aux yeux l'illusion disparue, il faudrait doubler le nombre des images. On a vu que la méthode stroboscopique (1) permet de multiplier indéfiniment les attitudes représentées.

» La meilleure manière de comparer les différents types du vol sera d'examiner simultanément au zootrope des images d'oiseaux différents. Cette comparaison, que je puis déjà faire sur deux espèces, le goéland et le pigeon, montre que derrière les dissemblances apparentes se trouvent de profondes analogies. Il sera intéressant d'étudier ainsi un plus grand nombre d'espèces.

» Mais comme on ne peut opérer que sur des oiseaux à plumage blanc ou de nuances très pâles et que ces espèces sont rares, il est difficile de multiplier beaucoup ces études de Physiologie comparée. Grâce à l'extrême obligeance de mes amis MM. Milne-Edwards et Geoffroy Saint-Hilaire, qui ont mis à ma disposition des oiseaux du Muséum et du Jardin d'acclimatation, j'espère élargir le champ de ces recherches. »

(1) Note du 14 mai 1883.

*La Photochronographie appliquée au problème dynamique
du vol des oiseaux.*

(Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CV;
séance du 5 septembre 1887.)

« J'ai montré précédemment que la cinématique du vol était complètement éclairée par la Photochronographie. Sur des séries de figures en relief, représentant les attitudes du goéland et du pigeon à des instants successifs de la révolution de leurs ailes, on a vu comment s'enchaînent entre eux les mouvements d'élévation et d'abaissement de ces membres, leurs alternatives d'extension et de flexion, les changements d'inclinaison des rémiges, enfin les déplacements des pattes et de la queue.

» Ces figures en relief, disposées dans un zootrope, reproduisent les mouvements de l'oiseau qui vole, avec une lenteur qui permet d'en saisir facilement les phases. Grâce au relief des images, l'illusion est absolue et l'on peut voir, suivant qu'on observe tel ou tel point de son parcours, l'oiseau voler en s'éloignant de l'observateur, passer transversalement, ou revenir sur lui.

» J'ai pu étendre à un assez grand nombre d'espèces d'oiseaux l'analyse des mouvements et constater, à travers certaines dissemblances superficielles, la similitude des actes essentiels du vol.

» Je vais montrer aujourd'hui que la Photochronographie contient les éléments nécessaires pour résoudre le problème dynamique du vol, c'est-à-dire pour mesurer les forces musculaires de l'oiseau et le travail qu'il produit.

(4)

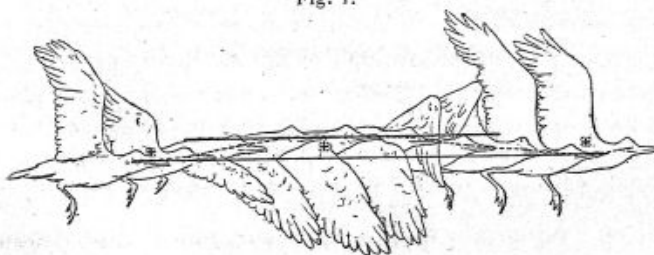
» Il n'est pas besoin de rappeler les erreurs auxquelles de grands mathématiciens ont été conduits pour avoir basé leurs calculs sur des données inexactes. La cause de ces erreurs résidait tout entière dans l'impossibilité où l'on était autrefois de déterminer exactement les mouvements de l'oiseau.

» En Mécanique, si l'on connaît la masse d'un corps et les mouvements dont elle est animée, on en déduit la valeur des forces qui agissent pour produire ces mouvements. Sur les photochronographies d'un oiseau qui vole, nous pouvons mesurer tous les déplacements de la masse de son corps et la vitesse de ces mouvements. D'autre part, nous connaissons l'une des forces auxquelles est soumise la masse de l'oiseau, la pesanteur; nous pouvons mesurer expérimentalement une autre de ces forces, la résistance de l'air; l'inconnue à dégager sera donc la force musculaire de l'oiseau, avec son moment d'action et la valeur de ses deux composantes, dont l'une, verticale, agit contre la pesanteur, tandis que l'autre, dirigée horizontalement, surmonte la résistance d'inertie de la masse de l'oiseau et la résistance que l'air oppose à sa translation.

» Nous mesurerons successivement les déplacements de l'oiseau suivant ces deux composantes verticale et horizontale.

» A. *Mouvements de la masse de l'oiseau projetés sur un axe vertical.* — L'observation du vol a fait, depuis longtemps, constater que le corps de l'oiseau s'élève quand les ailes s'abaissent, et réciproquement. Dugès avait

Fig. 1.



Attitudes successives d'un goéland pendant une révolution de ses ailes. La courbe ponctuée exprime les oscillations de l'œil de l'oiseau. Les deux lignes pleines horizontales mesurent par leur écartement l'amplitude de ces oscillations. Les trois croix indiquent les hauteurs où se trouve le centre de gravité du corps pendant les maxima et minima de son oscillation apparente.

beaucoup exagéré l'étendue de ces oscillations, dont la valeur véritable est donnée par l'expérience suivante :

» Prenons une série d'images photochronographiques d'un goéland qui vole dans un plan horizontal (*fig. 1*); puis, en projetant cette figure

sur un écran, agrandissons-la jusqu'à ses dimensions réelles, de telle sorte que chaque image ait les dimensions véritables de l'oiseau et que la distance qui sépare deux images consécutives corresponde exactement à l'espace parcouru entre deux éclaircissements successifs, c'est-à-dire en $\frac{1}{50}$ de seconde.

» Sur la figure ainsi agrandie, cherchons un point du corps de l'oiseau qui soit visible dans chacune des images, l'œil par exemple, et traçons la courbe ponctuée qui passerait par la série des yeux.

» Menons une droite tangente à deux minima consécutifs de la trajectoire onduleuse de l'œil et, parallèlement à cette ligne, une autre droite tangente au maximum de cette trajectoire : l'écartement de ces parallèles mesurera l'amplitude d'une oscillation verticale du corps de l'oiseau. Dans le cas présent, cet écartement mesurait $0^m,045$.

» Ces oscillations ne sont qu'apparentes, ou du moins n'affectent pas le centre de gravité du corps, point qui doit seul être considéré dans la mesure des déplacements de la masse de l'oiseau.

» En effet, selon que les ailes se portent en haut ou en bas, le centre de gravité s'élève ou s'abaisse dans le corps de l'oiseau. Or, si l'on retranche de l'oscillation apparente de l'oiseau ce qui correspond au déplacement du centre de gravité dans son corps, l'oscillation réelle n'est guère que de $0^m,01$, valeur négligeable, d'autant plus qu'elle peut tenir à l'imperfection des moyens de déterminer le centre de gravité dans les différentes attitudes des ailes (1).

(1) Pour déterminer le changement de hauteur du centre de gravité du corps de l'oiseau dans les attitudes extrêmes d'élévation et d'abaissement de l'aile, attitudes qui correspondent précisément aux changements de sens de la trajectoire, nous avons recouru à la méthode de Borelli, méthode que M. Demeny a employée dernièrement pour déterminer la position du centre de gravité du corps de l'homme dans les différentes attitudes de la course ou du saut.

Prenons un goéland mort et lions ses ailes l'une à l'autre en les plaçant dans l'attitude d'élévation; puis couchons l'oiseau sur le flanc, au-dessus de la planchette à bascule. D'après la position d'équilibre de l'oiseau, nous pouvons estimer assez exactement la hauteur du centre de gravité de son corps, et nous l'avons marquée dans la *fig. 1* par des signes formés d'une croix contenue dans un cercle. Nous avons déterminé de la même façon la position du centre de gravité pendant l'abaissement des ailes et l'avons marquée dans la figure par le même signe. On voit que ces trois signes sont presque en ligne droite; leurs écarts par rapport à une ligne horizontale étaient à peine de $0^m,01$, sur la *fig. 1* grandie vingt fois, c'est-à-dire ramenée aux dimensions réelles de l'oiseau et de ses déplacements pendant le vol.

(6)

» On peut donc considérer la masse de l'oiseau comme suivant une trajectoire rectiligne (1).

» B. *Mouvements de la masse de l'oiseau projetés sur un axe horizontal.* — Si, de l'œil de chacune des images de l'oiseau, nous abaïssons des perpendiculaires sur une droite horizontale, nous divisons cette droite en une série de longueurs exprimant chacune le chemin parcouru par l'oiseau dans $\frac{1}{50}$ de seconde. Sur les projections agrandies à la dimension réelle, on mesure directement ce chemin et l'on trouve que l'oiseau parcourait horizontalement 1^m,262 à chaque révolution de ses ailes. Or, comme il donnait cinq coups d'aile par seconde, sa vitesse moyenne de translation horizontale était de 6^m,310 par seconde.

» Enfin, la série des espaces parcourus à chaque cinquantième de seconde, aux différentes phases de l'élévation et de l'abaissement de l'aile dans une même révolution, a donné les valeurs suivantes :

Phase d'élévation de l'aile.

	Espace parcouru. ^m	Vitesse à la seconde. ^m
Premier cinquantième de seconde..	0,137	6,850
Deuxième » ..	0,128	6,400
Troisième » ..	0,123	6,150
Quatrième » ..	0,118	5,900
Cinquième » ..	0,115	5,750
Espace total parcouru dans une élé- vation de l'aile.....	0,621	Vitesse moyenne à la seconde.. 6,210

Phase d'abaissement de l'aile.

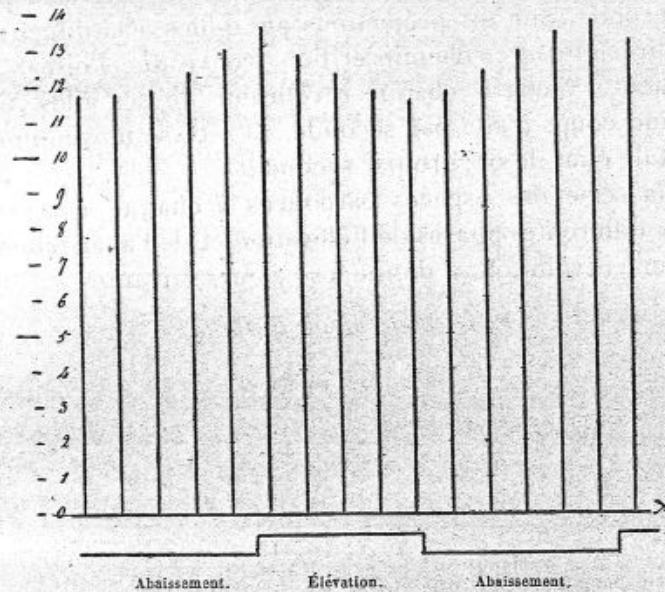
	Espace parcouru. ^m	Vitesse à la seconde. ^m
Premier cinquantième de seconde..	0,118	5,900
Deuxième » ..	0,124	6,200
Troisième » ..	0,129	6,450
Quatrième » ..	0,134	6,700
Cinquième » ..	0,136	6,800
Espace total parcouru dans l'abaisse- ment de l'aile.....	0,641	Vitesse moyenne à la seconde.. 6,410

(1) Il faut excepter, bien entendu, certains types d'oiseaux à vol sautillant, comme la grive, le pivert, etc. Le vol, dans ces espèces, s'accompagne d'intermittences dans l'action des ailes; nous ne considérons ici que le cas des oiseaux rameurs à vol soutenu et régulier.

(7)

» Si l'on élève sur la ligne OX (*fig. 2*) une série d'ordonnées ayant chacune pour longueur le chemin parcouru par l'oiseau, suivant une direction horizontale, dans l'un des cinquantièmes de seconde successifs, on obtient la courbe des vitesses représentée à demi-grandeur (1).

Fig. 2.



Courbe des vitesses de translation de l'oiseau. Chacune des ordonnées a pour longueur le chemin, mesuré en centimètres, que l'œil de l'oiseau a parcouru horizontalement pendant $\frac{1}{50}$ de seconde. Les périodes d'élévation et d'abaissement de l'aile durent chacune environ $\frac{1}{10}$ de seconde.

» La ligne sinueuse située au bas de la figure exprime, par ses élévations et ses abaissements, les durées relatives des périodes d'élévation et d'abaissement de l'aile.

» Telles sont les données sur lesquelles nous essayerons de baser le calcul des forces et du travail de l'oiseau. »

(1) Comme l'aile qui s'abaisse se porte un peu en avant et l'aile qui monte un peu en arrière, il en résulte de légers déplacements du centre de gravité de l'oiseau suivant l'axe de son corps. Ces déplacements, dont la valeur est d'environ 15^{mm} dans le vol du goéland, ont pour effet d'atténuer un peu l'inégalité apparente de sa vitesse de translation; on doit en tenir compte dans l'évaluation des vitesses à chaque instant. Il faudra donc accroître de 15^{mm} la différence entre les espaces parcourus à chaque abaissement de l'aile, c'est-à-dire en $\frac{1}{10}$ de seconde, ce qui portera la variation de vitesse à $0^{\text{m}}, 360$ par seconde.

De la mesure des forces qui agissent dans le vol de l'oiseau.

(Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CV;
séance du 26 septembre 1887.)



« L'Anatomie de l'oiseau montre que presque toutes les masses musculaires qui agissent sur l'aile servent à enproduire l'abaissement. D'autre part, les données cinématiques tirées de la photochronographie font voir que, pendant l'abaissement de l'aile, la masse de l'oiseau est soutenue contre la pesanteur et poussée en avant malgré la résistance de l'air. Enfin, d'après l'angle que fait le plan de l'aile remontante avec la direction de son mouvement de translation, il est évident que l'air ne peut agir que sous sa face inférieure, de manière à soutenir le poids de l'oiseau à la façon d'un cerf-volant, en lui faisant perdre une partie de la vitesse acquise pendant l'abaissement de l'aile (1).

Des deux composantes de la force motrice dans le vol.

» L'abaissement de l'aile ayant ce double effet, de soutenir l'oiseau contre la pesanteur et de le propulser horizontalement en surmontant la

(1) Tout prouve que l'aile, pendant sa remontée, est incapable de frapper l'air d'une manière utile à la propulsion. L'imbrication des plumes n'est disposée que pour résister à la pression de l'air agissant à leur face inférieure. En outre, les photographies instantanées montrent clairement que pendant la remontée de l'aile ses plumes s'écartent les unes des autres; elles laisseraient donc passer l'air, qui les rencontrerait par en haut.

résistance de l'air, nous devons étudier séparément les deux composantes, d'où se déduira ultérieurement la valeur totale de la force motrice.

» A. *Composante verticale*. — Nos expériences ont montré ⁽¹⁾ que le centre de gravité de l'oiseau se meut sensiblement sur une ligne horizontale; on est donc en droit de conclure que la pression de l'air sous la face inférieure des ailes qui s'abaissent est précisément égale au poids de l'oiseau, quand le vol ne s'accompagne d'aucun changement de hauteur. Dans le vol de notre goéland, la composante verticale F sera de 0^{kg},623 ⁽²⁾.

» Cette proposition est évidente *a priori*: nous l'avons toutefois démontrée expérimentalement au moyen d'un appareil qui imite grossièrement le battement de l'aile d'un oiseau, réduit à sa phase d'abaissement ⁽³⁾.

⁽¹⁾ Voir la Note du 5 septembre 1887.

⁽²⁾ Si l'on admet la réalité de l'oscillation verticale du centre de gravité dont l'amplitude est de 0^m,01 à chaque abaissement de l'aile, c'est-à-dire en $\frac{1}{10}$ de seconde, il faut admettre pour la composante verticale une valeur plus grande. Comme sous l'action de la pesanteur l'oiseau tomberait de 0^m,05 environ en $\frac{1}{10}$ de seconde, la force qui le fait monter de 0^m,01 est cinq fois moindre que le poids de l'oiseau. La valeur totale de la composante verticale des muscles sera $\frac{5}{6}$ du poids du corps, ou 0^{kg},747.

⁽³⁾ L'appareil se compose de deux ailes légères en forme de triangles allongés dont les bases sont articulées par deux charnières sur un bâti auquel on donne un poids variable en le chargeant plus ou moins de grenaille de plomb.

Un ressort de caoutchouc agit sur les deux ailes pour en produire l'abaissement. Quand on relève celles-ci, le ressort se bande et l'on peut maintenir l'appareil dans cette position au moyen d'un fil tendu entre deux crochets placés à la face dorsale des ailes. Dès qu'on brûle le fil, le ressort se détend en abaissant brusquement les ailes et en soulevant tout l'appareil si le poids total de celui-ci n'est pas trop grand.

En ajoutant des charges successives de grenaille de plomb, on voit le soulèvement diminuer graduellement, et disparaître tout à fait pour une certaine charge. A cet instant, la pression de l'air sous les ailes qui s'abaissent ne fait plus que soutenir l'appareil; elle doit donc être précisément égale à son poids. De son côté, le moment de la force du ressort est égal à celui des pressions que l'air exerce sur la face inférieure des ailes; pour déterminer ce dernier, il faut chercher quel est le *centre d'action* de l'aile, c'est-à-dire le point auquel s'appliquerait la résultante de toutes les pressions que l'air exerce au-dessous de sa surface en mouvement.

Si l'on admet, ce qui est sensiblement exact, que la résistance de l'air contre une surface en mouvement est proportionnelle au carré de la vitesse, on conçoit que, dans son déplacement angulaire, l'aile éprouve peu de pression sur les éléments de sa surface voisins de la charnière, tandis que la pression est très grande près de son extrémité, dont le mouvement est très rapide. D'autre part, si l'on tient compte de la forme triangulaire de l'aile, on voit que sa surface diminue de plus en plus à mesure qu'on s'approche de la pointe. Pour une aile de forme triangulaire, le centre de pression se

» B. *Composante horizontale.* — Si l'oiseau se transportait d'un mouvement uniforme dans un plan horizontal, la force capable de produire ce mouvement n'aurait à surmonter que la résistance de l'air à laquelle elle serait constamment égale et contraire. Mais on a vu sur les photochronographies que la vitesse de l'oiseau varie aux différentes phases d'une révolution de l'aile; qu'elle croît dans la phase d'abaissement et décroît dans celle d'élévation. Ainsi, indépendamment de la force nécessaire à surmonter la résistance de l'air, l'oiseau développe dans l'abaissement de son aile, c'est-à-dire en $\frac{1}{10}$ de seconde, une force capable d'imprimer à sa masse une certaine accélération. Or, comme les forces se mesurent par l'accélération qu'elles produisent, nous pouvons écrire la proportion suivante :

$$F' : a :: P : g',$$

dans laquelle F' représente la composante horizontale qu'il s'agit de mesurer, a l'accélération qu'elle produit, $0^m,035$ en $\frac{1}{10}$ de seconde, P la force de la pesanteur appliquée à l'oiseau, ou son poids $0^{kg},623$, g' l'accélération imprimée par la pesanteur en $\frac{1}{10}$ de seconde ou $0^m,05$, d'où

$$F' = \frac{0,035 \times 0,623}{0,05} = 0^{kg},449.$$

trouve sur la perpendiculaire abaissée de la pointe sur sa base et aux $\frac{2}{3}$ de la longueur de cette ligne, en comptant à partir de la base. Marquons d'un signe visible la position du centre de pression sous chacune des ailes.

D'après ce qu'on a vu plus haut, le moment de la résistance de l'air sera pour chaque aile la moitié du poids de l'oiseau multipliée par les $\frac{2}{3}$ de la longueur de l'aile. Or, pendant la détente d'un ressort, la force de celui-ci est continuellement égale à la résistance qui lui est opposée (nous ne tenons pas compte de l'inertie des ailes qui sont très légères et dont les mouvements ne changent pas de sens d'une manière brusque). S'il est vrai que la résistance de l'air sous les ailes soit égale au poids de l'oiseau, on devra équilibrer la force du ressort en appliquant sous chacun des centres de pression une poussée ascendante égale à la moitié du poids de l'appareil. C'est ce que vérifie l'expérience. En effet, si l'on place deux supports fixes sous les deux centres de pression, l'appareil se soutient les ailes étendues, exerçant sur chacun des supports une pression égale à la moitié de son poids; la force élastique du ressort fait alors exactement équilibre à la pesanteur.

Cet équilibre n'existe que pour un poids déterminé de l'appareil; si on le charge trop, la force élastique du ressort est vaincue et le corps de la machine s'abaisse entre ses deux supports, tandis que les ailes se relèvent. Si l'appareil est trop peu chargé, le ressort est trop fort et la machine se soulève sur ses appuis fixes en abaissant ses ailes (Travaux de mon laboratoire, 1875. Paris, G. Masson).

» Ainsi, à chacun de ses abaissements, l'aile développe, suivant une direction horizontale, une force moyenne de $0^{\text{kg}},449$ qui imprime au corps de l'oiseau une certaine accélération.

» D'autre part, l'aile développe encore dans le même sens une certaine force pour surmonter la résistance de l'air. La valeur de cette résistance peut se déduire de ce fait, qu'elle neutralise entièrement, pendant la remontée de l'aile, l'accélération produite pendant la descente (1).

» On peut donc admettre que, pendant son abaissement, l'aile crée une force propulsive horizontale de $0^{\text{kg}},898$ dont 449^{gr} surmontent la résistance de l'air et 449^{gr} créent l'accélération que la photochronographie a révélée.

» Ainsi les deux composantes de la force qui meut l'oiseau pendant l'abaissement de son aile ont pour valeurs :

Composante verticale	$0^{\text{kg}},623$
Composante horizontale	$0^{\text{kg}},898$

» En construisant le parallélogramme des forces, la résultante obtenue est de $1^{\text{kg}},080$ environ à chaque abaissement d'aile, valeur qui correspond à la force totale qui soutient et propulse l'oiseau pendant l'abaissement des ailes.

De la force effectivement développée par les muscles de l'oiseau.

» Égalons le moment de la résistance de l'air à celui de la force musculaire de l'oiseau.

» La dissection montre que le tendon des muscles pectoraux est inséré à $0^{\text{m}},017$ du centre du mouvement de l'articulation; c'est par ce bras du levier qu'il faut multiplier la force musculaire pour avoir son moment d'action (2).

(1) Ceci n'a lieu que dans le plein vol où les variations de vitesse de l'oiseau oscillent autour d'une valeur moyenne. Dans l'essor, au contraire, les accélérations produites par l'abaissement de l'aile sont plus grandes que les ralentissements qui en accompagnent la relevée. Ces deux accélérations de signes contraires tendent à devenir égales et atteignent l'égalité quand la vitesse moyenne cesse de s'accroître.

(2) Comme l'attache du muscle se fait par un large tendon, nous avons pratiqué la section transversale de ce tendon et considéré comme point d'attache le lieu où se trouve, sur l'humérus, le centre de gravité de cette surface de section. Notons enfin que la légère obliquité des fibres musculaires, par rapport à la direction de l'humérus, rend le bras du levier de leur force un peu plus court encore que nous ne l'avons estimé.

» Le point d'application de la résistance de l'air est sensiblement situé aux $\frac{2}{3}$ de la longueur de l'aile, en comptant à partir de l'articulation. C'est ce point qu'on désigne sous le nom de *centre de pression de l'air* ou de *centre d'action de l'aile* pendant sa phase d'abaissement⁽¹⁾. Cette longueur correspondait sur notre goéland à 0^m,30. Il est probable que c'est par ce bras de levier que doivent se multiplier les deux composantes de la résistance de l'air dont la résultante est 1^{kg},080.

» On aura donc l'égalité suivante

$$1^{\text{kg}},080 \times 0^{\text{m}},30 = f \times 0,017;$$

d'où

$$f = 19^{\text{kg}},060.$$

De la force spécifique des muscles pectoraux du goéland.

» On appelle *force spécifique* d'un muscle, l'effort dont est capable un faisceau de ce muscle dont la section aurait l'unité de surface, le centimètre carré.

» En divisant l'effort total des pectoraux 19^{kg},060 par 11^{cc},40, surface de ces muscles perpendiculaires à la direction des fibres, on trouve, pour la force spécifique de ces muscles, 1^{kg},672⁽²⁾. »

(1) En raison de la forme de l'aile du goéland, qui n'est ni un triangle ni un rectangle, nous avons cru pouvoir placer le centre de pression, non pas aux $\frac{2}{3}$, ni aux $\frac{3}{4}$, mais aux $\frac{2}{3}$ de la longueur de l'aile.

(2) J'ai cherché autrefois à déterminer expérimentalement cette force spécifique, en électrisant les muscles d'un oiseau et en cherchant le poids maximum qui, fixé à l'extrémité de l'humérus, pût être soulevé par cet effort. J'avais ainsi obtenu, comme valeur de la force spécifique des muscles, 1200^{gr} pour la buse, et 1400^{gr} pour le pigeon. Mais ces efforts provoqués par des excitations artificielles ne pouvaient être considérés comme l'expression exacte de ceux qui se produisent dans les conditions physiologiques du vol (voir la *Machine animale*, p. 218).

Du travail mécanique dépensé par le goéland dans le vol horizontal.

(Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CV;
séance du 10 octobre 1887.)

« Connaissant la valeur des forces qui interviennent dans le vol de l'oiseau et le chemin parcouru par le point d'application de ces forces à chaque instant d'une révolution de l'aile, nous avons tous les éléments nécessaires pour calculer le travail dépensé dans le vol.

» Puisque le centre de gravité de l'oiseau se meut sensiblement sur une trajectoire rectiligne dans le vol horizontal, il n'y a pas de travail dépensé pour élever le corps de l'oiseau, contre la pesanteur (1).

» Le véritable travail effectué pour soutenir l'oiseau consiste dans le refoulement de l'air par le battement des ailes (2); la réaction de ce tra-

(1) Si nous admettions comme réelle l'oscillation du centre de gravité de $0^m,01$ par seconde que nous avons trouvée sur les photochronographies, il faudrait en conclure que, de ce chef, l'oiseau dépense à chaque seconde, c'est-à-dire dans cinq abaissements de ses ailes, le travail nécessaire à élever son poids, 623^r à $0^m,05$ de hauteur, soit $0^k^g^m,0311$.

Dans le vol ascendant ou descendant, il faut ajouter au travail de l'oiseau, ou en retrancher, celui qui correspond à la hauteur dont le poids de son corps s'élève ou s'abaisse suivant la verticale.

(2) Babinet avait tenté autrefois de calculer le travail de l'oiseau d'après les considérations suivantes : Par l'effet de la pesanteur, les corps tombant de $4^m,90$ dans la première seconde, l'oiseau devait, disait-il, effectuer, à chaque seconde, pour ne pas tomber, un travail capable d'élever son propre poids à $4^m,90$ de hauteur.

M. d'Esterno a fort justement combattu ce raisonnement en montrant que, si, au lieu d'une seconde, Babinet eût pris deux secondes comme base de son calcul, il eût

vail équivaut à un effort statique constamment égal et contraire à l'action de la pesanteur sur son corps.

» On peut, à cet égard, comparer l'oiseau qui prend son point d'appui sur l'air en le déplaçant aux animaux, lorsqu'ils marchent sur un sol mouvant. L'enfoncement d'un terrain sablonneux sous les pieds d'un marcheur est un travail qui a pour mesure la résistance incessamment variable que présente le sol comprimé, multipliée par la quantité dont ce sol s'enfonce à chaque instant. De même, quand l'aile d'un oiseau s'abaisse, le travail qu'elle fait a pour mesure l'effort à chaque instant exercé par l'air contre le *centre d'action* de la surface de l'aile, multiplié par le chemin vertical que ce centre d'action parcourt pendant le temps considéré. C'est la réaction de ce travail qui représente la force statique continuellement égale et contraire à la pesanteur.

» La même chose se passe encore lorsqu'un hélicoptère, ayant terminé sa course ascendante, reste un instant immobile avant de redescendre. Pendant cette phase d'immobilité, le poids de l'appareil est soutenu par la *réaction* de l'air contre l'hélice, réaction précisément égale à l'action de la pesanteur, c'est-à-dire au poids de l'hélicoptère.

» Dans le vol du goéland, la composante verticale du travail sur l'air, celle qui est destinée à soutenir le poids de l'oiseau, a pour mesure la pression de l'air, ou le poids de l'oiseau qui lui est égal, multiplié par le chemin que parcourt verticalement le centre d'action de l'aile.

» Les photochronographies nous montrent que l'aile, au moment de

trouvé que l'oiseau, tombant dans ce temps de $4^m,90 \times 2^2 = 19^m,60$, soit $9^m,80$ par seconde, devrait produire, contre la pesanteur, un travail deux fois plus grand. M. d'Esterno conclut à la nécessité de ramener à sa véritable valeur le temps pendant lequel l'oiseau est soumis à la force accélératrice de la pesanteur et, choisissant pour type un oiseau qui donne cinq coups d'ailes par seconde, estime que chacune de ses chutes, ne pouvant durer qu'un cinquième de seconde, se réduirait à $0^m,20$. Le travail qui compenserait l'effet de ces chutes n'en serait plus, pour une seconde entière, que celui qui consisterait à relever cinq fois l'oiseau à $0^m,20$, soit à 1^m de hauteur par seconde. Cette évaluation serait encore exagérée, car l'expérience montre que l'oiseau ne tombe pas pendant l'abaissement de ses ailes; on ne pourrait donc attribuer à la chute de l'oiseau que la moitié, environ, de la révolution alaire, soit un dixième de seconde, temps pendant lequel les ailes se relèvent entre deux coups frappés sur l'air. Avec cette dernière correction, la chute de l'oiseau entre deux coups d'ailes serait réduite à $0^m,049$, quantité sensiblement égale à son oscillation apparente.

Nous avons vu précédemment que l'oscillation réelle de l'oiseau, celle de son centre de gravité, est environ cinq fois plus faible.

l'essor, décrit un mouvement angulaire de 50° environ, soit, pour le rayon de $0^m,30$ à l'extrémité duquel agit la pression de l'air, un parcours vertical de $0^m,35$. Le travail effectué dans le sens vertical, c'est-à-dire pour soutenir l'oiseau contre la pesanteur, sera donc $0^{kgm},623 \times 0^m,35 = 0^{kgm},218$ par battement d'ailes, et comme le goéland donne cinq coups d'ailes par seconde, le travail sera de $0^{kgm},218 \times 5 = 1^{kgm},090$ par seconde.

» D'autre part, la *composante horizontale* qui pousse l'oiseau pendant l'abaissement des ailes a pour valeur $0^{kg},898$; cette force n'agit que pendant la moitié de l'espace horizontalement parcouru pendant une seconde, c'est-à-dire sur un parcours de $3^m,05$. Le travail dépensé à chaque seconde suivant la direction horizontale est donc $0^{kg},898 \times 3^m,05 = 2^{kgm},738$.

» En faisant la somme des travaux effectués, à chaque seconde, suivant les deux composantes, on obtient :

Travail suivant la verticale.....	$1^{kgm},090$
Travail suivant l'horizontale.....	$2^{kgm},738$
Total à chaque seconde.....	$3^{kgm},828$

pour un goéland qui ne pesait que $0^{kg},623$.

» Mais cette dépense de travail est un maximum qui n'est atteint qu'au moment de l'essor et pendant quelques instants seulement. Aussitôt que l'oiseau a acquis de la vitesse, son vol devient beaucoup plus facile; l'air résiste davantage sous l'aile qui le frappe, et l'amplitude des battements diminue beaucoup, en même temps que leur fréquence devient moindre. Pour ces raisons le travail de l'oiseau doit s'abaisser au-dessous de sa valeur initiale. On peut déjà se faire une idée de la diminution du travail que fait l'oiseau à mesure que son vol s'accélère, si l'on tient compte des changements qui surviennent alors dans la fréquence et dans l'amplitude des battements de ses ailes.

» L'observation montre que les goélands, en plein vol, ne donnent guère que trois battements d'ailes par seconde, au lieu de cinq. En supposant que chacun des coups d'ailes exige toujours le même travail, on doit admettre que, par le fait de leur moindre fréquence, la dépense de travail à la seconde sera réduite aux $\frac{2}{5}$ de la valeur qu'elle présente à l'essor. Mais l'observation montre, aussi que l'amplitude des battements de l'aile diminue dans une proportion plus grande encore que leur fréquence; dans le plein vol, elle se réduit au tiers environ de ce qu'elle était dans le vol de départ. Or, comme la résistance de l'air sous le centre d'action de l'aile

M.

reste nécessairement égale au poids de l'oiseau, la réduction de l'amplitude des mouvements de l'aile réduit ainsi le travail au tiers.

» Ainsi le goéland faisant au départ $3^{\text{kgm}}, 828$ ne fera plus, en plein vol, que $3^{\text{kgm}}, 828 \times \frac{3}{5} \times \frac{1}{3}$, soit $0^{\text{kgm}}, 766$.

» On voit donc que, par l'effet d'une translation plus rapide, l'oiseau dépense de moins en moins de travail pour déplacer la résistance de l'air; il est comme un marcheur qui, d'abord avançant avec peine sur un sable mouvant, rencontrerait un sol de plus en plus ferme et s'épuiserait de moins en moins à enfoncer le sable sous ses pieds.

» Cet accroissement de la résistance de l'air, sous l'influence de la translation de l'oiseau, m'a paru l'explication naturelle des changements qu'on observe dans l'amplitude et la fréquence des coups d'ailes à mesure que le vol s'accélère. J'en ai du reste démontré expérimentalement l'existence (1) au moyen d'appareils où un ressort servait à abaisser les ailes d'un oiseau mécanique. L'abaissement produit par ce même ressort était d'autant plus lent que la translation de la machine était plus rapide. Ainsi, l'abaissement de l'aile se faisant en $\frac{30}{1000}$ de seconde, quand la machine n'avait aucune translation, durait trois fois plus de temps quand la translation était de 6^{m} à la seconde. L'explication de ce phénomène m'a paru être la suivante : Quand l'oiseau est animé de vitesse, son aile rencontre à chaque instant de nouvelles masses d'air qu'elle met en mouvement et dont chacune lui présente sa résistance d'inertie. Cette théorie, que je croyais nouvelle, avait été déjà donnée par les frères Planavergne qui l'ont rappelée dans une Note publiée bientôt après (2).

» On s'explique ainsi pourquoi l'oiseau, avant de s'envoler, se donne préalablement le plus de vitesse possible, soit en courant, soit en sautant ou en se laissant tomber d'un lieu élevé. Cette vitesse diminue le travail qu'il devra faire. Dans toutes mes expériences, les oiseaux, après avoir répété quatre ou cinq fois le vol de départ, présentaient une fatigue extrême. Des pigeons, par exemple, qui vivent en liberté et se jouent d'ordinaire pendant des demi-heures entières en volant à de grandes distances, refusaient de s'envoler après cinq ou six expériences; ils restaient haletants, le bec ouvert. Si on les forçait à un nouvel essor, ils ne donnaient plus qu'un vol descendant et se reposaient au bout de quelques mètres.

(1) *Comptes rendus*, séance du 12 janvier 1874.

(2) *Ibid.*

» La théorie et l'expérience s'accordent donc pour montrer que le travail de l'oiseau, à chacun des abaïssements de ses ailes, est d'autant moindre que sa translation est plus rapide, l'énorme fatigue de l'essor faisant graduellement place à une moindre dépense de travail.

» Pour déterminer la valeur minimum du travail dépensé par l'oiseau, il faudra que de nouvelles études permettent de mesurer la diminution de fréquence et d'amplitude des coups d'ailes dans le vol de plus en plus rapide.

» Enfin, toutes les valeurs de travail qui ont été données ci-dessus devront être contrôlées à nouveau en améliorant les conditions expérimentales. Ainsi il faudra, avec des appareils plus puissants, opérer de plus loin, recueillir des images plus grandes et avoir des temps de pose plus courts, afin d'accroître la précision des mesures de vitesse.

Du travail dans la remontée de l'aile.

» Parmi les muscles moteurs de l'aile, il n'en est qu'un auquel on ait assigné le rôle de releveur : c'est le petit pectoral, dont le volume est très petit par rapport à celui des muscles qui président à l'abaïssement.

» Du reste, dès que l'oiseau est animé de vitesse, la remontée de l'aile s'explique, sans intervention des forces musculaires, par la seule action de l'air sous sa face inférieure dont le plan incliné se comporte à la façon d'un cerf-volant. D'anciennes expériences, qui montraient que, pendant la relevée de ses ailes, l'oiseau perd de sa vitesse, m'avaient conduit à admettre cette théorie, déjà émise par M. Liais. On conçoit que la force vive de l'oiseau projeté en avant remplace l'effort de traction qui est exercé par la corde dans un cerf-volant véritable. Or, le *vent relatif* qui frappe la face inférieure du cerf-volant se décompose en deux forces dont l'une résiste à la traction (elle est mesurable au dynamomètre), et l'autre soutient l'appareil et par conséquent est égale à son poids.

» Dans le vol de l'oiseau, le vent relatif qui agit sous les ailes se décompose de même; la composante horizontale résiste à la progression et ralentit la vitesse (on peut la mesurer d'après le ralentissement constaté sur les images photochronographiques); la composante verticale soutient l'oiseau, elle est égale à son poids.

» Mais cette composante verticale n'est pas un simple effort statique; elle travaille à la remontée de l'aile et remet ainsi le muscle grand pectoral en état d'allongement et de tension, condition nécessaire à l'action prochaine par laquelle ce muscle abaïssera l'aile de nouveau. Il y a donc

travail de l'air sous l'aile remontante, c'est-à-dire travail résistant ou négatif effectué par les muscles de l'aile qui subissent un allongement tout en résistant. Pour estimer la valeur de ce travail résistant, il faut déterminer le centre de pression de l'air sous l'aile remontante et mesurer le chemin que parcourt ce point pendant la remontée.

» Afin de simplifier les conditions du problème, considérons d'abord le cas d'un oiseau qui plane, c'est-à-dire qui dépense sa vitesse acquise dans un glissement sur l'air, en tenant les ailes étendues et immobiles. Dans ce cas, toutes les parties des ailes participent également au mouvement de translation; en chaque point de leurs surfaces la pression de l'air agit également, comme cela arrive dans le cerf-volant; la somme de toutes ces pressions, qui pour chaque aile est égale à la moitié du poids de l'oiseau, doit être considérée comme appliquée au centre de chacune des surfaces inférieures des ailes.

» Mais l'aile remontante se replie et, par conséquent, sa longueur diminue d'une quantité incessamment variable, ce qui rend le centre de gravité de sa surface impossible à préciser. Nous pouvons affirmer seulement que ce point se rapproche du corps de l'oiseau, en raison même de la flexion de ses ailes.

» Considérons enfin que l'aile s'élève et que les différents points de sa face inférieure se dérobent, pour ainsi dire, à la pression de l'air devant laquelle ils fuient avec des vitesses inégales, puisque la remontée de l'aile est un mouvement angulaire. Nous arriverons à conclure que les plumes de la région interne de l'aile reçoivent par en dessous la pression la plus forte. Cette nouvelle raison autorise à placer encore plus près du corps le point d'application de la somme de ces pressions.

» Admettons, pour fixer les idées, que le centre de pression de l'air sous l'aile remontante soit situé à son tiers interne; on aura la mesure du travail de remontée en multipliant le poids de l'oiseau par le chemin que parcourt verticalement le point situé au tiers interne de la longueur de son aile. Soit $0^m,13$ ce parcours, le travail de l'air pour remonter l'aile sera

$$0^{kg},623 \times 0^m,13 = 0^{kgm},080$$

pour chaque élévation de l'aile, ou, pour une seconde, cinq fois plus, c'est-à-dire $0^{kgm},400$.

» Ici se pose un des problèmes les plus délicats de la physiologie musculaire. Le travail négatif effectué par un muscle accroît la valeur du travail positif exécuté par ce muscle dans sa contraction prochaine. Peut-on

admettre qu'il y ait, en ce cas, restitution partielle de travail emmagasiné dans le muscle? J'ai émis cette opinion à propos de la locomotion humaine, en montrant qu'immédiatement après un premier saut on ressaute à une hauteur plus grande ⁽¹⁾. J'admettais alors une restitution partielle du travail dépensé dans le premier saut et emmagasiné dans les muscles extenseurs lorsqu'ils faisaient du travail résistant pour amortir la chute, en agissant à la façon d'un ressort. Dans une récente Communication à l'Académie, M. de Louvrié a émis l'idée qu'un phénomène analogue se produisait dans le coup d'aile de l'oiseau. Aujourd'hui, mes opinions tendent à se modifier, et je considère que la force élastique acquise par un muscle dans le travail résistant, force qui accroîtra l'effet de sa contraction ultérieure, est obtenue préalablement par les mêmes actes intimes et avec la même dépense de fatigue que le travail positif d'une contraction ordinaire. Il y aura lieu de faire de nouvelles recherches sur ce point, l'un des plus importants de la physiologie générale des muscles.

» Jusqu'ici, on n'a pu étudier le mouvement du plein vol, car un oiseau lâché de très loin ne passe, pour ainsi dire, jamais au devant de l'écran noir et dans le plan pour lequel on a fait la mise au point des appareils photographiques. Il faudra donc recourir à des dispositions nouvelles pour déterminer la valeur du travail minimum dans le vol de l'oiseau. »

(1) *Comptes rendus*, t. CI, p. 494; 1885.

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CVII,
séance du 1^{er} octobre 1888.

*Valeurs relatives des deux composantes de la force déployée dans
le coup d'aile de l'oiseau, déduites de la direction et de l'insertion
des fibres du muscle grand pectoral;*

PAR M. MAREY.

« Après avoir mesuré par la Photo-chronographie les accélérations verticale et horizontale de la masse de l'oiseau, j'en ai déduit la valeur des deux forces qui agissent dans le vol : l'une égale au poids de l'oiseau et destinée à le soutenir contre la pesanteur, l'autre horizontale et le propulsant malgré la résistance de l'air. Cette seconde force est beaucoup plus grande que la première, du moins au moment de l'essor, et peut dépasser le double du poids de l'oiseau.

» Toutefois, cette conclusion est en opposition formelle avec les idées de presque tous les auteurs qui se sont occupés de la théorie du vol; ils pensent que, grâce à ses formes fines d'avant et d'arrière, l'oiseau qui glisse dans l'air n'y doit pas trouver une très grande résistance. Cette opinion

M.

I

est peut-être exacte pour le plein vol; mais, à l'essor, la manière dont les ailes s'orientent au moment de leur relevée doit leur faire rencontrer sur l'air une grande résistance, qui ne peut être surmontée que par une force proportionnée.

» Il m'a semblé que, dans la disposition des fibres musculaires, on devait trouver l'indication des valeurs relatives des composantes horizontale et verticale de la force de ce muscle.

» En effet, quand les fibres d'un muscle dont l'épaisseur est uniforme convergent vers un point d'attache unique, la résultante de leur action collective s'exerce suivant une ligne moyenne, bissectrice de l'angle que font ces fibres en rayonnant autour de leur attache mobile.

» Or, le grand pectoral de l'oiseau, ce muscle puissant qui produit à lui seul presque tout le travail du coup d'aile, présente dans son ensemble l'aspect d'un triangle rectangle avec un grand côté formé par la crête du sternum presque horizontale pendant l'attitude du vol, tandis que l'hypoténuse représentée par le bord supérieur du muscle serait plus ou moins inclinée sur l'horizon suivant l'espèce d'oiseau que l'on considère.

» Sur une tourterelle que je viens de disséquer, la direction moyenne des fibres du grand pectoral a été estimée d'après la bissectrice de l'angle formé par ses fibres à leur attache sur l'humérus. Cette bissectrice était inclinée obliquement sur l'horizon, avec lequel elle formait un angle de 35°. D'après cela déjà on peut conclure que la composante horizontale de l'action du muscle l'emportait sur la composante verticale.

» Si l'on considère que l'attache du grand pectoral sur l'humérus ne se fait pas sur un point limité, mais s'étale sur une crête assez étendue, on devra admettre que les fibres les plus externes du muscle, ayant leurs attaches plus éloignées du centre de mouvement de l'épaule, auraient un moment d'action plus favorable et que, par conséquent, la résultante de l'effort total du muscle sera située sensiblement en dehors de la bissectrice de l'angle d'insertion humérale et près du bord externe du muscle, c'est-à-dire de l'hypoténuse du triangle.

» En cherchant, d'après ces considérations, à déterminer la position de l'axe suivant lequel s'exerçait l'effort moyen du pectoral, j'ai trouvé que cet axe est incliné sur l'horizon d'environ 27° et que, par conséquent, ses projections verticale et horizontale sont entre elles sensiblement dans le rapport de 1 à 2.

» Il sera intéressant de comparer à cet égard les muscles pectoraux des

(3)

différentes espèces d'oiseaux. Les canards, oies, cygnes, dont les pectoraux sont très allongés, doivent avoir l'action de ce muscle très oblique par rapport à la crête du sternum. Les Rapaces, et surtout les oiseaux pourvus de grandes ailes, offrent la disposition contraire. On peut déjà prévoir qu'à ces conformations anatomiques différentes correspondent des différences d'attitude pendant le vol. »

M.

I.

De la claudication par douleur.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CVII;
séance du 22 octobre 1888.

« La claudication peut avoir des causes très variées : le raccourcissement d'un membre, la raideur d'une articulation, la faiblesse d'un muscle ou d'un groupe de muscles, etc., sont des causes mécaniques de claudication. MM. Quénu et Demeny ont entrepris, depuis quelque temps, à la Station physiologique, des études basées sur l'emploi de la Photo-chronographie et destinées à déterminer les caractères objectifs de ces différentes manières de boiter. Ces recherches, dont les premiers résultats ont été soumis à l'Académie, se poursuivent sur un grand nombre de sujets atteints de lésions diverses (1).

» Mais il est une autre cause qui fait boiter, c'est quand l'appui du pied sur le sol est douloureux. La claudication est alors volontaire; elle a pour but d'atténuer la souffrance en diminuant la pression du pied sur le sol.

» L'homme qui souffre d'un pied peut, en surmontant la douleur par un effort de volonté, cesser un moment de boiter, mais sa claudication reparaît bien vite; elle s'exagère même à mesure qu'il s'étudie à trouver une manière de marcher qui le fasse souffrir le moins possible.

» Sur les chevaux, on voit des boiteries de ce genre cesser un instant sous l'action d'un coup de fouet ou par une émotion soudaine de l'animal.

» Si l'on observe avec quelque attention la boiterie par douleur, on

(1) QUÉNU et DEMENY, *Étude de la locomotion humaine dans les cas pathologiques* (*Comptes rendus*, 28 mai 1888).

voit qu'elle consiste en un abaissement subit du corps au moment où le pied douloureux repose sur le sol; le corps se relève ensuite énergiquement pendant l'appui du membre sain. Or la descente du corps pendant l'appui du pied sur le sol diminue la force de cet appui et par conséquent la douleur qui l'accompagne.

» C'est à tort qu'on a pu dire que, du moment où un seul pied repose sur le sol, ce pied porte nécessairement tout le poids du corps et rien que ce poids. Cela serait vrai si le corps restait immobile; mais, comme dans la marche la jambe à l'appui se ploie et s'étend tour à tour, le centre de gravité du corps exécute des mouvements de descente et de remontée qui s'accompagnent de diminution et d'accroissement alternatifs de la pression du pied sur le sol. Du reste, chacun peut sur soi-même se rendre compte des effets mécaniques de la claudication.

» Et d'abord, pour rendre douloureux l'appui d'un pied sur le sol, il suffit de placer dans sa chaussure un corps étranger dur et anguleux; au bout de quelques instants de marche, on sera dans l'état voulu. On constatera alors facilement que, dans la marche à pas égaux, la douleur est très vive, mais que si, au moment de l'appui du pied endolori, on laisse fléchir brusquement la jambe correspondante et le corps s'abaisser, la douleur sera plus faible. Pendant cet appui incomplet, le pied non douloureux va rapidement prendre sa position nouvelle et, d'une poussée vigoureuse, relève à son niveau normal le corps qui s'était laissé tomber un instant.

» Au point de vue des lois mécaniques qui régissent la pression du pied sur le sol, il y a lieu de considérer trois cas, dans lesquels cette pression est tantôt égale au poids du corps, tantôt supérieure, tantôt inférieure à ce poids.

» 1° Si le centre de gravité du corps est immobile ou animé d'un mouvement uniforme d'élévation ou d'abaissement, la pression sur le sol est précisément égale au poids du corps.

» 2° Si le centre de gravité s'élève d'un mouvement accéléré, c'est que l'appareil musculaire fait plus que soutenir le poids du corps, mais développe un surcroît d'effort qui se transmet au sol et qui a pour mesure l'accélération même imprimée à la masse du corps.

» 3° Si le centre de gravité du corps s'abaisse d'un mouvement accéléré, le poids du corps ne se transmet pas tout entier au pied à l'appui, car une partie de la pesanteur travaille à produire l'accélération descendante de la masse du corps. Cette force, qui ne se transmet pas au sol, représente une partie du poids du corps d'autant plus grande, que l'accélération

(7)

descendante est plus grande et s'approche davantage de la valeur de g , ou $9^m,80$ par seconde.

» Ces conséquences nécessaires de la théorie se vérifient par l'expérience lorsqu'on a recours à l'emploi simultané de la Photo-chronographie pour saisir les phases de l'accélération verticale du centre de gravité, et du dynamomètre inscripteur pour mesurer la valeur de la pression sur le sol à chaque phase du mouvement.

» On voit, en comparant les deux courbes concurremment obtenues, que plus l'appui du pied douloureux s'accompagne d'un brusque abaissement du corps, plus est courte et peu élevée la courbe qui exprime l'intensité d'appui du pied.

» Mais, dès que le pied non douloureux vient à l'appui, il rachète l'abaissement passager qui venait de se produire, en imprimant au corps une ascension qui rétablit le niveau moyen suivant lequel la masse du corps se transporte. Cette ascension s'accuse sur le tracé du dynamomètre par une courbe élevée et d'une durée beaucoup plus grande que celle qui correspond à l'appui du pied douloureux. »

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CV;
séance du 12 septembre 1887.

Recherches expérimentales sur la morphologie des muscles;

PAR M. MAREY.

« Il y a deux siècles, Borelli a fait voir que l'effort dont un muscle est capable est proportionnel à la section transversale de ses fibres rouges, tandis que l'étendue de son raccourcissement est proportionnelle à leur longueur. Aujourd'hui que la notion du travail mécanique est bien définie, on peut compléter la conclusion de Borelli en disant que le travail qu'un muscle peut produire est proportionnel au volume ou au poids de sa fibre rouge, tandis que les deux facteurs de ce travail, l'effort et le chemin, sont proportionnels l'un à la section, l'autre à la longueur des faisceaux contractiles; le tendon n'est qu'un organe de transmission du travail.

» En 1873 ⁽¹⁾, j'ai montré que l'anatomie comparée du système musculaire des mammifères et des oiseaux confirme entièrement cette loi et que partout éclate une harmonie parfaite entre la forme d'un muscle et les conditions dynamiques de son travail, de sorte que les variétés de forme qu'un même muscle présente chez les différents animaux sont toutes motivées par les exigences d'un type particulier de locomotion.

⁽¹⁾ *La Machine animale*, Chap. VIII, p. 99 et suiv. Paris, 1873.
M.

(2)

» Un problème se posait dès lors. Cette harmonie est-elle préétablie dans les plans de la nature, ou bien est-elle engendrée par la fonction elle-même? En d'autres termes, la forme du muscle se met-elle spontanément en harmonie avec les nécessités de sa fonction?

» J'inclinai vers cette conclusion pour des raisons diverses. Tout le monde sait que les exercices athlétiques font grossir les muscles en les rendant capables d'efforts plus énergiques; n'y aurait-il pas aussi des conditions où les muscles changent de longueur sous l'influence d'un changement survenu dans l'étendue de leur raccourcissement?

» Ces cas existent et j'ai cru les reconnaître dans les modifications de la longueur des tendons signalées par J. Guérin (1) à la suite de certaines ankyloses. Mais ce que J. Guérin considérait comme une dégénérescence pathologique des muscles qui devenaient fibreux était, pour moi, le résultat d'un travail physiologique par lequel un muscle dont les mouvements sont réduits par une ankylose partielle réduit spontanément la longueur de sa fibre rouge et n'en garde que ce qui est nécessaire à l'étendue actuelle de ses mouvements. J'interprétais de même l'allongement des tendons et le raccourcissement de la fibre rouge chez les vieillards, dont les mouvements perdent graduellement de leur étendue. Enfin j'appelais l'attention des expérimentateurs sur ce point de physiologie, persuadé qu'il était possible d'accroître ou de diminuer la longueur des fibres rouges d'un muscle en augmentant ou en diminuant l'étendue des mouvements qu'elles peuvent exécuter.

» Dix ans plus tard, parut en Allemagne un très remarquable travail du Dr Wilhelm Roux (2) sur la morphologie des muscles. L'auteur conclut aussi à la régulation spontanée des muscles sous des influences physiologiques (irritation fonctionnelle amenant des phénomènes trophiques). Il cite à l'appui de cette théorie les modifications qu'on observe sur la longueur des fibres rouges du muscle *carré pronateur* suivant l'étendue que présentent les mouvements de rotation du radius autour du cubitus. La valeur angulaire de ces mouvements variait sur les cadavres examinés de 12° à 187°; or la longueur des fibres du muscle *carré pronateur* variait suivant le même rapport.

» Dans mes Cours au Collège de France, je revins, l'année dernière,

(1) *Essai de Physiologie générale*. Paris, 1868.

(2) W. Roux, *Beiträge zur Morphologie der funktionellen Anpassung* (Separat-Abdruck aus der *Zeitschrift für Naturwissenschaften*, XVI, N.F., IX Bd.). Iéna, 1883.

(3)

sur les lois de la Morphologie musculaire et, comparant la forme des muscles gastrocnémiens dans la race blanche avec ceux du nègre, je trouvai un nouvel exemple d'harmonie entre la forme des muscles et les conditions de leur travail (1).

» On dit que certains nègres n'ont pas de mollets; or l'anatomie montre que leurs muscles gastrocnémiens sont longs et minces, se prolongeant

Fig. 1.



Jambe du nègre.

Fig. 2.



Jambe du blanc.

en bas aux dépens du tendon d'Achille, au lieu de former, comme chez le blanc, une masse volumineuse en haut de la jambe. Le nègre possède, toutefois, une aptitude incontestable à la marche; ses muscles gastrocnémiens, s'ils ont peu de développement transversal et, par conséquent, peu de force, doivent avoir des mouvements très étendus. Ils pourront

(1) Voir *Revue scientifique* du 3 juillet 1886.

(4)

faire, dès lors, le même travail que des muscles plus gros, mais dont les mouvements seraient plus bornés. S'il en est ainsi, les gastrocnémiens du nègre doivent agir sur un bras de levier plus long que ceux du blanc; le calcanéum du nègre doit donc être plus long que celui du blanc. Je vérifiai cette prévision sur les squelettes du Musée de la Société d'Anthropologie et trouvai que la longueur moyenne du calcanéum du nègre, mesurée du centre du mouvement articulaire à l'attache du tendon, est à celle du blanc comme 7 est à 5. Les *fig. 1* et *2* montrent bien ces différences dans la longueur des gastrocnémiens et dans celle des calcanéum.

» Je résolus dès lors de provoquer expérimentalement sur des animaux des modifications dans la longueur des muscles en changeant les bras de levier auxquels ces muscles s'insèrent. Ma conviction était assez arrêtée pour que je n'aie pas hésité à prédire les résultats que je devais obtenir.

» Les vastes terrains que la Ville de Paris a affectés à la Station physiologique me permettent d'y élever en liberté des animaux dont la locomotion ne soit point entravée. Sur des chevreaux et des lapins, je réséquai le calcanéum, de manière à réduire de moitié environ le bras de levier des muscles postérieurs de la jambe. M. le D^r Quénu voulut bien pratiquer ces opérations par la méthode antiseptique, ce qui assura la cicatrisation immédiate. Je possède aujourd'hui des lapins opérés depuis plus d'un an; l'un d'eux vient d'être sacrifié et les muscles de ses membres postérieurs disséqués ont été comparés à ceux d'un lapin normal servant de *témoin*.

» Les *fig. 3* et *4* montrent clairement que les changements prévus se sont accomplis. Sur le lapin normal, les faisceaux et leur tendon ont à peu près la même longueur; sur le lapin dont le calcanéum est réséqué, la longueur des muscles n'est guère que la moitié de celle du tendon.

» Voici les mesures obtenues dans cette comparaison :

	Lapin	
	opéré.	normal.
Longueur des muscles.....	27 ^{mm}	37 ^{mm}
Longueur des tendons.....	50 ^{mm}	36 ^{mm}

» L'opération a été variée de diverses manières : j'ai cherché, par exemple, à réduire les mouvements en détachant les tendons du calcanéum sur lequel ils se réfléchissent en y contractant des adhérences, puis en luxant latéralement ces tendons. Le résultat a été le même que celui de

(5)

la résection, au point de vue des changements produits dans la longueur des muscles. Il devait en être ainsi, puisque, dans les deux cas, le bras de levier de la force du muscle était diminué.

» D'autres résultats que je ne cherchais pas se sont encore produits : ainsi une atrophie partielle des os du membre, des changements de forme

Fig. 3.



Lapin au calcanéum réséqué.

Fig. 4.



Lapin normal

et de volume des fléchisseurs du pied, etc. Ces changements méritent d'être étudiés avec soin, car ils semblent aussi devoir éclairer les lois de la Morphologie.

» Je me borne aujourd'hui à annoncer que l'expérience a vérifié mes prévisions; ce succès entraînera, je l'espère, la conviction des physiologistes, et d'autres expérimentateurs continueront ces recherches (1).

» Qu'il me soit permis d'insister sur la portée de la Morphologie expérimentale. Les théories transformistes attendent encore leur démonstra-

(1) Comme il est très difficile de déterminer sur les muscles penniformes la longueur propre des faisceaux musculaires, il pourrait rester un doute sur la réalité de leur raccourcissement dans l'expérience que nous venons de faire. Nous nous proposons, sur un lapin opéré l'an dernier, de rechercher le degré de raccourcissement qu'éprouvent les muscles postérieurs de la jambe lorsqu'on les soumet à une excitation électrique et de comparer ce raccourcissement à celui des muscles normaux.

(6)

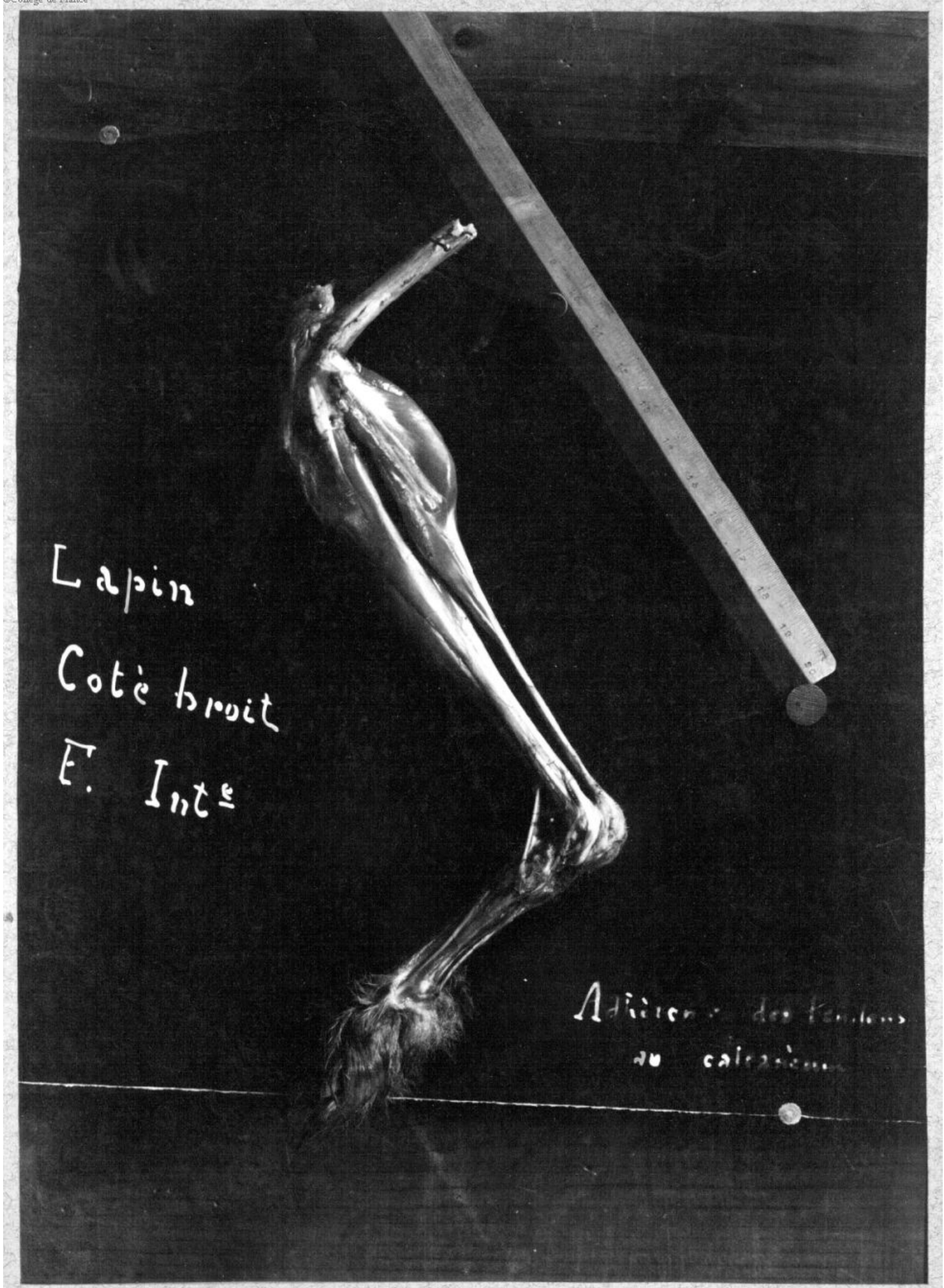
tion. Pour prouver qu'un organe se met en harmonie avec les conditions dans lesquelles il fonctionne, il faut d'abord connaître les relations qui existent entre la forme de cet organe et les caractères de sa fonction. Ce rapport semble maintenant bien défini en ce qui concerne le muscle; c'est donc sur le muscle que les expériences devront porter. Il reste un pas à franchir, c'est de provoquer des variations de la forme musculaire en changeant les conditions extérieures de la locomotion, et sans que l'intervention chirurgicale modifie les relations anatomiques des organes. Il faudra voir enfin si l'hérédité fixe, dans certaines limites, les modifications qui seront ainsi obtenues. »

Jota droit

F. Ext^e



Adherence
au calcaneum

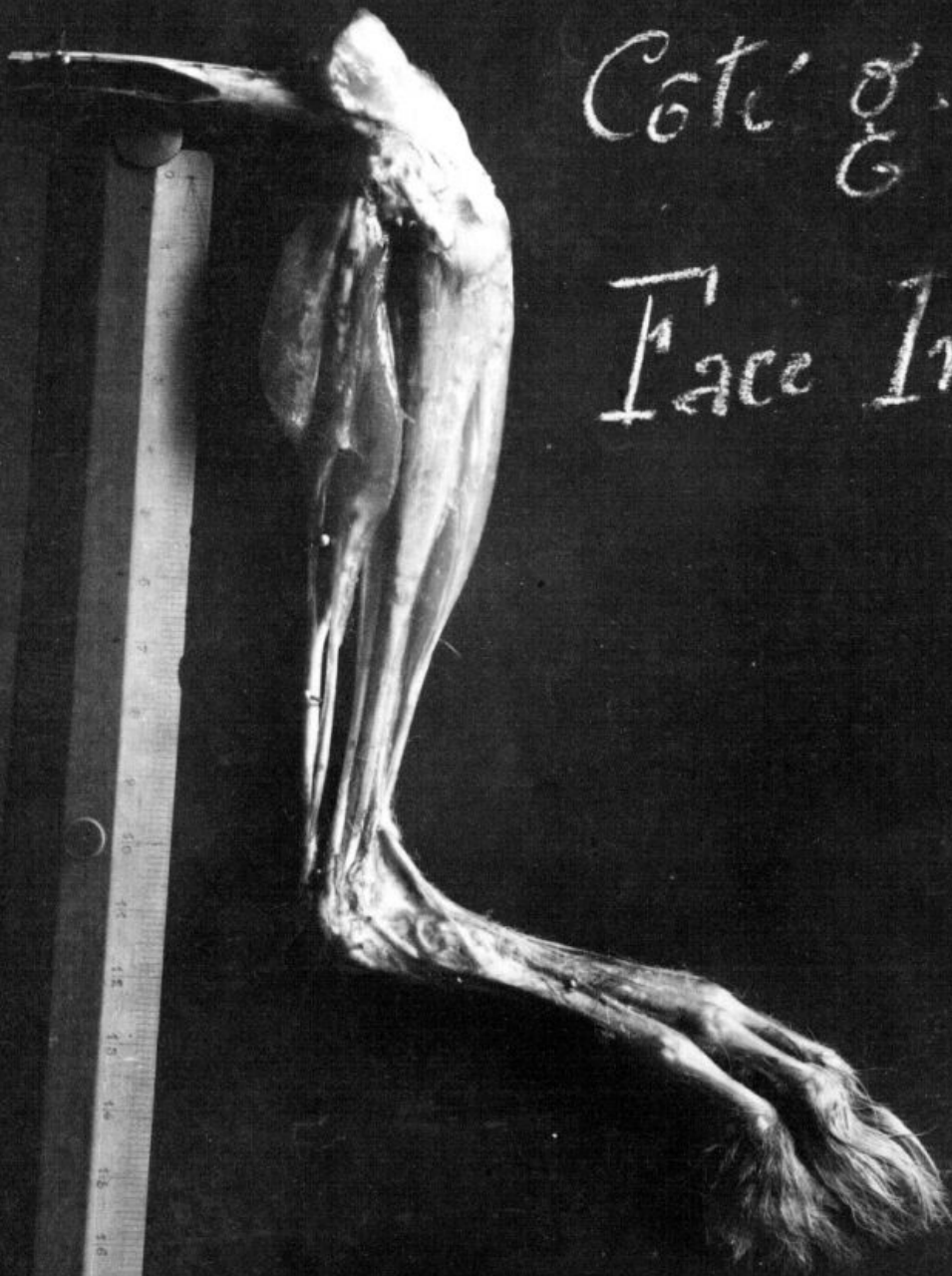


Lapin

Coté droit

E. Inté

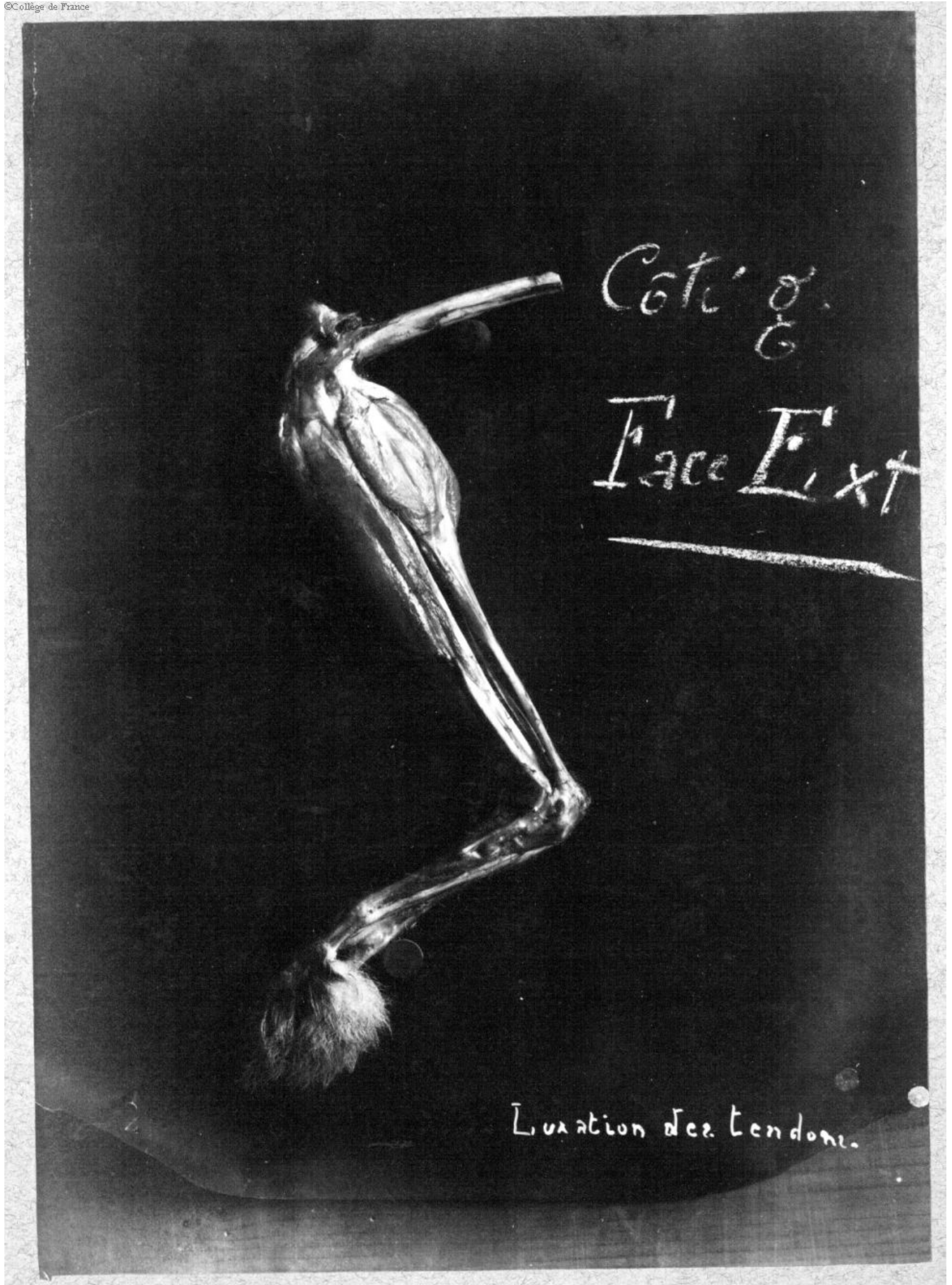
Adhérence des tendons
au calcaire



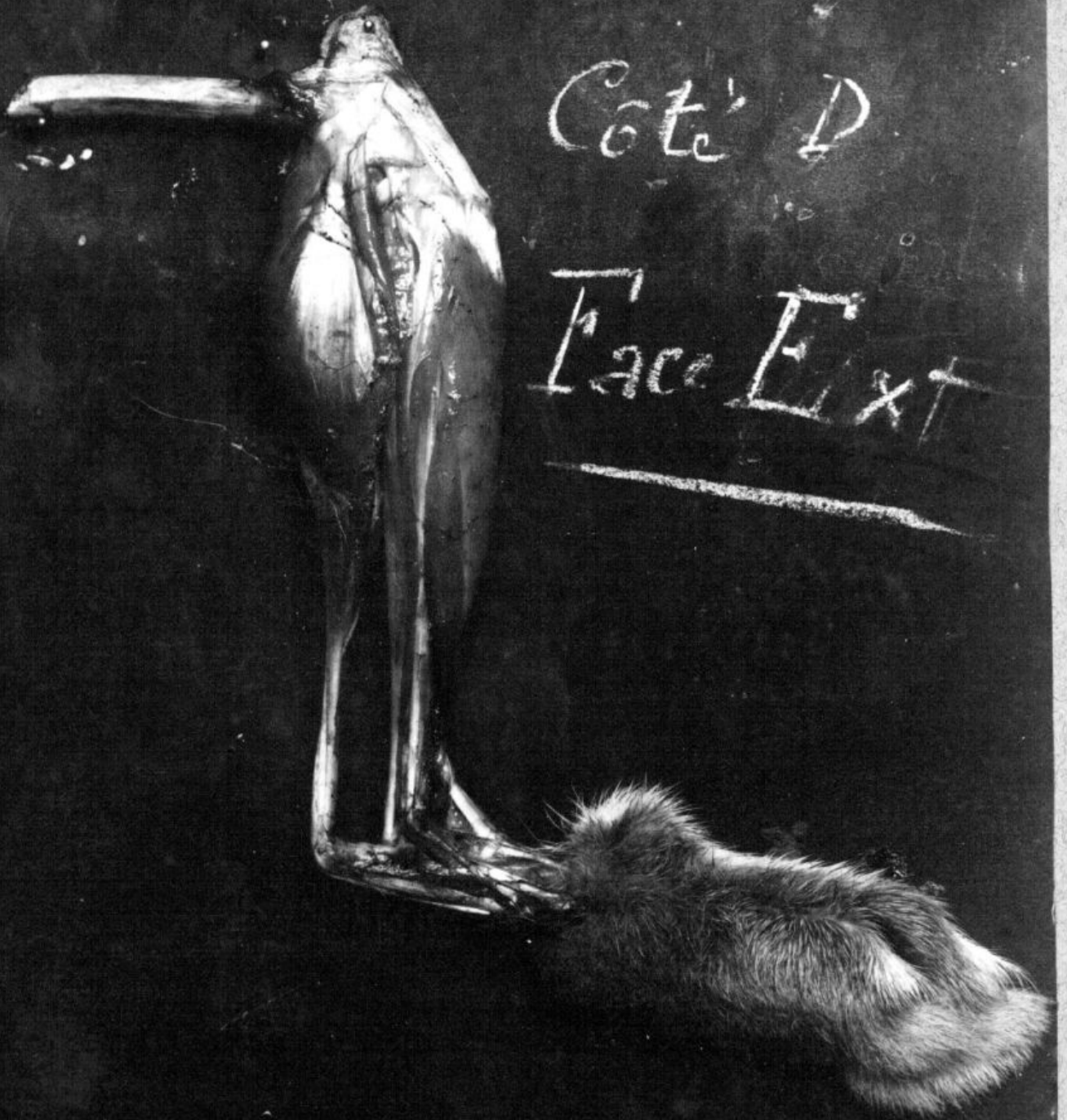
Cote d.
G

Face Int-

Luxation der Tendone



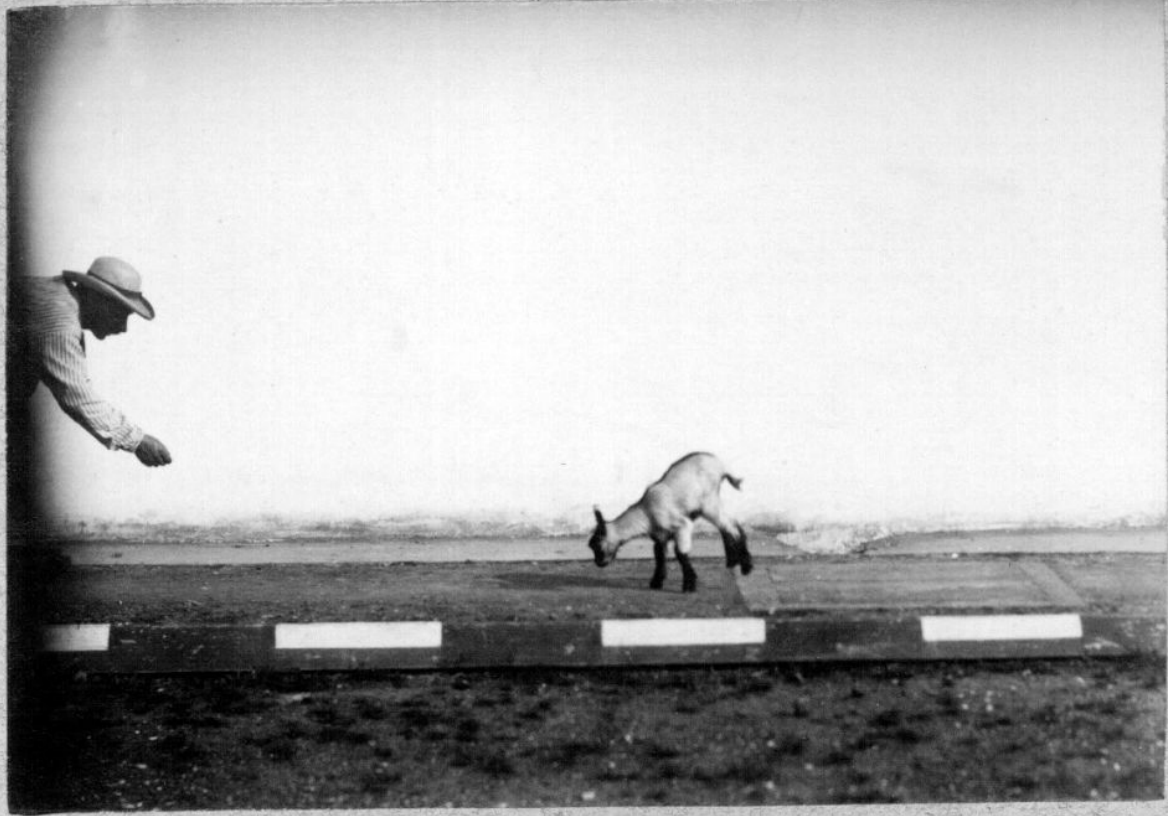
Lupinus Normal



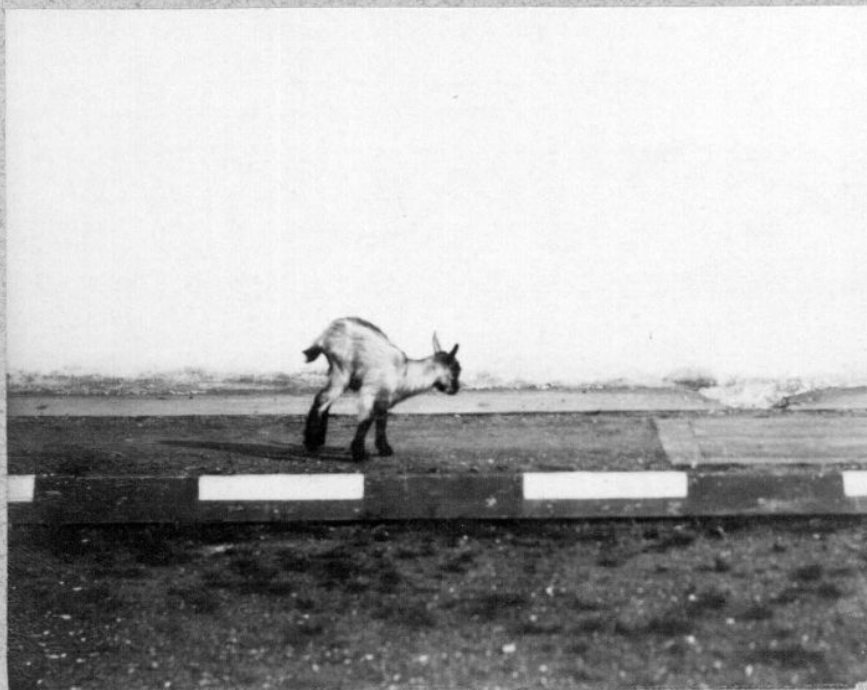
Lupin Normal



Face
int.



Chevreau a calcanien. Jeudi 5 Mai 1887



INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CV;
séance du 3 octobre 1887.

Étude expérimentale de la locomotion humaine;

PAR MM. MAREY ET DEMENY.

MOUVEMENTS DU TRONC DANS LA MARCHÉ ET DANS LA COURSE.

« Dans des Notes publiées antérieurement ⁽¹⁾, il a été donné une analyse cinématique des mouvements du corps et des membres dans la marche et la course de l'homme.

» Cette analyse, faite au moyen de la photographie, contient des indications sur la forme caractéristique des trajectoires décrites par les points remarquables du corps, la valeur des composantes horizontale et verticale de la vitesse de chacun de ces points à des instants successifs équidistants, les degrés d'abaissement et d'élévation du corps au-dessus du sol, et les attitudes successives des membres d'un même côté.

» Ces observations se rapportent à la projection du mouvement sur un plan vertical parallèle à la direction générale de la progression. Mais le mouvement ne se passe pas dans un plan vertical; chaque point du corps décrit en réalité une courbe gauche, et les mouvements dans le sens

⁽¹⁾ *Comptes rendus*, séances du 19 mai 1884 et des 20 septembre et 4 octobre 1886.
M. et D.

(2)

perpendiculaire à la progression échappent à la projection verticale indiquée ci-dessus.

» De cette nature sont les mouvements propres du tronc qui, mentionnés depuis longtemps par différents physiologistes, ont été l'objet d'une étude expérimentale approfondie de la part de M. le professeur Carlet⁽¹⁾.

» Nous avons cru néanmoins devoir soumettre ces mouvements à l'analyse par la méthode photochronographique, qui a, sur la méthode graphique par inscription directe, l'avantage de laisser le sujet en expérience libre de ses mouvements et ne peut ainsi être suspectée d'altérer les allures normales. De plus, cette étude nous présente un double intérêt.

» Elle peut nous faire connaître le sens et la valeur de l'erreur commise dans les précédentes observations et dans les calculs relatifs à l'évaluation du travail⁽²⁾. Ces calculs faits avec des éléments tirés de la projection verticale du mouvement du sommet de la tête ne sont vrais que pour le mouvement du centre de gravité du corps et il est intéressant de constater si le point choisi est celui dont le mouvement se rapproche le plus du mouvement du centre de gravité du corps ou bien si ce point se ressent des mouvements propres du tronc.

» Cette étude doit aussi compléter notre connaissance de la locomotion normale de l'homme par des observations de détail qui prendront de l'importance dans l'étude de la locomotion pathologique; certaines perturbations que l'on observe dans les différentes claudications ne sont probablement que l'exagération en plus ou en moins de mouvements peu apparents, mais existant néanmoins à l'état normal.

» Les mouvements propres du tronc sont :

- » 1^o Des torsions suivant un axe vertical;
- » 2^o Des torsions suivant un axe horizontal;
- » 3^o Des mouvements de totalité (balancement d'avant en arrière et balancement latéral).

» Pour nous rendre compte des mouvements de torsion suivant l'axe vertical, nous avons couvert de velours noir la piste d'expérience et nous avons fait passer le sujet vêtu de blanc au-dessous d'un photochronographe braqué verticalement à 12^m de hauteur. Nous avons obtenu une série d'images en raccourci reproduites dans la *fig. 1* et qui donnent déjà

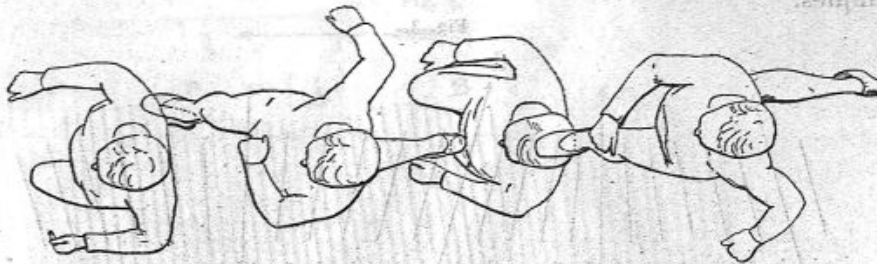
(1) *Annales des Sciences naturelles : Zoologie*, 1872.

(2) *Comptes rendus*, séance du 9 novembre 1885.

(3)

sur les positions relatives des parties du corps des indications complémentaires des images prises sur l'écran vertical.

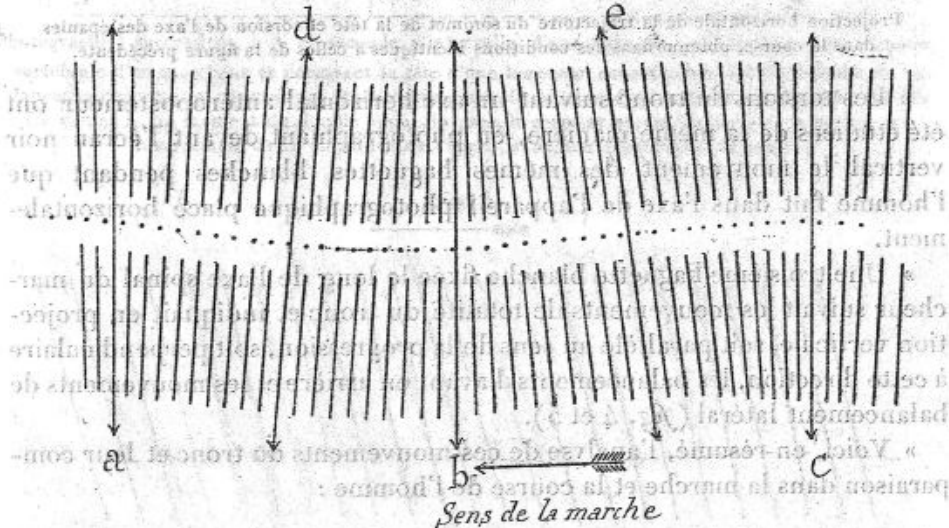
Fig. 1



Images successives d'un coureur photographié d'un point élevé à des intervalles de $\frac{1}{17}$ de seconde.

» Les mouvements de torsion du tronc sont indiqués dans ces figures, mais insuffisamment pour en comprendre la continuité. Nous les avons rendus plus apparents en fixant horizontalement sur l'homme vêtu de noir deux baguettes blanches indiquant l'axe des épaules et la ligne des têtes fémorales.

Fig. 2



Photographies successives d'une baguette indiquant l'axe des épaules d'un marcheur.

Les images sont prises à $\frac{1}{17}$ de seconde d'intervalle et d'un point élevé.

On voit en projection horizontale la trajectoire de la tête indiquée par des points,

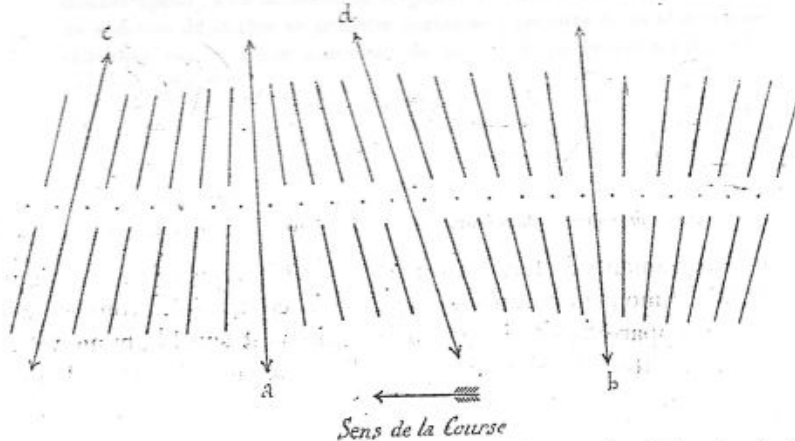
ainsi que la torsion des épaules nulle en *abc* et maximum en *de*.

» En augmentant le nombre d'images jusqu'à cinquante à la seconde, on

(4)

obtient sur la plaque photographique une figure reproduite *fig. 2* et *3*, où les inflexions latérales de la trajectoire de la tête et le mouvement de torsion des épaules et du bassin sont clairement et synchroniquement indiqués.

Fig. 3.



Projection horizontale de la trajectoire du sommet de la tête et torsion de l'axe des épaules dans la course, obtenue dans des conditions identiques à celles de la figure précédente.

» Les torsions du tronc suivant un axe horizontal antéropostérieur ont été étudiées de la même manière, en photographiant devant l'écran noir vertical le mouvement des mêmes baguettes blanches pendant que l'homme fuit dans l'axe de l'appareil photographique placé horizontalement.

» Une troisième baguette blanche fixée le long de l'axe spinal du marcheur suivait les mouvements de totalité du tronc et indiquait en projection verticale, soit parallèle au sens de la progression, soit perpendiculaire à cette direction, les balancements d'avant en arrière et les mouvements de balancement latéral (*fig. 4* et *5*).

» Voici, en résumé, l'analyse de ces mouvements du tronc et leur comparaison dans la marche et la course de l'homme :

Sinuosités de la trajectoire du sommet de la tête en projection horizontalé.

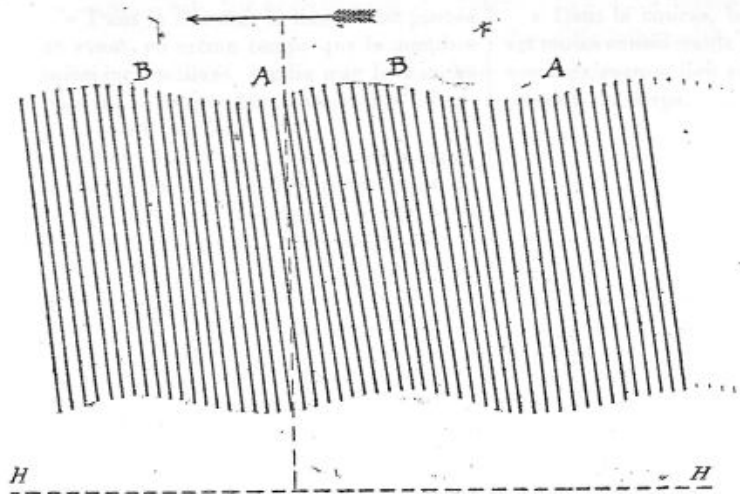
» Dans la marche, l'écart latéral maximum a lieu pendant l'appui unipédal, il coïncide avec le maximum d'élévation de la tête au-dessus du plan horizontal et

» Dans la course, l'écart latéral maximum a lieu pendant l'appui, il coïncide avec le minimum d'élévation de la tête au-dessus du plan horizontal, ainsi qu'avec

(5)

avec le minimum de la vitesse horizontale de la masse du corps. | le minimum de la vitesse horizontale de la masse du corps.

Fig. 4.



Photographies successives, à $\frac{1}{15}$ de seconde d'intervalle, d'une baguette fixée le long de la colonne vertébrale d'un marcheur et dépassant la tête d'une longueur considérable. Le mouvement de balancement en avant et en arrière et l'inclinaison générale du tronc dans la marche sont ainsi amplifiés. On voit en A, au moment du double appui du pied, le corps se porter légèrement en arrière, et inversement en B, au milieu de l'appui, s'incliner légèrement en avant.

Fig. 5.

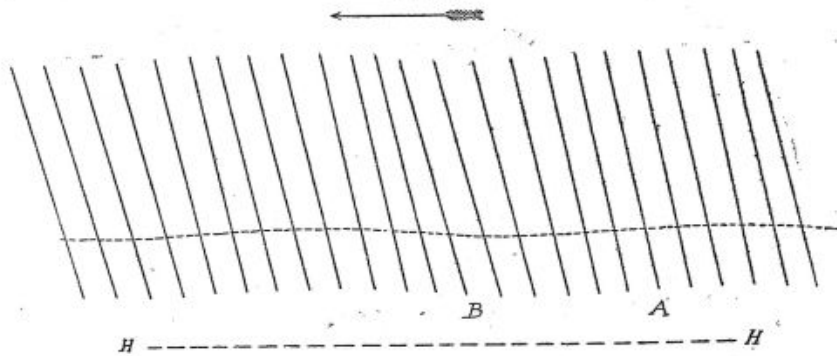


Figure montrant les inclinaisons du tronc dans la course. La ligne ponctuée représente la trajectoire du sommet de la tête; HH horizontale. Les attitudes correspondent à des intervalles de temps de $\frac{1}{15}$ de seconde.

» Sa valeur est en moyenne de $2^{cm},5$ à droite et à gauche de la ligne de progression. | » Sa valeur est moindre que dans la marche et diminue avec la longueur du I.

(6)

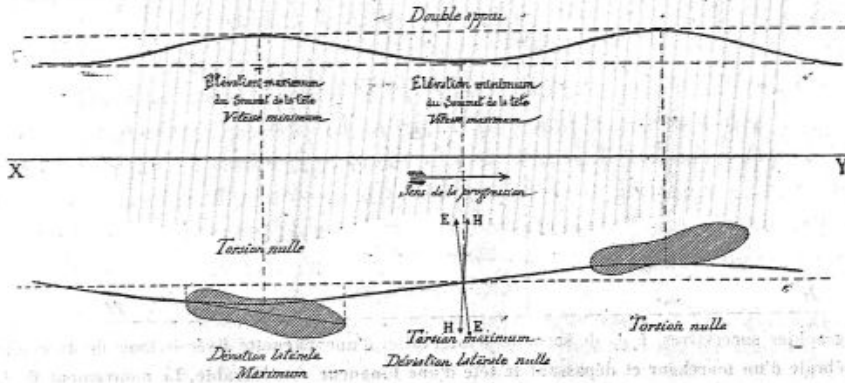
» Cet écart varie dans le même sens que l'écartement des empreintes des talons; il lui est sensiblement égal et diminue lorsque la longueur du pas augmente.

» L'écart latéral est nul pendant le double appui; à ce moment la trajectoire du sommet de la tête se projette horizontalement sur la ligne moyenne de progression (fig. 6).

pas comme l'écartement des empreintes des pieds sur le sol.

» L'écart latéral est nul pendant le milieu de la suspension; à ce moment la trajectoire de la tête croise la ligne moyenne de progression (fig. 7).

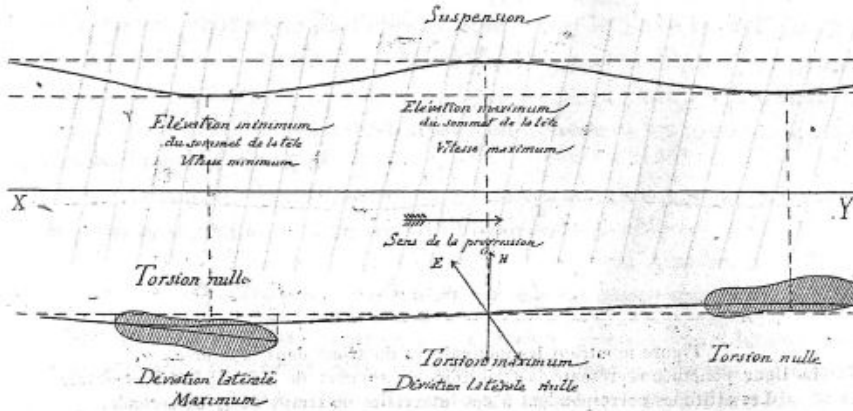
Fig. 6.



Projections horizontale et verticale de la trajectoire du sommet de la tête d'un marcheur pendant un pas.

On voit la position des pistes par rapport à la projection horizontale de la trajectoire, l'inclinaison de l'axe du pied et la corrélation entre la déviation latérale, l'élévation de la tête, la variation de vitesse et la torsion du tronc.

Fig. 7.



Projections horizontale et verticale de la trajectoire de la tête d'un coureur, montrant, par la comparaison avec la figure précédente, les différences entre les divers mouvements du tronc dans la marche et la course.

TORSIONS DU TRONC SUIVANT L'AXE VERTICAL.

1. *Mouvement de l'axe transversal du bassin en projection horizontale.*

» Dans la marche, la hanche est portée en avant, en même temps que le membre inférieur oscillant, tandis que la hanche opposée correspondant au membre à l'appui reste en arrière.

» Il en résulte une torsion dont le maximum, 9° environ, a lieu au moment du double appui et coïncide avec le minimum d'élévation du corps au-dessus du sol.

» La torsion du bassin est nulle pendant l'appui unipédal et au moment d'élévation et d'écart latéral du tronc (*fig. 6*).

» Dans la course, la torsion du bassin est moins considérable que dans la marche; son maximum a lieu au milieu de la suspension du corps.

» La torsion est nulle au milieu de l'appui et pendant l'élévation minimum du corps au-dessus du sol. Elle diminue avec la rapidité de l'allure (*fig. 7*).

2. *Mouvement de l'axe des épaules en projection horizontale.*

» Le mouvement de l'axe des épaules se fait en sens inverse de celui de l'axe du bassin. Il est de même sens que la projection des membres supérieurs. La torsion est maximum en même temps que la torsion inverse de la ligne des hanches.

» Mais sa valeur absolue est plus grande : de 12° environ dans la marche au moment du double appui, il peut s'élever à 45° dans la course au milieu de la suspension du corps.

» La torsion de l'axe des épaules est nulle en même temps que celle du bassin quand les bras passent par la verticale; elle augmente avec la vitesse de progression.

TORSIONS DU TRONC SUIVANT L'AXE HORIZONTAL ANTÉRO-POSTÉRIEUR.

Mouvement de la ligne des hanches et de la ligne des épaules en projection verticale.

» La ligne des hanches s'abaisse du côté de la hanche suspendue, et ce mouvement subsiste à toute allure marchée et courue.

» La ligne des épaules se relève du côté de la hanche suspendue, et ces deux mouvements sont synchrones.

» La torsion des épaules est plus faible dans la course que dans la marche et devient presque nulle dans une course rapide.

MOUVEMENTS DE TOTALITÉ DU TRONC.

Balancement d'avant en arrière.

- » Le corps s'incline en avant pendant la première moitié de l'appui et en arrière pendant la seconde moitié.
- » Ce mouvement est insensible dans la marche (*fig. 4*); plus accentué dans la course (*fig. 5*), il s'exagère avec la longueur du pas, mais n'excède pas 5 degrés dans les allures ordinaires.

Balancement latéral.

- » Dans la marche normale et la course modérée, les mouvements latéraux du tronc sont des mouvements de translation dans lesquels l'axe du tronc reste parallèle à lui-même et se transporte latéralement à chaque appui du pied d'une quantité indiquée dans la projection horizontale du sommet de la tête (*fig. 6 et 7*). Ce balancement a pour raison l'écartement des empreintes des pieds et se combine avec le mouvement d'inclinaison du tronc en avant et en arrière.
- » Nous pouvons maintenant expliquer les différences que nous présentait en projection verticale les trajectoires de la tête de l'épaule et de la hanche d'un marcheur. On a superposé, dans la *fig. 8*, les portions cor-



Comparaison des projections verticales des trajectoires du sommet de la tête, de l'épaule et de la hanche.

On voit que la tête occupe constamment une position intermédiaire entre les positions correspondantes de l'épaule et de la hanche marquées par les mêmes chiffres.

respondantes de ces trajectoires en faisant coïncider les images n° 6 qui correspondent à la torsion nulle du tronc ainsi que les horizontales menées par les points correspondants. On voit que l'épaule est toujours en avant de la tête quand la hanche est en arrière, et inversement; en outre, que le point milieu de la ligne qui joint l'épaule à la hanche a un mouvement presque identique à celui du sommet de la tête. Ce dernier point n'est, en effet, influencé par aucun des mouvements de torsion du tronc qui modifie la trajectoire de l'épaule et de la hanche.

(9')

» Il n'y a que le balancement d'avant en arrière qui pourrait modifier sa trajectoire et faire donner aux mesures de la variation de vitesse horizontale des valeurs trop grandes. Mais ce mouvement est assez faible dans la marche pour que nous soyons autorisés à considérer le mouvement du sommet de la tête comme se rapprochant le plus de celui du centre de gravité du corps.

» Néanmoins, comme le centre de gravité se déplace dans le corps à chaque attitude, il n'y a que la détermination expérimentale directe du déplacement du centre de gravité qui permette de corriger la trajectoire du sommet de la tête et de la rapprocher davantage de celle du centre de gravité. Dans une autre Communication M. Demeny montrera comment se fait cette correction et comment elle influe surtout sur la valeur réelle des réactions verticales du tronc. »

*Des mouvements de la natation de l'anguille,
étudiés par la Chrono-photographie.*

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CVII;
séance du 22 octobre 1888.

« Dans la dernière séance, j'ai indiqué une modification de la Photo-chronographie qui permet de recueillir les silhouettes successives d'un poisson se détachant sur le champ clair d'un aquarium éclairé par-dessous. M. Corblin et moi, nous avons opéré sur différentes sortes de poissons et en particulier sur l'anguille, qui nous a donné les résultats suivants.

» Quand on juxtapose les images successivement recueillies à des intervalles de $\frac{1}{10}$ de seconde, on constate (*fig. 1*) que l'anguille a notablement progressé et que les courbures de son corps ont changé entre deux images successives. On peut suivre, de la tête à la queue de l'animal, le transport d'ondes qui semblent se mouvoir avec assez d'uniformité. Pour mesurer exactement la vitesse de translation de l'anguille et celle de ses ondes, nous avons tracé quelques lignes sur la figure.

» Deux lignes droites ponctuées *aa'* et *bb'* joignant l'une les têtes, l'autre les queues dans toutes les images, montrent, par leur parallélisme, que les deux extrémités de l'animal progressent uniformément.

» L'anguille avait 0^m,30 de longueur, ses inflexions la réduisaient à 0^m,29.

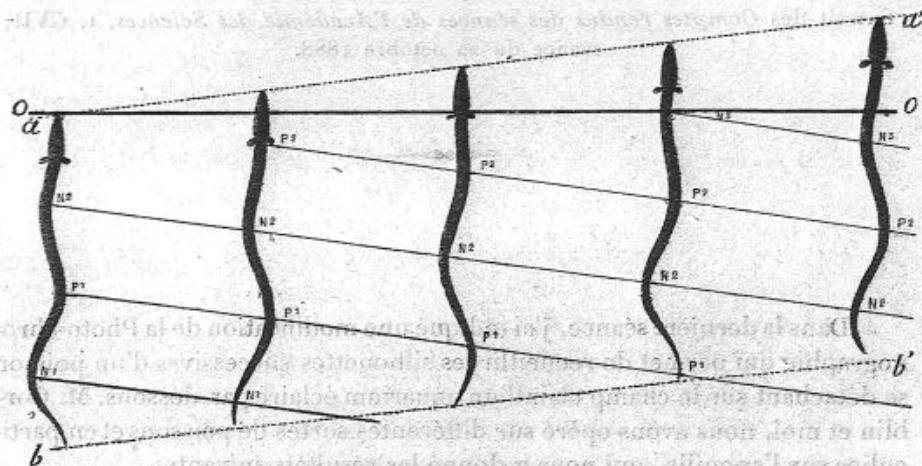
» Pour apprécier la vitesse de translation, on a tracé une droite *OO* qui, dans toutes les images, passerait par un même point du fond de l'aquarium et qui, par conséquent, exprime l'origine du mouvement.

» L'angle que la ligne *aa'*, joignant les têtes dans les images successives,

fait avec la ligne OO permet d'apprécier la vitesse de progression : cette vitesse était de $0^m,019$ en $\frac{1}{10}$ de seconde, soit $0^m,19$ par seconde.

» Pour apprécier la vitesse de progression des ondes, on a dû construire d'autres lignes. Si l'on se reporte à la première image à gauche de la figure et que l'on suive le contour du côté droit de l'anguille, on y trouve une onde positive ou convexe P^1 entre deux ondes négatives ou concaves

Fig. 1.



N^1 et N^2 . Ces ondes, qui alternent de part et d'autre de l'axe du mouvement du poisson, sont parfaitement reconnaissables dans les images successives qui s'échelonnent en allant vers la droite de la figure; ces ondes s'évanouissent tour à tour en arrivant à l'extrémité de la queue.

» Or, si l'on joint par une ligne les positions qu'occupe le centre de l'onde positive P^1 dans la série des images, on voit que tous ces centres sont situés sur une même droite. Il en est de même si l'on réunit entre eux les centres des ondes négatives N^1 et N^2 . Enfin les nouvelles ondes P^2 et N^3 qui se forment dans les images suivantes se comportent de même.

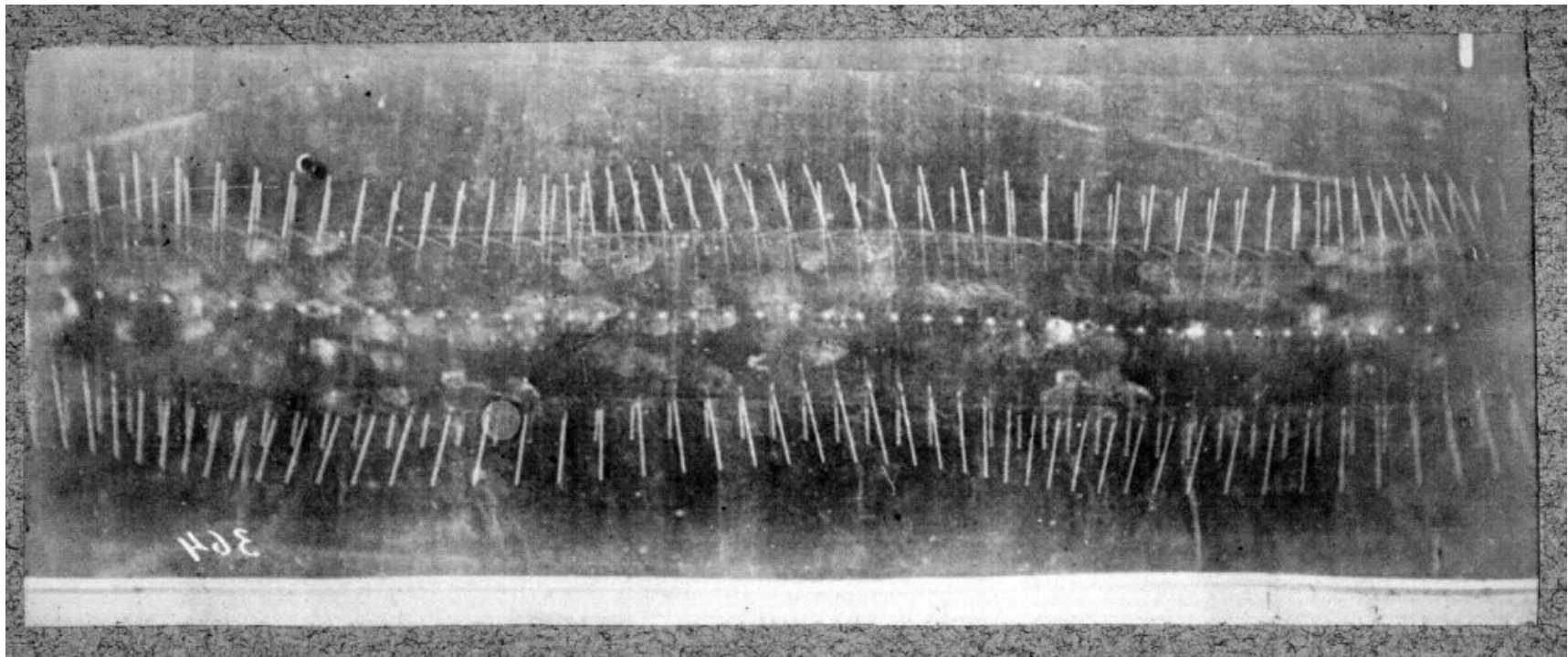
» Toutes les lignes ainsi tracées sont parallèles entre elles et séparées les unes des autres par un intervalle constant, qui était de $0^m,07$ pour une demi-onde, soit $0^m,14$ pour une onde entière.

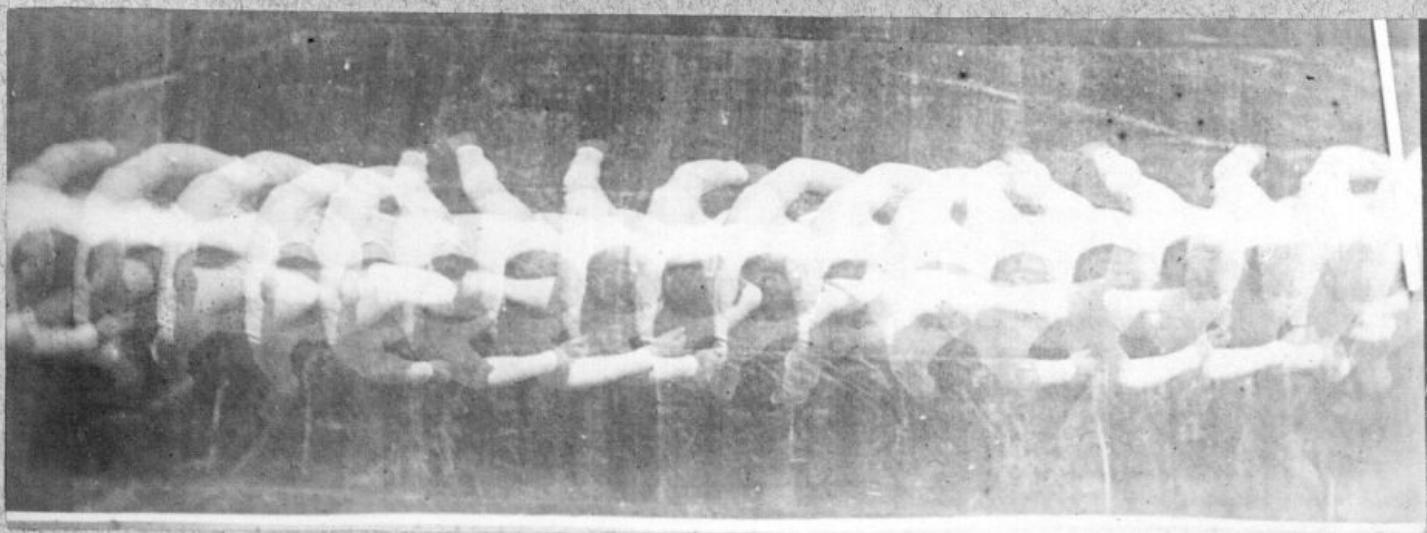
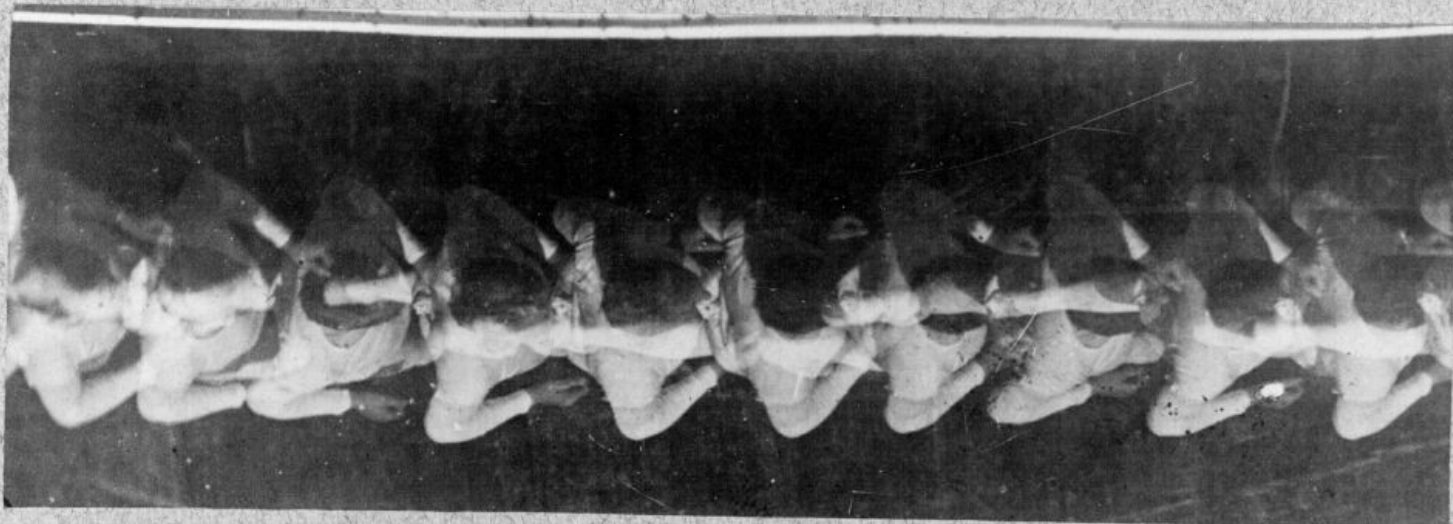
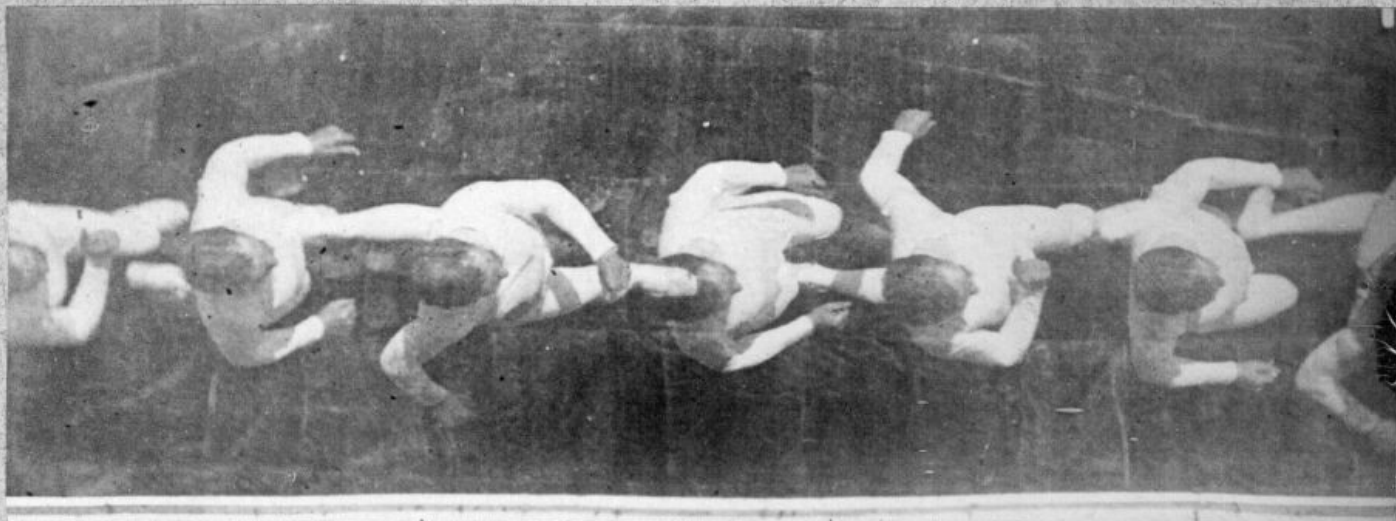
» Enfin, si l'on cherche le temps qu'une onde a mis à parcourir sa propre longueur, on trouve, en se reportant à la ligne OO , qui représente

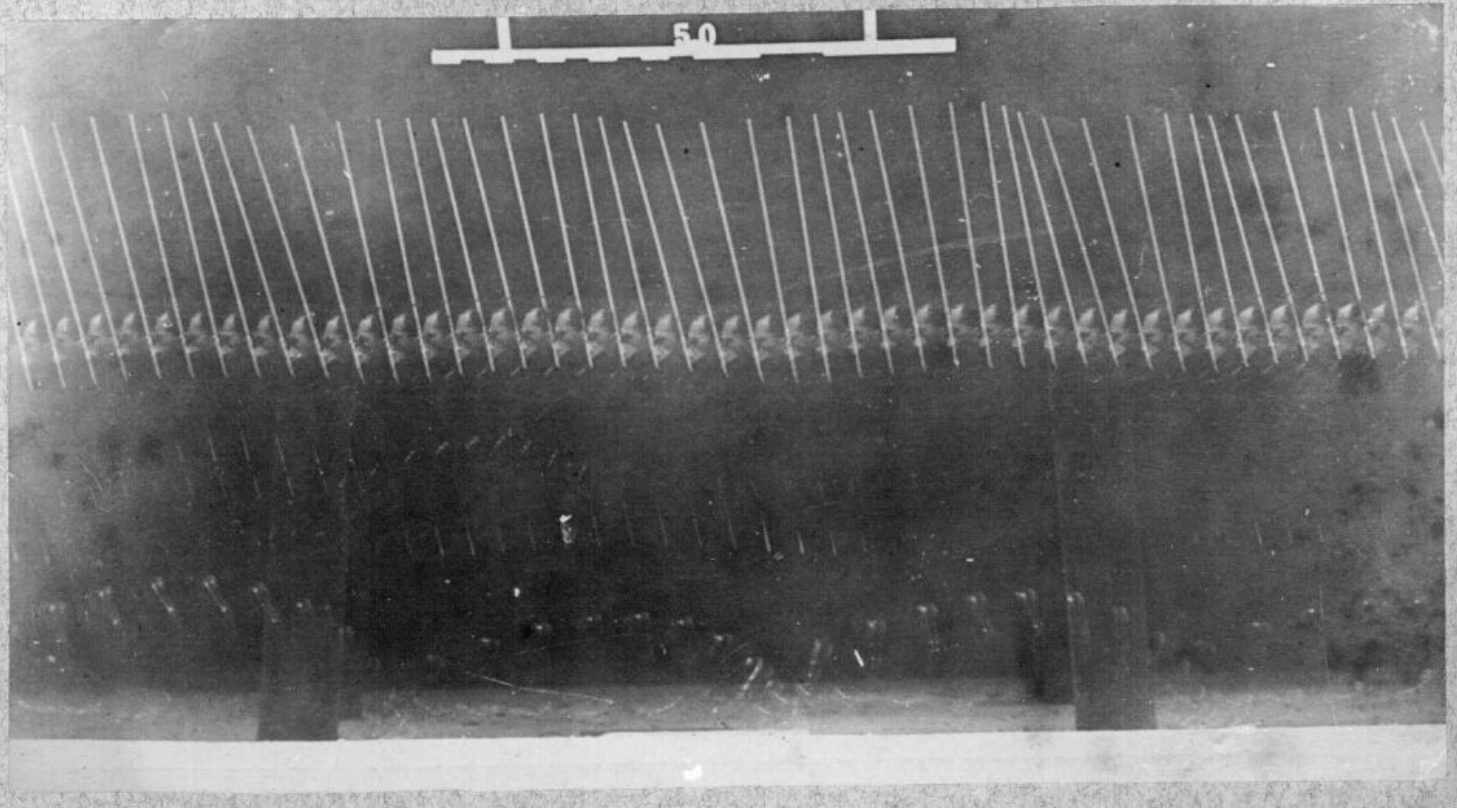
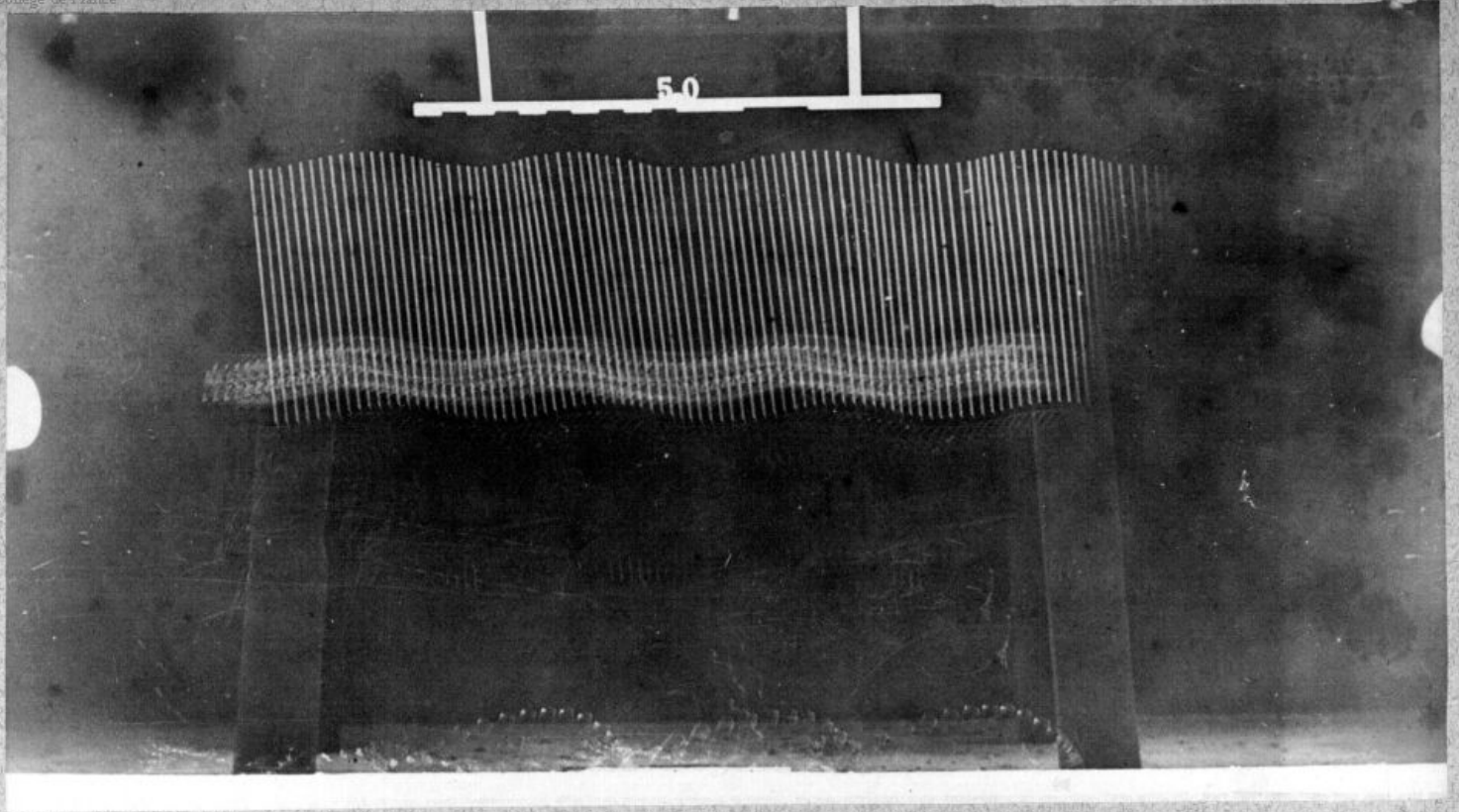
l'origine du mouvement, que ce parcours exige pour s'effectuer deux tiers de seconde.

» De sorte que l'onde chemine d'avant en arrière avec une vitesse de $0^m,21$ par seconde, tandis que le poisson ne progresse dans le même temps que de $0^m,19$. Il y a là un effet assimilable au recul des hélices propulsives. »









*Étude des déplacements du centre de gravité dans le corps
de l'homme pendant les actes de la locomotion;*

PAR M. DEMENY.

« Dans les essais que nous avons faits en collaboration avec M. Marey pour déterminer la valeur des forces d'impulsion et celle du travail mécanique dépensé dans la locomotion de l'homme, nous avons sciemment commis des erreurs en nous servant seulement des données cinématiques fournies par la photo-chronographie. Nous avons, en effet, appliqué au mouvement du sommet de la tête des calculs qui ne sont vrais que pour le mouvement du centre de gravité de la masse entière du corps.

» La position du centre de gravité dans le corps humain varie, il est vrai, à chaque mouvement des membres, mais il suffirait de connaître, à chaque instant, la valeur relative de son déplacement par rapport au sommet de la tête pour déduire de la trajectoire de ce sommet, connue exactement par la photo-chronographie, la trajectoire inconnue du centre de gravité. Dans ce but, nous avons construit un instrument de mesure, qui donne facilement, pour une attitude quelconque, la position du centre de gravité dans le corps de l'homme.

» Cet instrument se compose d'un lit de sangle pouvant osciller sur des couteaux, autour de deux axes horizontaux et rectangulaires, constituant une suspension de Cardan très mobile. Pour déterminer la quantité dont le centre de gravité du corps se déplace dans le plan vertical et dans les deux sens vertical et horizontal, quand on passe de l'attitude droite à une autre attitude de la marche, de la course ou du saut, on opère de la manière suivante :

» On place le sujet sur le lit dans l'attitude allongée, et couché sur le flanc, de façon que le centre de gravité soit sur la verticale passant par le

D.

croisement des deux axes de suspension. Ceci se voit facilement au moyen d'un long index oscillant avec tout le système au devant d'un repère. Le sujet en expérience prend ensuite une attitude désignée; l'index est dévié : on rétablit l'équilibre au moyen de poids marqués, placés sur le cadre du lit et dont le moment est connu.

» Si P est le poids du corps, p le poids additionnel agissant au bout d'un bras de levier de 1^m , la quantité dont se déplace le centre de gravité dans le corps en passant de l'attitude allongée, comme celle de la station à une attitude quelconque, sera représentée par le rapport $\frac{P}{p}$. Cela aura lieu pour les deux sens rectangulaires déterminés par la position de l'homme sur le lit et par la direction des deux axes des couteaux de suspension.

» *Déplacement vertical du centre de gravité.* — Les mesures que nous avons faites avec cette balance nous ont montré quelques faits intéressants.

» Les déplacements du centre de gravité dans les attitudes différentes de la marche, de la course et du saut sont loin d'être négligeables dans la mesure du travail par les données cinématiques. Au moment du double appui, les deux jambes écartées, la tête est abaissée au maximum; mais le centre de gravité est alors élevé dans cette attitude de 3^{cm} à 4^{cm} . D'autre part, au moment du maximum d'élévation de la tête, c'est-à-dire au milieu de l'appui d'un pied, la jambe suspendue est légèrement fléchie et par suite le centre de gravité n'est élevé que de 15^{mm} environ.

» La valeur réelle de l'oscillation du centre de gravité, dans un pas de marche, chez un sujet moyen et normal, et dans le cas considéré, sera donc égale à la valeur apparente de l'oscillation du sommet de la tête, soit 5^{cm} diminués de la différence des deux déplacements précédents ($4^{cm} - 1^{cm},5$), c'est-à-dire $2^{cm},5$ environ.

» Dans la course, au contraire, les oscillations verticales du centre de gravité sont plus grandes que celles que nous avons indiquées (¹). Au moment du minimum d'abaissement de la tête, qui a eu lieu pendant l'appui, le centre de gravité est élevé de 2^{cm} et dans l'attitude de la suspension de 4^{cm} environ. La différence 2^{cm} ajoutée à la valeur de l'oscillation de la tête, qui est 3^{cm} pour le rythme 120 pas à la minute, représente la valeur de l'oscillation réelle du centre de gravité.

» Dans le saut, le déplacement vertical du centre de gravité peut aller

(¹) M. et D., *Mesure du travail dans la locomotion humaine.*

jusqu'à 18^{cm} lorsque le sauteur se ramasse en élevant les bras pendant la suspension et nous avons vu (1) de combien la trajectoire de la tête diffère de la parabole décrite par le centre de gravité. La hauteur du saut est non pas la hauteur à laquelle s'élève la tête, mais cette hauteur augmentée de la quantité dont se déplace verticalement le centre de gravité dans le corps par suite de l'attitude.

» *Déplacement du centre de gravité en avant et en arrière.* — La symétrie du mouvement des membres est assez grande pour que, dans la marche, le centre de gravité soit déplacé en avant et en arrière de quantités négligeables.

» Mais, dans la course et le saut, le centre de gravité, pendant la fin de l'appui qui précède la suspension du corps dans l'espace, est projeté fortement en haut et en avant par le fait de l'impulsion propre du membre à l'appui et aussi par la simple projection des membres libres (bras et jambe suspendus).

» La vitesse horizontale du centre de gravité est, en ce moment, plus grande que ne l'indique la photographie; mais cela ne change pas les calculs, qui sont basés sur les valeurs minimum et maximum de la vitesse, le minimum étant mesuré au milieu de l'appui, le maximum au milieu de la suspension, c'est-à-dire quand le déplacement du centre de gravité en avant est nul, ou quand les mouvements des membres sont faibles.

» Les déplacements soudains du centre de gravité en avant ou en haut, par le fait du brusque changement d'attitude, ont tous pour résultat d'exagérer, au moment du départ du saut, la tension des muscles extenseurs du membre à l'appui et, par une action plus énergique de ce dernier, d'accélérer la vitesse de départ ou de ralentir celle d'arrivée au moment de la chute.

» Le rôle du balancement des bras dans la marche et la course est aussi d'amener le centre de gravité du corps latéralement du côté du membre à l'appui, et de diminuer ainsi les oscillations latérales du tronc, qui dépendent, comme nous l'avons vu (2), de l'écartement des empreintes des pieds sur le sol. Le balancement des bras n'est pas, en effet, une simple oscillation d'avant en arrière, mais un mouvement oblique. Le bras gauche est projeté en arrière et à gauche au moment du posé du pied gauche, tandis que le bras droit est projeté en avant et également à gauche.

(1) M. et D., *Mécanisme du saut.*

(2) M. et D., *Mouvements du tronc dans la marche et la course.*

» En résumé, dans la locomotion humaine, les changements d'attitude ont pour résultat de donner à la trajectoire du centre de gravité du corps une forme se rapprochant de la rectitude, ou bien d'augmenter l'effet utile des muscles considérés comme propulseurs ou comme amortisseurs, en augmentant leur tension.

» Il est probable que la synergié des mouvements est toujours, inconsciemment ou non, guidée par la recherche de l'effet utile maximum obtenu avec le maximum de dépense possible.

» Il est probable aussi que cette loi d'économie se trouve réalisée chez tous les animaux avec une perfection plus ou moins grande, que l'étude approfondie de la locomotion comparée pourra mettre en lumière d'une façon précise et pleine d'intérêt.

(17 octobre 1887.)



Étude de la locomotion humaine dans les cas pathologiques;

PAR MM. QUÉNU ET DEMENY.

« Pour que la locomotion soit normale, il ne suffit pas que tous les appareils qui entrent en jeu aient gardé leur intégrité anatomique, il faut encore que les muscles coordonnent leur action et que les centres nerveux interviennent et assurent l'harmonie des mouvements.

» Les causes qui peuvent altérer les caractères de la marche sont donc très complexes; de plus, en clinique, elles s'ajoutent dans des proportions variables. Il en résulte que, pour une affection initiale identique, l'altération de la marche peut être différente : un malade atteint de fracture de jambe ancienne peut boiter par douleur dans son foyer de fracture, par raideur plus ou moins grande des jointures voisines du cal ou par impotence des muscles atteints secondairement d'atrophie.

» Une boiterie n'est donc pas toujours chose simple, mais plus souvent le résultat de vices fonctionnels multiples, que la Pathologie a, du reste, permis de prévoir.

» L'observation d'une claudication par la simple vue nous permet difficilement de faire une analyse détaillée des différentes données du problème : nous caractérisons la forme d'une claudication en empruntant des termes de comparaison, en disant d'un malade qu'il a la démarche du maquignon, d'un palmipède, qu'il fauche, etc.; il nous est difficile d'aller plus loin.

» Or, sans espérer y trouver à coup sûr des enseignements diagnostiques et encouragés par notre bienveillant Maître, le professeur Marey, il nous a semblé qu'on pourrait tenter de combler une lacune et esquisser une physiologie pathologique de la marche en appliquant à l'étude de la marche anormale les méthodes de la photochronographie et de la dyna-

Q. et D.

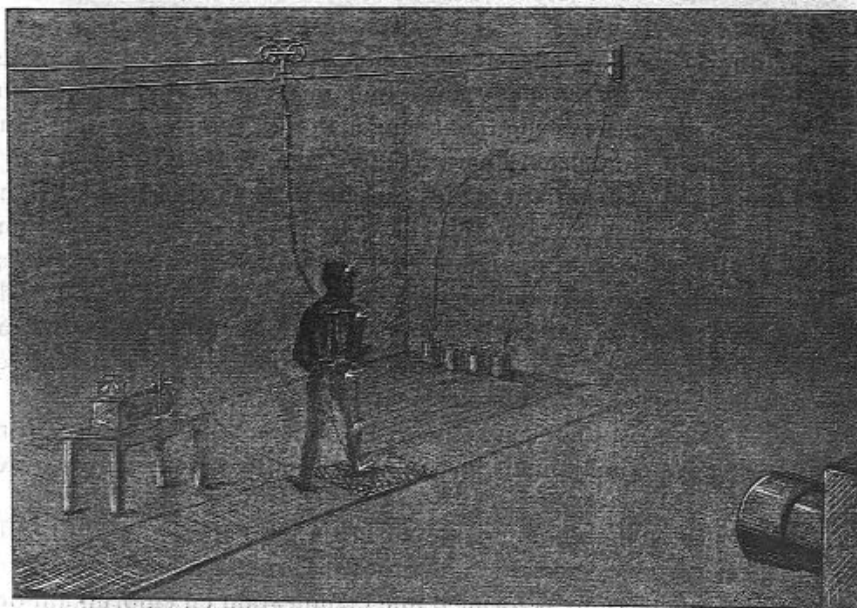
(2)

mographie, dont M. Marey a su tirer un si grand parti dans ses recherches sur la locomotion en général.

» Cependant, en raison de la difficulté de trouver des sujets d'observation en dehors des hôpitaux, il nous a fallu modifier la technique. En opérant dans des locaux fermés, il n'était plus possible d'obtenir des images photographiques successives et complètes de l'homme en mouvement, car nous n'avions ni la lumière solaire, ni le fond noir nécessaires.

» Nous avons eu recours aux photographies partielles ⁽¹⁾ et employé comme points lumineux des lampes électriques à incandescence, dont le pouvoir photogénique avait déjà été utilisé par M. Soret, de Genève.

Fig. 1.



Installation faite à l'hôpital Beaujon pour l'analyse de la locomotion pathologique. Le malade marche dans la lumière rouge devant l'appareil photochronographique; il porte des lampes à incandescence et est représenté au moment où il appuie le pied sur le dynamomètre enregistreur.

» Nous avons attaché ces lampes aux points du malade dont il importe d'avoir la trajectoire, tels que le sommet de la tête, l'épaule, la hanche, le genou et la cheville. Montées en dérivation, ces lampes communiquent

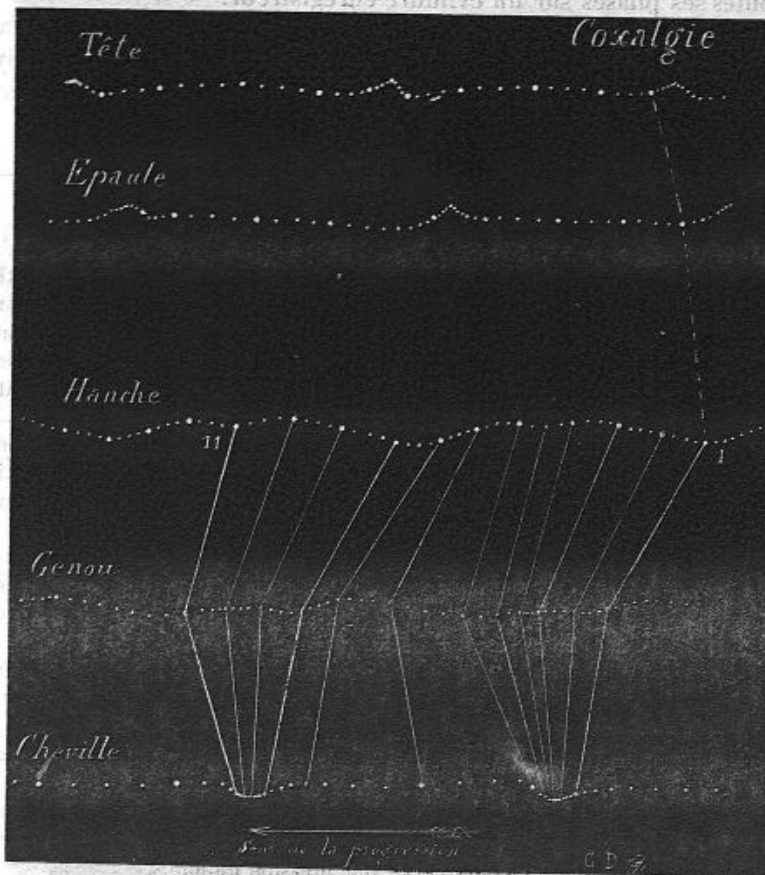
(1) MAREY, *Comptes rendus*, t. XCVI, 25 juin 1883.

(3)

avec la pile par un seul câble élastique allant du dos du sujet à un petit chariot métallique roulant sur des fils de cuivre au-dessus de sa tête et le laissant ainsi libre de ses mouvements (fig. 1).

On opère dans la lumière rouge afin que la plaque photographique ne

Fig. 2.



Reproduction d'une épreuve obtenue en photographiant pendant la marche un coxalgique à qui on avait attaché cinq lampes à incandescence pour désigner les articulations du membre inférieur, ainsi que l'épaule et la tête.

On a réuni par des traits les points correspondant à une même image.

soit impressionnée que par les points très brillants formés par les lampes, et l'on a ainsi une épreuve très nette des trajectoires du sommet de la tête, de l'épaule, de la hanche, du genou et de la cheville. Ces trajectoires sont

ponctuées, car les images sont prises au moyen du disque éclairé à tous les $\frac{1}{20}$ de seconde (*fig. 2*).

» Un dynamographe à spirales de tube de caoutchouc⁽¹⁾ est noyé dans la piste parcourue par le malade. Quand ce dernier pose le pied sur la planchette de l'instrument, un tracé de la pression de son membre s'inscrit avec toutes ses phases sur un cylindre enregistreur.

» On possède ainsi les éléments de la marche sur lesquels porte l'altération pathologique, et les données expérimentales cinématiques et dynamiques se complètent l'une par l'autre. Il existe d'ailleurs entre elles des relations connues⁽²⁾.

(1) MAREY, *Comptes rendus*, t. XCVI, séances des 8 et 15 octobre 1883.

(2) Deux expériences faites pour le côté sain et le côté malade du sujet font connaître la durée du lever et de l'appui du pied, la durée du double appui, le rythme, les phases de la pression du pied pendant l'appui, la longueur du pas, les oscillations verticales du tronc, l'angle de déroulement et d'oscillation du membre inférieur, la forme des trajectoires des points remarquables, les variations de la vitesse de ces points, le degré de flexion ou d'allongement des membres, ainsi que les oscillations du tronc.

La pression normale du pied sur le sol dépend de la vitesse du déplacement vertical du centre de gravité du corps. Cette pression est tantôt inférieure et tantôt supérieure au poids du corps, et l'excès de la pression normale sur ce poids est proportionnel à l'accélération du mouvement vertical du centre de gravité.

Ainsi le dynamographe n'indique aucune pression supérieure au poids si la trajectoire du centre de gravité est une ligne droite horizontale ou si le mouvement vertical du centre de gravité est un mouvement uniforme; il y a alors égalité entre le poids du corps et l'action verticale du membre inférieur.

Le dynamographe accuse une pression constante et supérieure au poids du corps si le mouvement vertical du centre de gravité est uniformément accéléré ascendant ou retardé descendant.

Les muscles extenseurs font dans le premier cas du travail moteur, dans le second du travail résistant.

Si le mouvement vertical du centre de gravité était uniformément accéléré descendant ou uniformément retardé ascendant, les choses se passeraient comme dans la chute libre et le dynamographe indiquerait une pression nulle.

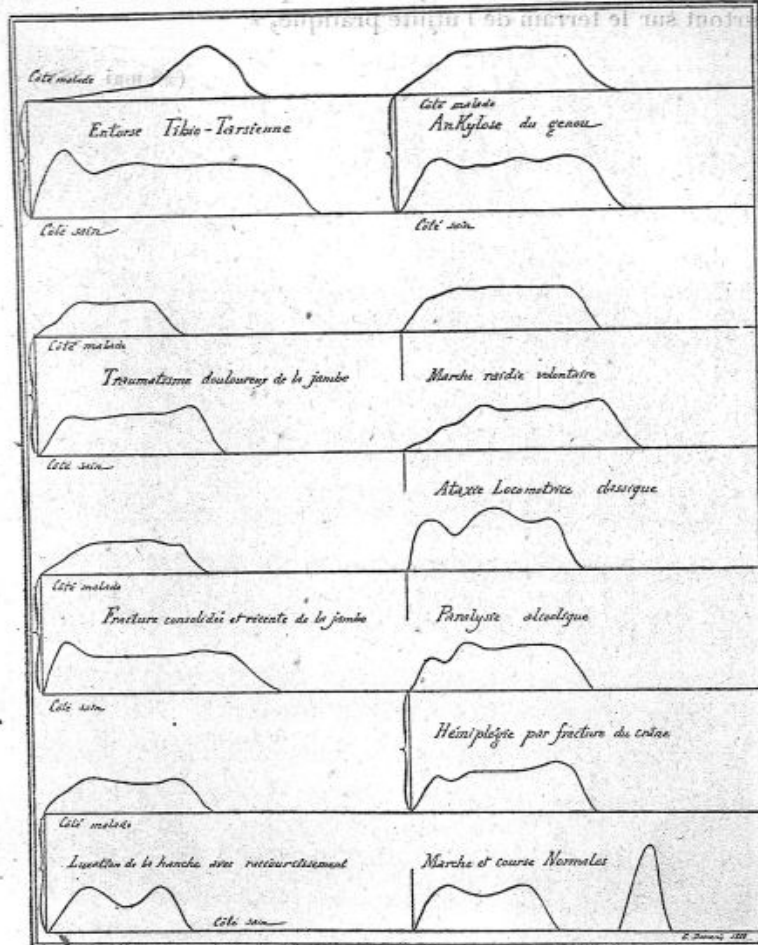
Si le mouvement vertical du centre de gravité est varié, sans être uniformément varié, les courbes du dynamographe sont sinueuses et ces inflexions sont celles de la courbe de l'accélération du mouvement vertical. Mais il faut avoir soin de remarquer que l'instrument ne distingue pas, pour les pressions excédant le poids du corps, si elles sont dues à une extension active du membre à l'appui, ou à un effort résistant de la part de ce membre, résistance accompagnée cependant d'une flexion.

C'est en tenant compte de ces observations que l'on peut comparer les inflexions de la courbe du dynamographe à celles des trajectoires photochronographiques.

(5)

Quand on étudie différents types de claudication au moyen de ces méthodes, on voit que chaque type bien caractérisé a des trajectoires et des tracés bien définis et que ces documents diffèrent entre eux suivant les cas.

Fig. 3.

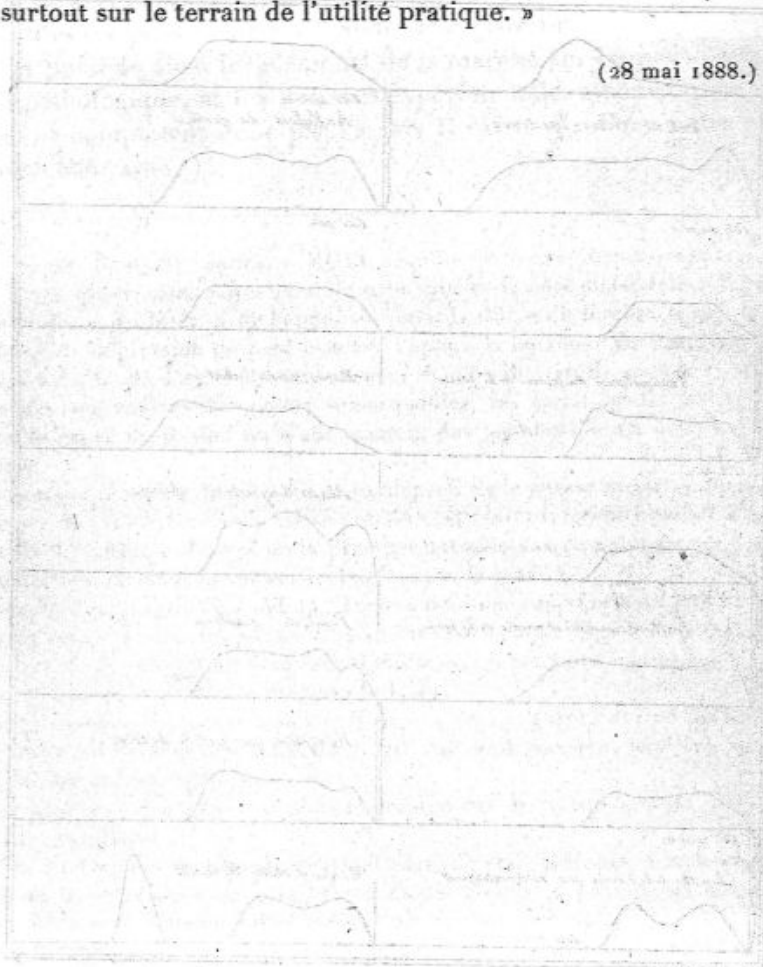


Formes différentes des-tracés de la pression du pied sur le sol recueillis dans divers cas de claudication.

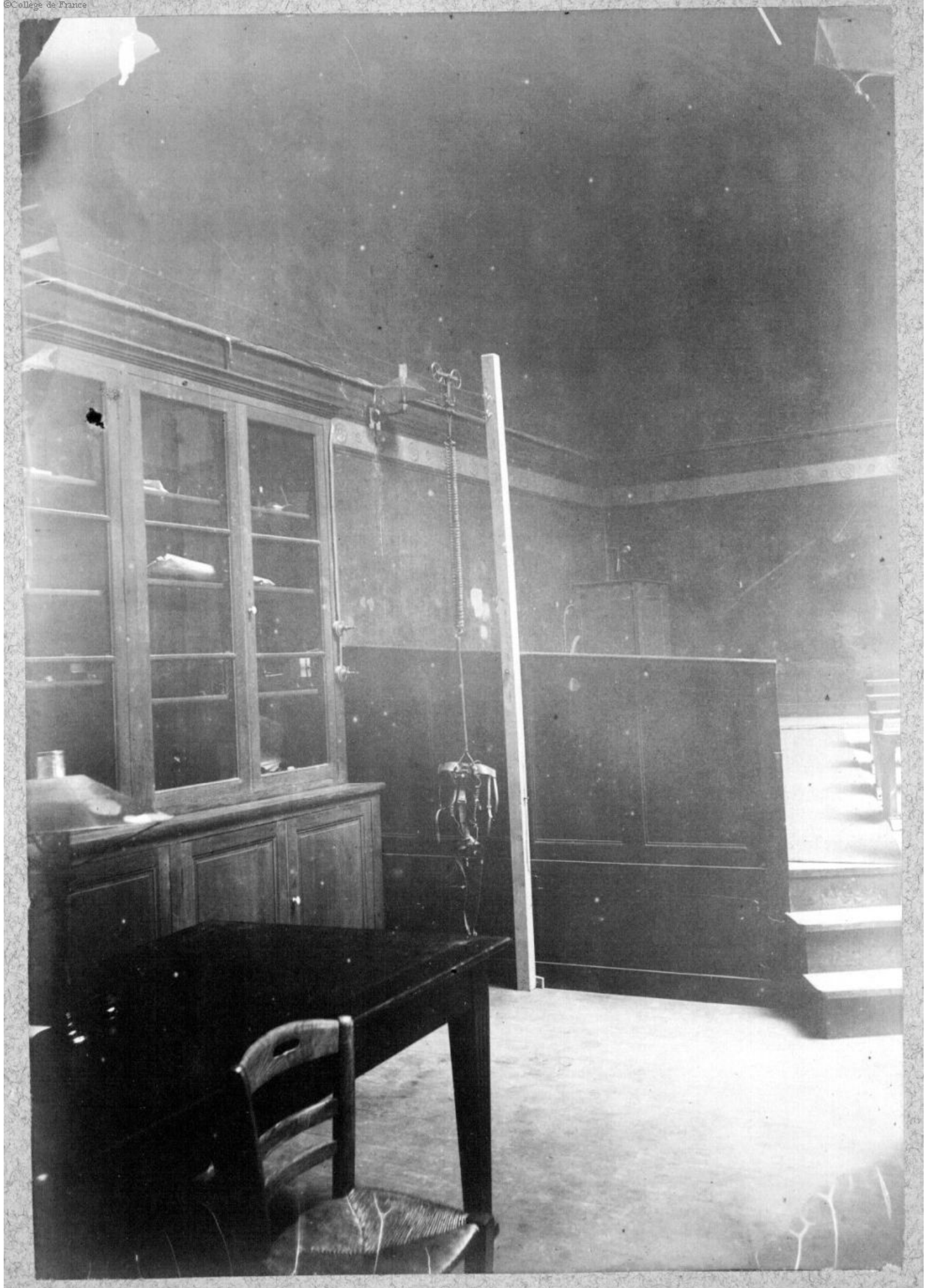
» Nous nous bornons à présenter aujourd'hui quelques tracés donnés par le dynamographe dans des cas différents (fig. 3) (affections chirurgi-

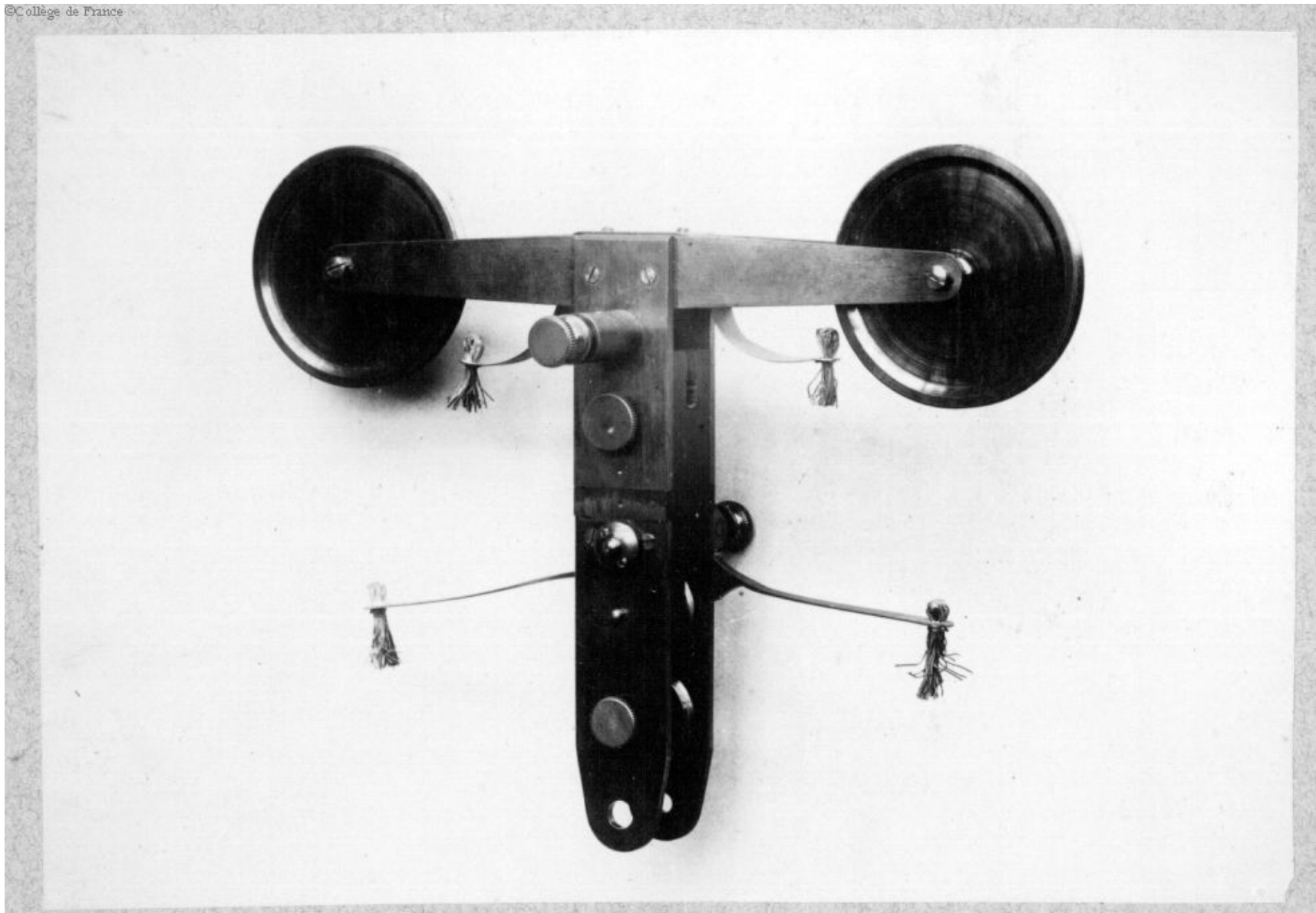
cales et maladies du système nerveux, telles que ataxie locomotrice, hémiplegie, etc.).

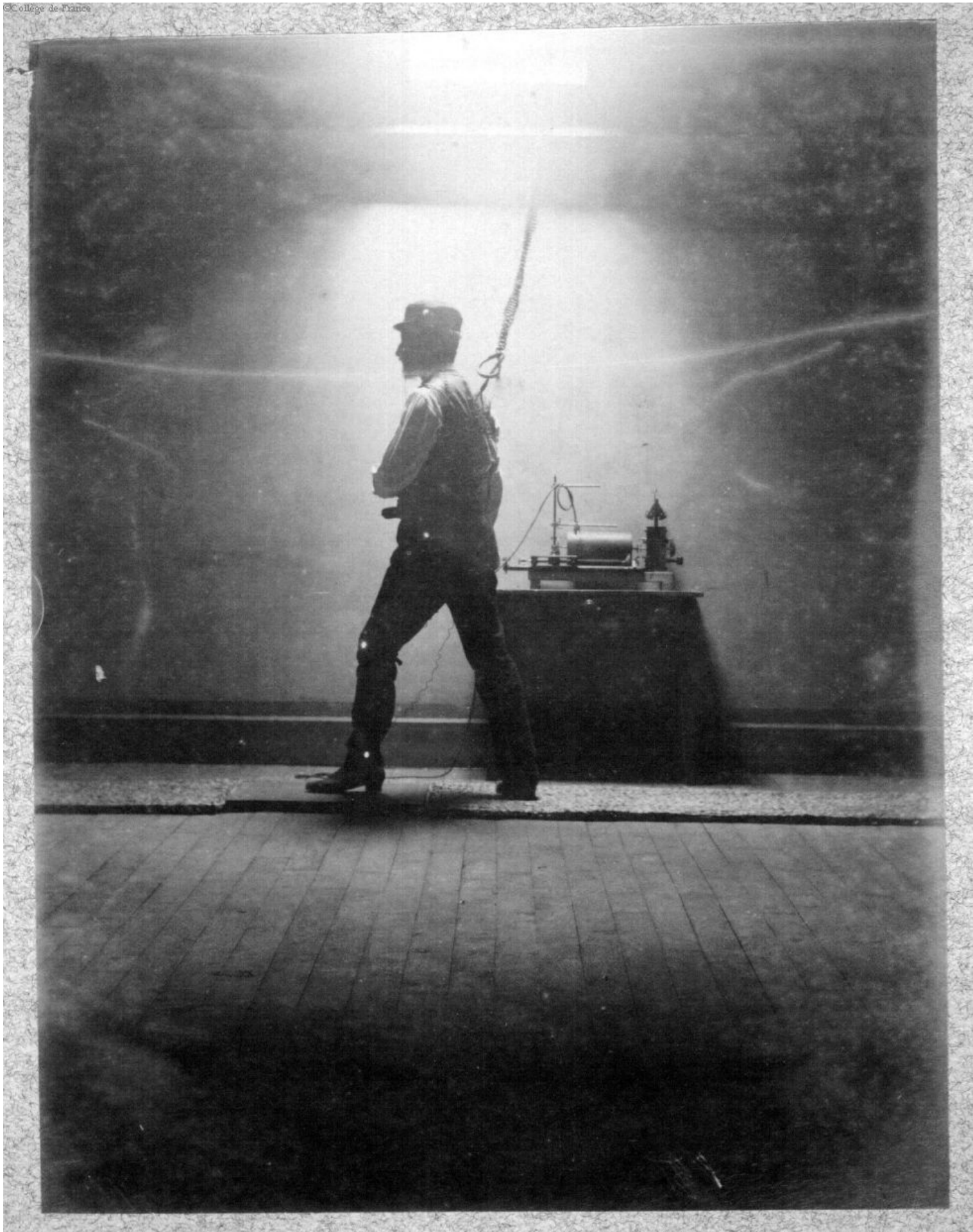
» Nous nous proposons d'analyser les résultats des nombreuses observations déjà faites, de les compléter par de nouvelles études et de communiquer les résultats intéressants que nous espérons obtenir, en nous plaçant surtout sur le terrain de l'utilité pratique. »

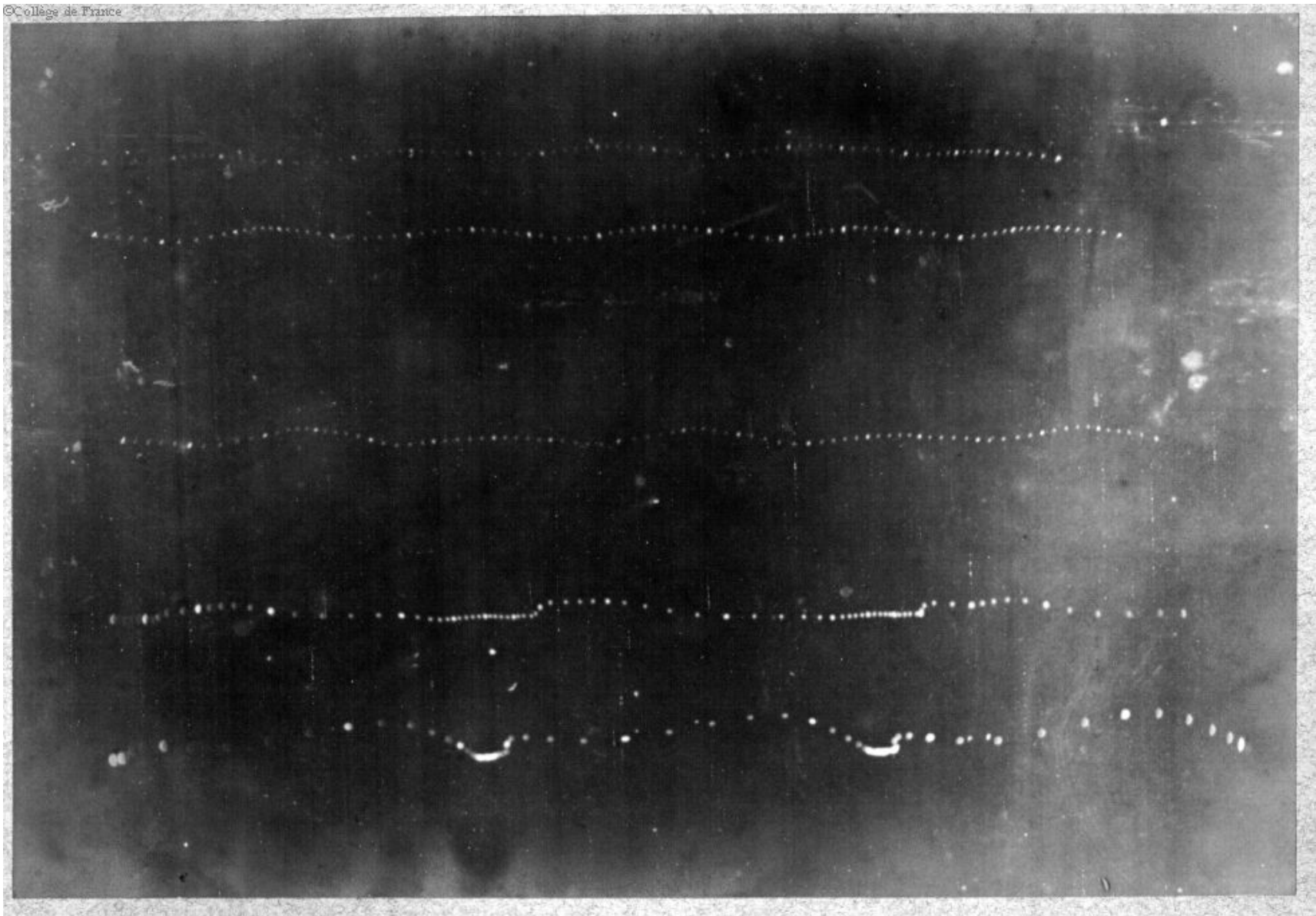


Gauthier-Villars et fils, imprimeurs-libraires des Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences.
Paris. — Quai des Grands-Augustins, 55.









De la locomotion dans l'ataxie locomotrice;

PAR MM. DEMENY ET QUÉNU.

« Nous présentons à l'Académie une étude basée sur l'observation de sept malades (1). Les résultats obtenus ont été assez constants pour que nous nous croyions autorisés à les considérer comme caractéristiques, au moins de la période d'état de l'ataxie locomotrice.

1° Étude par les procédés photochronographiques.

» *Trajectoire de la hanche.* — Dans la marche normale, la trajectoire de la hanche pendant l'appui est franchement convexe; dans l'ataxie, elle se rapproche de l'horizontale; les images successives sont condensées, rapprochées, ce qui indique un ralentissement sensible de la vitesse.

» Au début du lever, la trajectoire de la hanche présente une élévation brusque, puis une dépression qui ne se rencontre jamais dans les tracés normaux; enfin elle est surbaissée au moment de l'appui.

» La *trajectoire du genou*, pendant l'appui, se rapproche plus de l'horizontale que dans l'état normal; mais le vrai caractère chez l'ataxique, c'est que, un peu avant le poser du pied, la trajectoire du genou s'élève fortement et tardivement pour s'abaisser tout d'un coup. Il y a là une sorte de

(1) Une première observation a été faite en 1887 dans le service de M. Pernet, à Beaujon. Les six autres malades nous ont été fournis par M. Dujardin-Beaumetz. Ces recherches ont été faites à l'Hôtel-Dieu, dans un laboratoire improvisé.

D. et Q.

chute brusque des plus remarquables, que nous retrouvons du reste dans la trajectoire des différentes articulations du membre inférieur.

» La *trajectoire de l'articulation tibio-tarsienne* ne présente rien de bien spécial au moment du lever ; il n'en est pas de même dans le moment qui précède l'appui : d'abord plus élevée que dans la marche normale, elle s'abaisse presque verticalement en présentant une boucle dont le dernier élément a un sens rétrograde et sort quelquefois du plan normal d'oscillation de la jambe.

» *Trajectoires de la tête et de l'épaule.* — Les pas étant petits, on ne constate que de petites oscillations verticales du tronc et une déformation peu apparente de la trajectoire de la tête. Le balancement du tronc en avant et en arrière est assez sensible ; les déformations de la trajectoire de l'épaule tiennent à une légère torsion du tronc autour de son axe.

» *Mouvements des segments.* — Pendant la *période d'appui du pied*, les mouvements du membre inférieur diffèrent peu de l'état normal, si ce n'est par leur étendue. Le déroulement de ce membre dans la marche est de 50° à 60° : 27° environ pour l'angle du poser, et 30° pour l'angle du lever dans la marche, au rythme 60.

» Chez l'ataxique, ces chiffres sont moindres : l'angle du poser est environ de 17° , l'angle du lever de 20° à 25° , ce qui fait un déroulement total de 37° à 42° environ ; la longueur du pas est donc diminuée.

» Le mouvement des segments du membre inférieur est à peu près le mouvement normal : dans celui-ci, en effet, la cuisse, au moment de l'appui, se fléchit en même temps que la jambe et s'étend avant celle-ci ; puis les deux segments s'étendent, et avant le lever la flexion de la jambe précède l'extension de la cuisse.

» Chez l'ataxique, la jambe se fléchit au moment du poser, pendant que la cuisse continue le mouvement d'extension violent que nous décrirons plus loin ; la jambe s'étend ensuite pendant un temps court, reste étendue, puis se fléchit légèrement, alors que la cuisse continue à s'étendre jusqu'à la fin de l'appui.

» La *durée de l'appui* du pied est plus longue que celle du lever d'une quantité qui mesure le temps du double appui. Cette durée est plus grande qu'à l'état normal. Aussi le malade précipite-t-il l'oscillation de son membre inférieur pendant le lever, circonstance qui ajoute encore à la brusquerie de sa démarche.

» La *phase de lever* du pied est celle qui se différencie le plus de la

marche normale. C'est dans cette phase que se manifestent les troubles causés par l'action désordonnée des muscles du membre inférieur. Ainsi, au début du lever il y a, comme à l'état normal, flexion de la cuisse sur le tronc et de la jambe sur la cuisse; mais, dans l'ataxie, la flexion de la jambe se prolonge et surtout se fait plus vivement que dans l'état normal. La flexion de la jambe est suivie immédiatement d'une extension brusque qui retentit sur la cuisse et diminue un peu la vitesse de flexion de celle-ci. Cette extension de la jambe, qui avait graduellement diminué d'intensité, subit encore un léger accroissement avant le poser du pied. Voici enfin ce qui a trait à la phase qui précède le poser.

» Dans la marche normale, la cuisse s'étend un peu avant le poser du pied, mais elle se fléchit ensuite, pendant que la jambe continue son extension, puis, au moment du poser du pied, elle accentue sa flexion en même temps que la cuisse se fléchit. Le pied se pose donc sans force, et en n'ayant qu'une très faible vitesse horizontale.

» Chez l'ataxique, la cuisse, qui avait cessé de se fléchir, s'étend brusquement, et, par le mouvement simultané d'extension de la jambe et de la cuisse, le pied se pose à terre en frappant le sol presque verticalement, quelquefois même en rétrogradant. Ce dernier mouvement d'extension de la cuisse peut être accompagné d'une légère abduction.

2° Étude par les tracés dynamographiques.

» Le dynamographe donne des tracés tout à fait caractéristiques. A l'état normal, le tracé présente deux maxima séparés par un minimum : on a donc successivement : une ascension, une légère descente, une autre ascension et enfin une descente plus brusque que la montée.

» Chez l'ataxique, la montée est plus lente; elle se fait en deux ou plusieurs temps. En outre, la ligne de plateau, au lieu de présenter un léger minimum (ce qui donne sur le tracé une courbe à concavité supérieure), se maintient près de la *ligne du poids* et présente une série d'oscillations. Ces oscillations très caractéristiques se manifestent encore quand le sujet se tient debout sur la planche du dynamomètre.

» Dans une autre forme, la montée est brusque, verticale, puis la courbe descend immédiatement. Cela se présente dans les cas où le choc du pied sur le sol est très violent. Cette descente est suivie de deux ou trois maxima, puis l'instrument revient à zéro comme dans la marche normale.

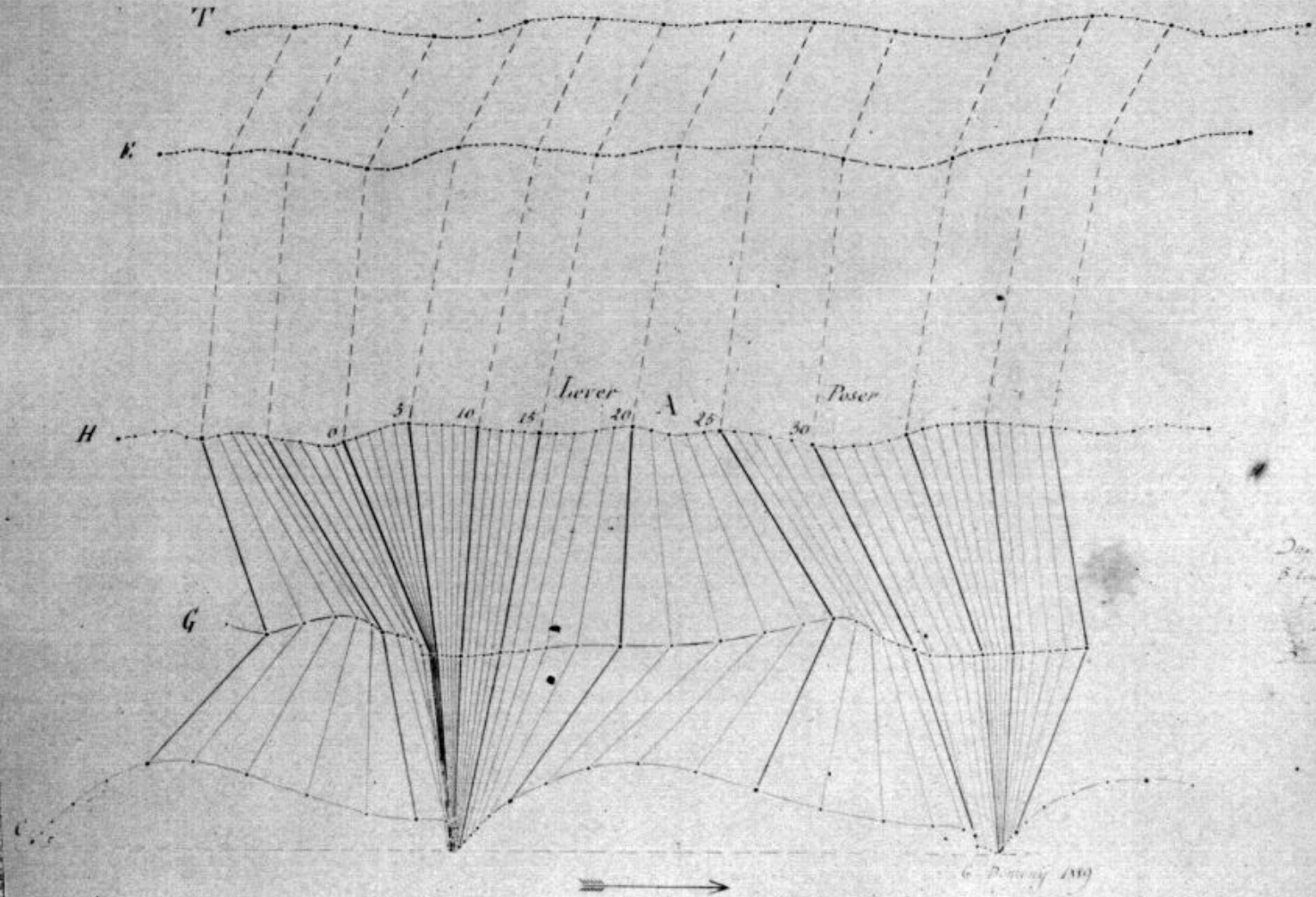
(4)

» Dans l'interprétation de ces anomalies, il faut se rappeler que les inflexions de la courbe du dynamographe n'ont aucune relation avec les inflexions de la trajectoire de la tête, ni même avec la hauteur d'élévation du corps au-dessus du sol; la pression normale du pied dépend uniquement de la variation de vitesse du mouvement vertical du centre de gravité. »

(7 mai 1889.)

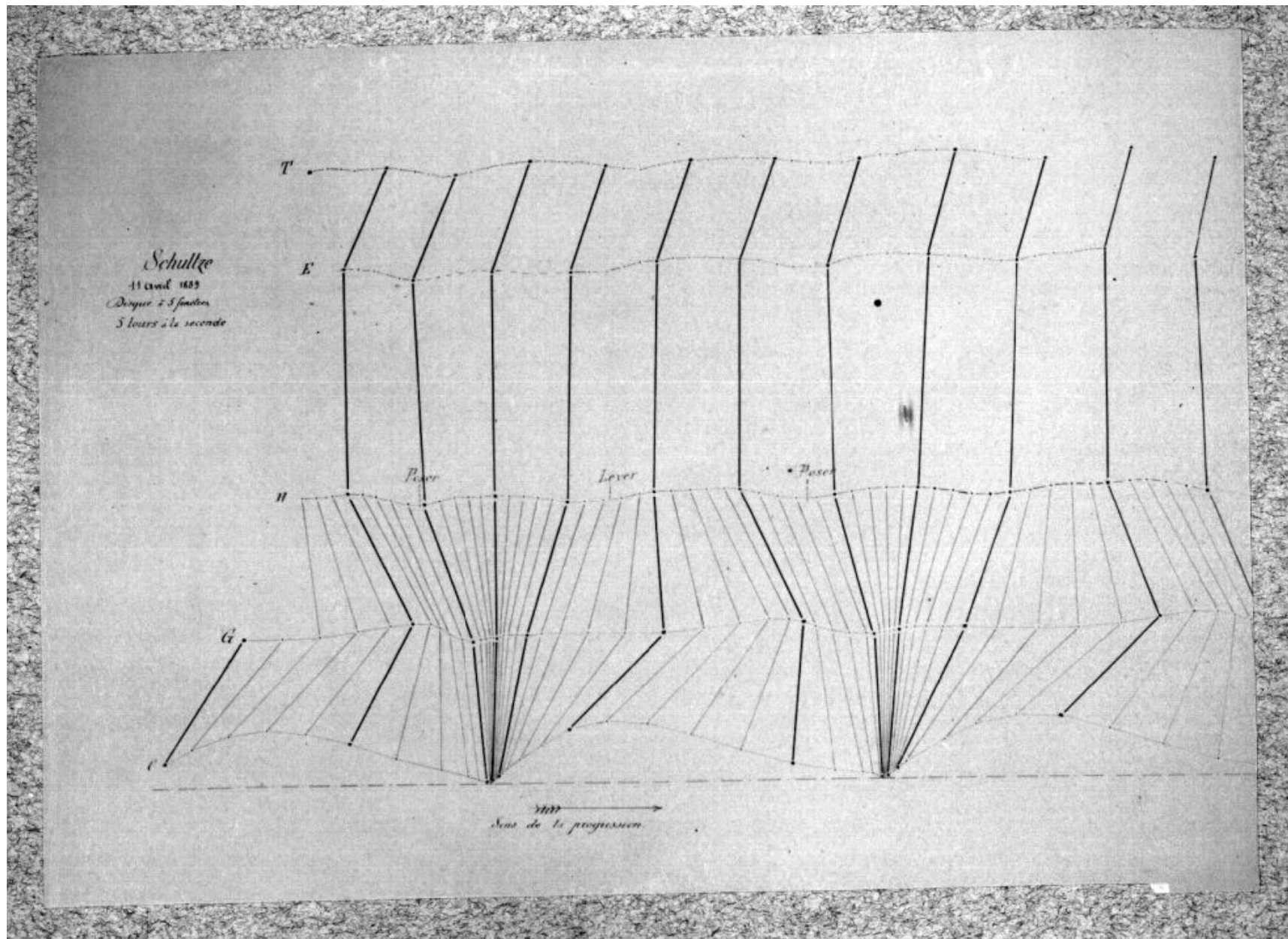
Ataxie locomotrice

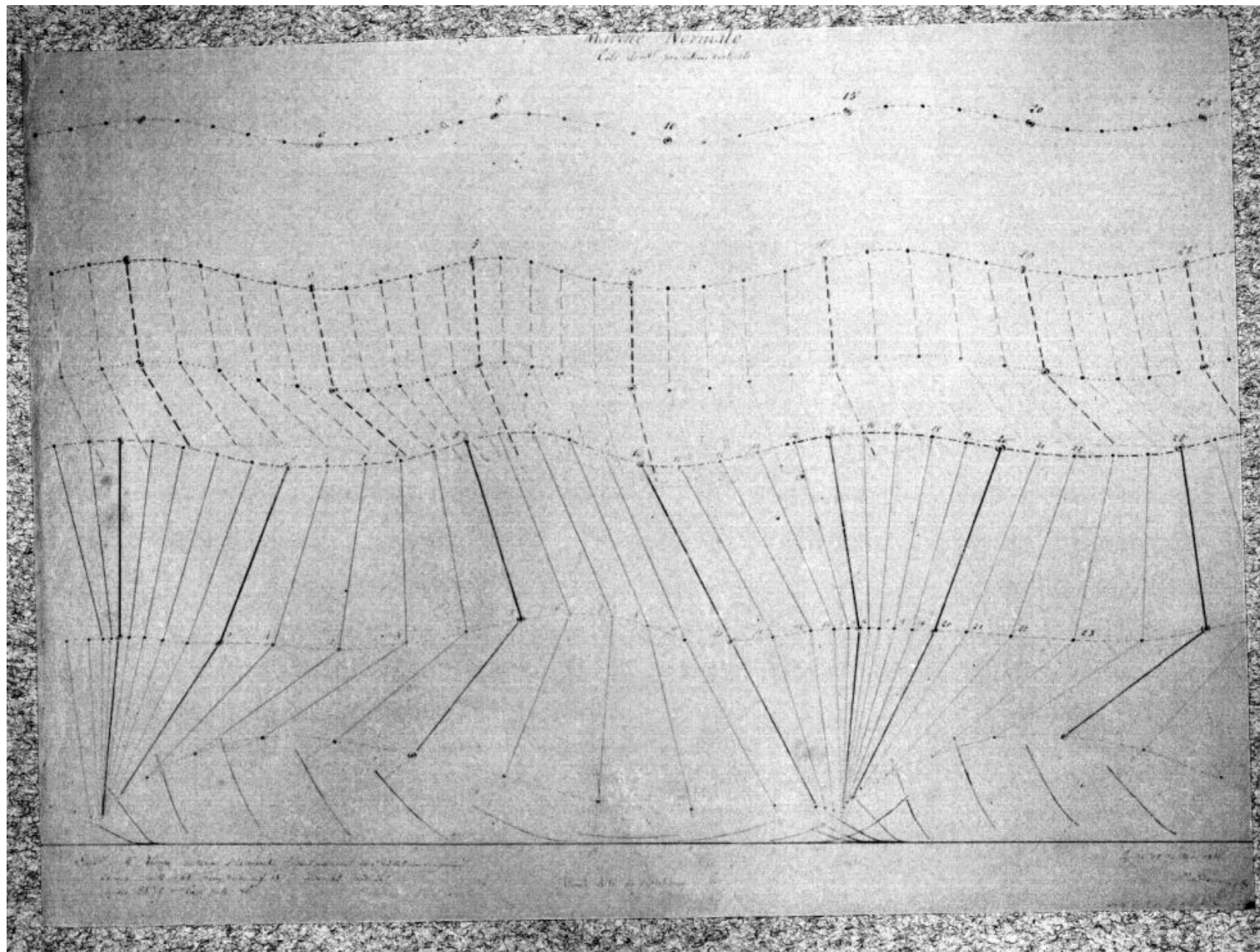
Sept. 1887-88. 20. 100



*Donné à l'École
de Médecine
de Paris
le 10/11/88*

G. Dumas 1889





XVII

RECHERCHES

SUR LA FORME DU THORAX ET SUR LE MÉCANISME DE LA RESPIRATION

Chez les sujets entraînés aux exercices musculaires

Par G. DEMÉNY

Préparateur de la station physiologique du Collège de France.

Dans une note à l'Académie des sciences du 7 mai 1888, nous avons décrit quelques instruments destinés à déterminer avec précision la forme et les dimensions extérieures du thorax, l'étendue des mouvements respiratoires ainsi que le débit d'air inspiré et expiré.

Parmi ces instruments, il y en a un qui donne sur le papier et en vraie grandeur les courbures planes du rachis et la forme de la ligne médiane antérieure du tronc depuis la base du menton jusqu'à l'ombilic; nous l'avons appelé *appareil inscripteur des profils*. On peut avec les deux profils obtenus construire la coupe du thorax par un plan vertical médian antéro-postérieur.

A cet effet, on mesure au compas l'épaisseur du corps dans deux plans horizontaux qui passent, par exemple, au niveau de la septième vertèbre cervicale et au niveau de la pointe du sternum, et l'on peut ainsi raccorder les deux tracés de la partie antérieure et de la partie postérieure du thorax en conservant leurs rapports de position.

Mais ce raccord des deux tracés est susceptible d'erreur,

et c'est pour l'éviter que nous avons imaginé un appareil inscripteur plus complet qui donne d'un seul coup la forme d'une section verticale du corps.

L'instrument se compose en principe d'un compas d'épaisseur dont les deux branches sont terminées par des galets.

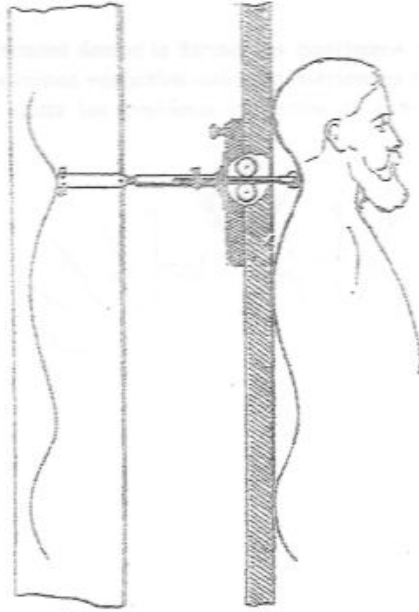


Fig. 1.

Appareil inscripteur des profils.

Des ressorts appuient constamment ces galets sur le corps et, grâce à une disposition particulière, le contour suivi par ces galets est exactement reproduit sur une feuille de papier au moyen de crayons fixés aux branches du compas (*fig. 2*).

Celles-ci ont des axes indépendants, parallèles et situés dans un même plan horizontal.

Ces axes ont un écartement plus grand que l'épaisseur du corps, ils sont fixés à un chariot qui se meut derrière la planche verticale sur laquelle est fixée la feuille de papier. Ce cha-

riol, guidé dans des coulisses, est équilibré par un contrepoids.

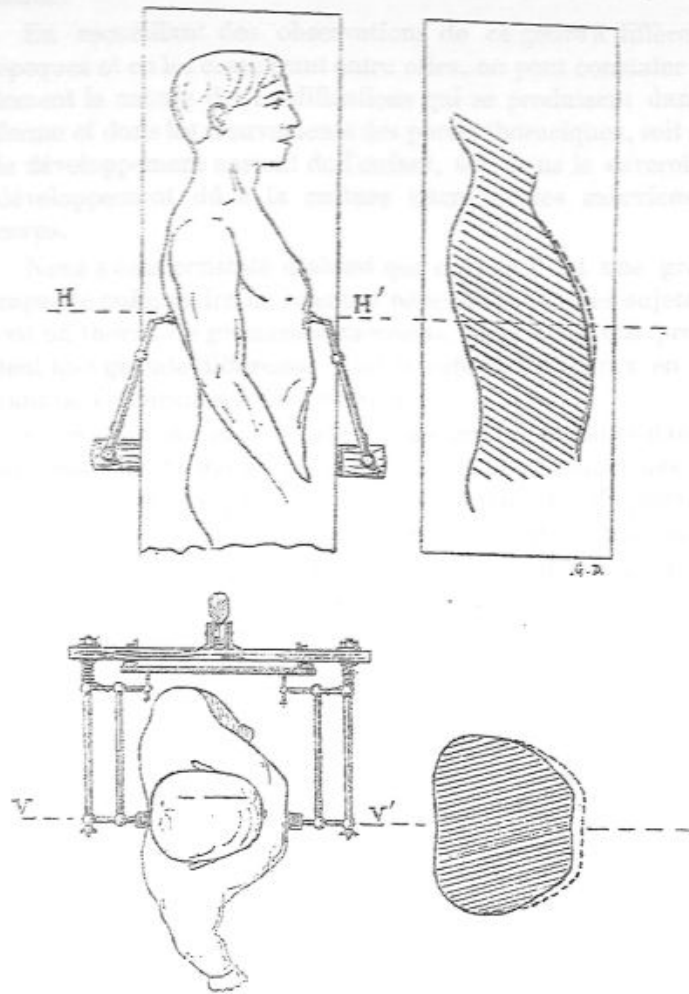


Fig. 2.

Appareil inscripteur des sections verticales du corps.
 Élévation... Section verticale du corps suivant VV'.
 Pla... Section horizontale suivant H'H' obtenue
 au moyen du thoracomètre.

Un montan armé de supports présente des points d'appui suffisants pour assurer l'immobilité du corps pendant le court instant qui dure une expérience.

Le dessin schématique ci-joint représente la disposition de l'instrument ainsi que le fac-similé d'un des tracés qu'il permet d'obtenir.

L'instrument donne la forme des courbures planes du rachis, les sections verticales antéro-postérieures et transversales du tronc dans les positions extrêmes de l'inspiration et de

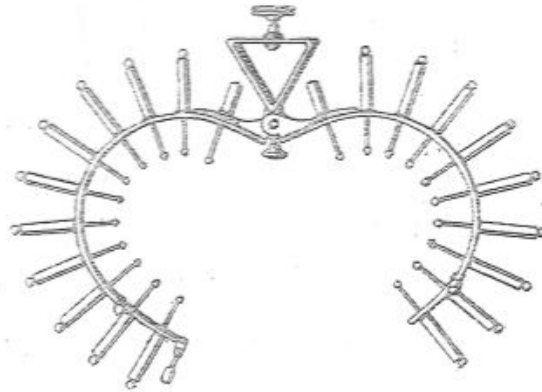


Fig. 3.

Thoracomètre ouvert.

l'expiration : il renseigne donc sur la forme du thorax et sur le mécanisme de la respiration d'un sujet.

Les indications sont complétées par les tracés du thoracomètre qui donne en vraie grandeur et dans les phases extrêmes d'un acte respiratoire la forme d'une section horizontale du thorax à une hauteur quelconque au-dessus du sol.

Les appareils ci-dessus nous permettent de représenter la forme d'un thorax. Pour cela, nous avons découpé dans des feuilles de carton les sections obtenues, et nous les avons fixées au moyen de trois supports dans leurs positions relatives. Nous avons eu soin de teinter les parties correspondant à l'accrois-

sement des dimensions thoraciques dans une inspiration profonde.

En recueillant des observations de ce genre à différentes époques et en les comparant entre elles, on peut constater facilement la nature des modifications qui se produisent dans la forme et dans les mouvements des parois thoraciques, soit dans le développement normal de l'enfant, soit dans le surcroît du développement dû à la culture intensive des exercices du corps.

Nous avons constaté d'abord que ceux qui ont une grande capacité pulmonaire ne sont pas nécessairement les sujets qui ont un thorax de grandes dimensions, mais ceux qui présentent une grande différence dans le volume du thorax en passant de l'expiration à l'inspiration.

Ce résultat est obtenu grâce à une grande mobilité dans les articulations du thorax et grâce aussi à la puissance des muscles inspireurs pour une même course du diaphragme.

Chez tous ceux qui ont une grande capacité pulmonaire, il y a donc une grande étendue dans les mouvements du thorax. Mais cette étendue n'est pas répartie également sur tous les points de la paroi thoracique.

C'est tantôt le diamètre antéro-postérieur, tantôt le diamètre transverse qui augmente le plus pendant l'inspiration.

Mais, en général, l'augmentation simultanée des dimensions antéro-postérieures et transversales est la condition la plus favorable à la pénétration d'une grande quantité d'air dans le poumon.

Dans les grandes inspirations la clavicule se soulève presque verticalement ; toute la ligne sternale est portée parallèlement à elle-même en avant et en haut ; l'abdomen se creuse pendant que les courbures de la colonne vertébrale tendent à s'effacer.

Les causes d'augmentation de la capacité pulmonaire agissent toutes par le mécanisme de la dilatation thoracique, soit directe, soit indirecte ;

Ainsi un sujet qui produit une grande somme de travail musculaire dans un temps donné se trouve dans la nécessité

de faire pénétrer une grande quantité d'air dans son poumon; il pourroit économiquement à ce besoin en exagérant l'action de ses muscles inspirateurs et en augmentant l'amplitude de ses mouvements respiratoires. C'est inconsciemment et par

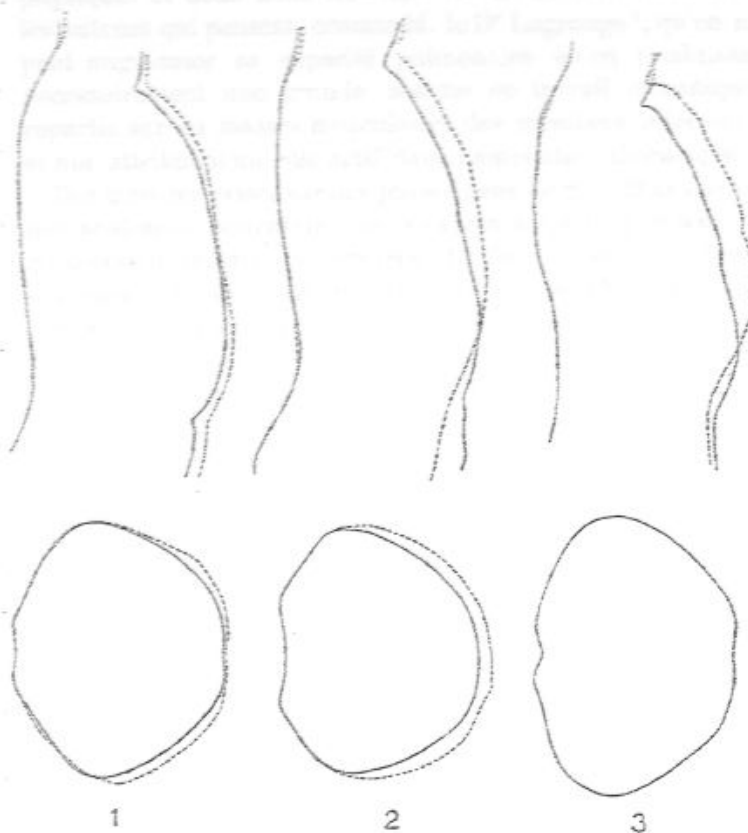


Fig. 4, 5 et 6.

action réflexe que se produit cette exagération. De plus, cette sorte d'exaltation de la fonction respiratoire n'est que passagère, elle cesse avec la cause qui la provoque. Cependant, si cette cause se renouvelle fréquemment, il se produit des modifications persistantes dans le rythme et dans l'amplitude des mouvements respiratoires.

C'est ainsi que M. Marey constatait il y a quelque temps¹ que chez des gymnastes l'amplitude des mouvements du thorax avait presque quadruplé après un entraînement de quelques mois pendant que la fréquence des mouvements du thorax diminuait de moitié.

Dans ce cas, l'exagération du travail musculaire produit une exagération des mouvements respiratoires et amène en définitive une augmentation du volume d'air inspiré pendant un temps donné.

L'ampliation thoracique ou plus exactement l'ampliation des mouvements thoraciques est ici obtenue par action réflexe; mais il y a des moyens directs de contribuer à cette ampliation sans pour cela produire nécessairement une grande quantité de travail musculaire.

Ainsi, les chanteurs se font une éducation volontaire qui consiste principalement à conserver sous pression l'air emmagasiné dans la poitrine après une profonde respiration et à le débiter lentement, d'une façon régulière, en rapport avec la hauteur des sons produits. Ils possèdent tous une capacité pulmonaire moyenne considérable.

Les gymnastes, qui se suspendent par les mains et exercent leurs membres supérieurs par des mouvements variés, fortifient ainsi les muscles qui relient le bras au thorax, muscles qui par une interversion de leurs insertions fixes peuvent, le bras fixé, produire l'élévation des côtes. Ces sujets font donc directement, sans produire nécessairement un grand travail musculaire, l'éducation de l'appareil mécanique de la respiration, car, d'une part, ils fortifient leurs muscles, et, de l'autre, ils donnent aux articulations de la cage thoracique une grande mobilité.

Leur appareil respiratoire se trouve donc amélioré et prêt à fonctionner utilement sous l'action réflexe qui suit la production d'un travail musculaire intense et qui se manifeste par le besoin de respirer.

Ces deux moyens, le direct ou l'indirect, ajoutent leurs effets pour accroître la capacité pulmonaire. C'est pourquoi

¹ *Comptes rendus de l'Académie des sciences.*

ils doivent occuper une place importante dans l'éducation physique, et nous nous trouvons ici en contradiction avec les auteurs qui pensent, comme M. le D^r Lagrange¹, qu'on ne peut augmenter sa capacité pulmonaire qu'en produisant nécessairement une grande somme de travail mécanique, répartie sur les masses musculaires des membres inférieurs, et qui attribuent un rôle actif dans l'ampliation thoracique.

Des mesures prises sur des jeunes gens de 20 à 22 ans ayant une profession sédentaire, ne s'exerçant qu'au gymnase et n'exécutant jamais de courses de fond, nous ont donné une capacité pulmonaire moyenne de 4 litres 200. Cette capacité est supérieure à celle de sujets du même âge n'ayant pas fait de gymnastique.

La valeur de la capacité pulmonaire est, on le sait, un indice certain de vitalité de l'individu, mais ce n'est pas la capacité absolue ou quantité d'air rejetée en passant de l'inspiration profonde à l'expiration profonde qui donne sur l'état d'entraînement d'un homme des indications bien certaines.

On peut en effet imaginer un sujet qui, ayant une capacité vitale moyenne, pèserait un grand poids et serait ainsi dans les plus mauvaises conditions pour produire du travail musculaire. En nous plaçant à notre point de vue, qui est de chercher un critérium de la qualité de l'individu envisagé comme machine à produire du travail mécanique, nous avons été amené à comparer la capacité pulmonaire évaluée en litres au poids du sujet évalué en kilogrammes.

Le rapport de la capacité pulmonaire au poids est en effet plus intéressant que celui de la capacité pulmonaire à la taille envisagé par quelques auteurs.

La taille d'un individu n'a pas de relation nécessaire avec son poids, elle ne donne aucune idée de la quantité de tissu qu'il contient ni de la quantité de sang qui doit être entretenu dans un état constant d'oxygénation. Au contraire, le rapport de la capacité pulmonaire au poids mesure précisément l'état du sujet au point de vue de son rendement probable en travail mécanique.

¹ LAGRANGE, *Physiologie des exercices du corps*.

En prenant des mensurations sur des enfants sains, en étudiant et en notant sous forme graphique la variation de leur poids et de leur capacité pulmonaire en fonction de l'âge, nous avons constaté que les courbes du poids et de la capacité pulmonaire sont parallèles.

Nous avons aussi constaté que le rapport de la capacité pulmonaire au poids du corps donne une idée très nette de l'état d'entraînement du sujet, c'est-à-dire de sa faculté à produire une grande quantité de travail musculaire dans un temps donné. On voit en effet le rapport augmenter jusqu'à 0,079 chez des sujets entraînés fortement aux exercices musculaires sans être entraînés spécialement à la course. Cela s'explique facilement si l'on se rappelle que l'influence de l'entraînement est d'une part de diminuer le poids du corps en faisant disparaître les tissus de réserve, tels que graisse, etc., et d'autre part d'augmenter la capacité pulmonaire. Le rapport de ces deux quantités se trouve ainsi augmenté pour deux raisons.

En prenant au hasard des jeunes gens dans des sociétés de gymnastique et en les classant par rapport à la grandeur décroissante de ce rapport, nous avons pu constater avec satisfaction que nous en avons fait par cela même un classement correspondant à leur résistance, que cette résistance soit due à des aptitudes spéciales où à une pratique suivie d'une éducation corporelle intensive.

Appareils de mesure ayant pour but de déterminer avec précision la forme extérieure du thorax, l'étendue des mouvements respiratoires, les profils et les sections du tronc, ainsi que le débit d'air inspiré et expiré;

PAR M. G. DEMENY.

« M. Marey a montré que des modifications permanentes de fréquence et d'amplitude des mouvements respiratoires se produisent chez les sujets entraînés aux exercices musculaires et en particulier à la course.

» Chez ces derniers, après six mois d'entraînement à l'École de Gymnastique de Joinville-le-Pont, on constatait que la fréquence des mouvements diminuait de près de moitié, tandis que l'amplitude avait environ quadruplé. M. Marey inscrivait le rythme et l'amplitude des mouvements du thorax ou de l'abdomen au moyen du pneumographe, la capacité respiratoire avec un spiromètre inscripteur.

» Nous avons cru intéressant de reprendre ces recherches et de voir s'il se produisait des modifications dans la forme même du thorax, et comment se faisaient ces modifications avec l'âge et le genre d'éducation physique auquel des enfants seraient soumis.

» Nous avons, dans ce but spécial, construit des instruments qui nous donnent des documents précis comparables entre eux et de nature graphique.

» Ces instruments sont :

» 1° Un *compas inscripteur* pour mesurer les diamètres du thorax et inscrire les variations de ce diamètre dans toutes les phases de l'expiration et de l'inspiration;

» 2° Un *thoracomètre* donnant la forme d'une section horizontale du thorax à une hauteur quelconque;

D.

(2)

» 3° Un appareil *inscripteur des différents profils du corps* ;

» 4° Un *spiromètre enregistreur*.

» *Compas thoracique*. — Le compas thoracique est un compas d'épaisseur terminé par des pointes mousses en ivoire.

» L'une de ces pointes est fixée à une tige mobile guidée dans un tube et rappelée par un ressort à boudin.

» Si l'on fixe cette tige au moyen d'une vis de pression, l'instrument devient un compas d'épaisseur ordinaire. Si l'on desserre cette vis en conservant le bouton fixe au contact du thorax, la tige mobile suit les mouvements de la respiration et indique l'accroissement d'un diamètre horizontal quelconque sous leur influence. Un tambour à levier, fixé au compas, permet d'inscrire le rythme et la valeur de ces mouvements.

» *Thoracomètre*. — Le thoracomètre se compose d'une ceinture métallique portée à hauteur variable sur un ou deux montants.

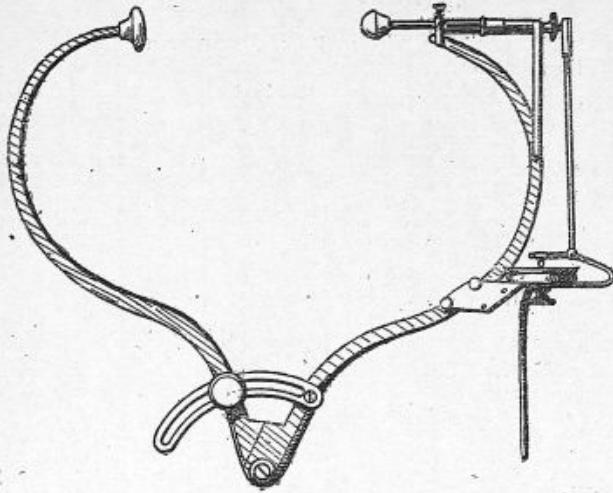
» Cette ceinture s'ouvre, soit en se brisant au moyen d'une charnière, soit en se séparant en deux moitiés. Elle porte vingt-cinq tiges mobiles horizontales et guidées dans des tubes à ressort. Ces tiges sont convergentes et ont une direction sensiblement normale à la paroi extérieure du thorax. Elles viennent d'elles-mêmes au contact de celui-ci et en suivent tous les mouvements dès que le sujet en expérience s'est introduit dans cette ceinture. On peut alors, soit par un serrage simultané, soit par un arrêt, agir sur toutes les tiges à la fois et les immobiliser dans la position correspondant soit à l'inspiration, soit à l'expiration. L'instrument conserve donc la forme du thorax après que le sujet en est sorti, et l'on peut à l'aise prendre sur le papier le contour de cette forme enveloppée par les boutons d'ivoire qui terminent les tiges.

» *Appareil inscripteur des profils*. — L'appareil inscripteur se compose d'un chariot guidé dans une glissière verticale, le long de laquelle s'appuie le sujet en expérience. Ce chariot porte une tige à ressort qui porte à ses extrémités une plume et un galet.

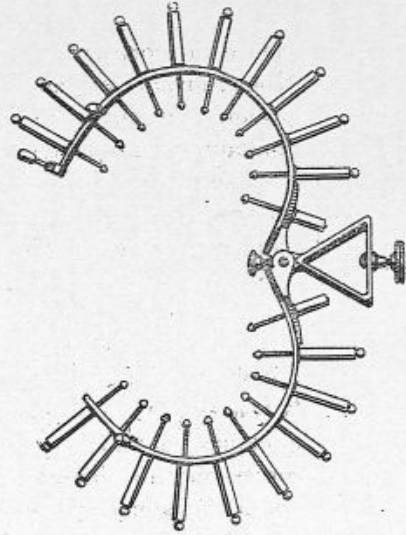
» Le galet s'appuie constamment sur le corps et la plume frotte contre une feuille de papier sur laquelle s'inscrit le profil.

» S'il s'agit, par exemple, d'avoir les courbures du rachis, le sujet s'appuie contre la glissière de façon que le galet roule sur les ondulations du rachis ; on imprime au chariot un mouvement vertical ; la tige à ressort transmet à la plume un mouvement identique à celui du galet et l'inscription se fait sur le papier en grandeur absolue.

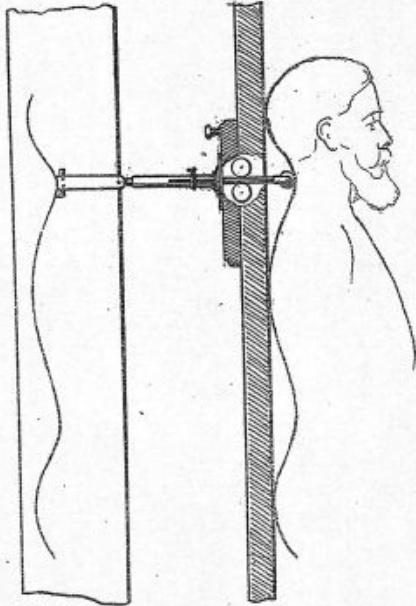
» Si l'on prend de la même façon le profil de la ligne médiane anté-



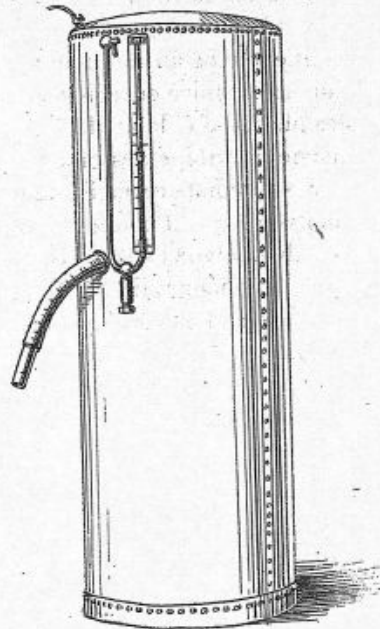
Compas thoracique enregistreur.



Thoracomètre.



Appareil inscripteur des profils.



Spiromètre enregistreur à capacité fixe.

(4)

rière du corps, on obtient, en réunissant les deux tracés, la coupe du tronc suivant le plan médian antéro-postérieur. Il suffit, pour cela, de prendre, au moyen du compas, l'épaisseur du tronc dans deux plans horizontaux et à des hauteurs connues.

» Nous travaillons une autre disposition qui permette d'inscrire simultanément les deux profils antérieur et postérieur sur une même feuille et dans leurs positions relatives réelles.

» *Spiromètre enregistreur.* — Le spiromètre enregistreur est le perfectionnement d'une disposition déjà employée par M. Marey.

» Un réservoir étanche et inextensible en tôle, d'une capacité de 300^{lit} à 400^{lit}, est muni d'une embouchure d'un diamètre au moins égal à celui de la trachée. On insuffle l'air par cette embouchure, la pression monte de quelques centimètres d'eau qu'un manomètre indique. A cette pression correspond un volume d'air injecté, et une échelle empirique permet de lire immédiatement ce volume.

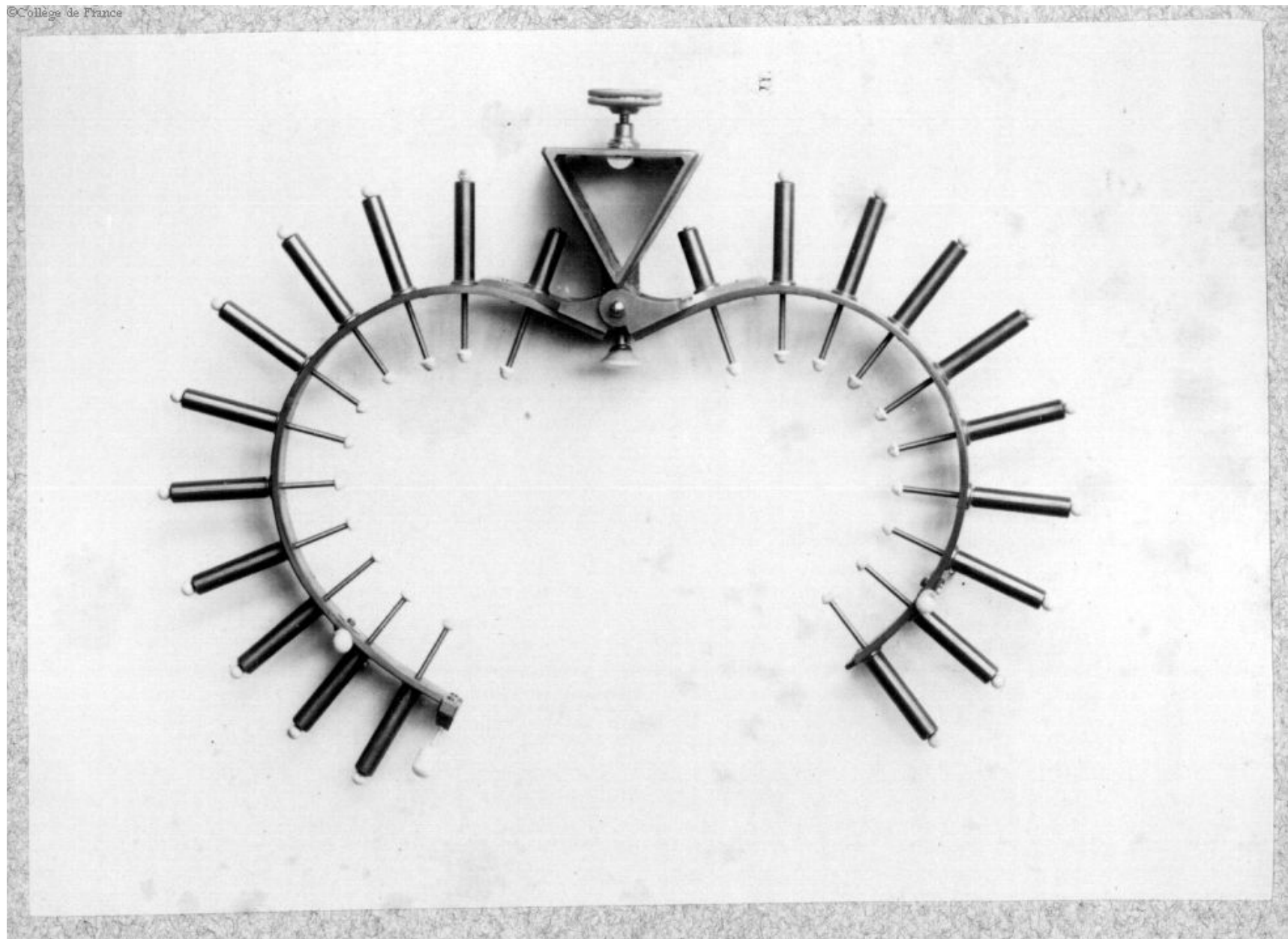
» Une disposition spéciale facilite le réglage du niveau du liquide dans le manomètre et, pour faciliter la lecture, un robinet peut maintenir ce niveau à son maximum après insufflation.

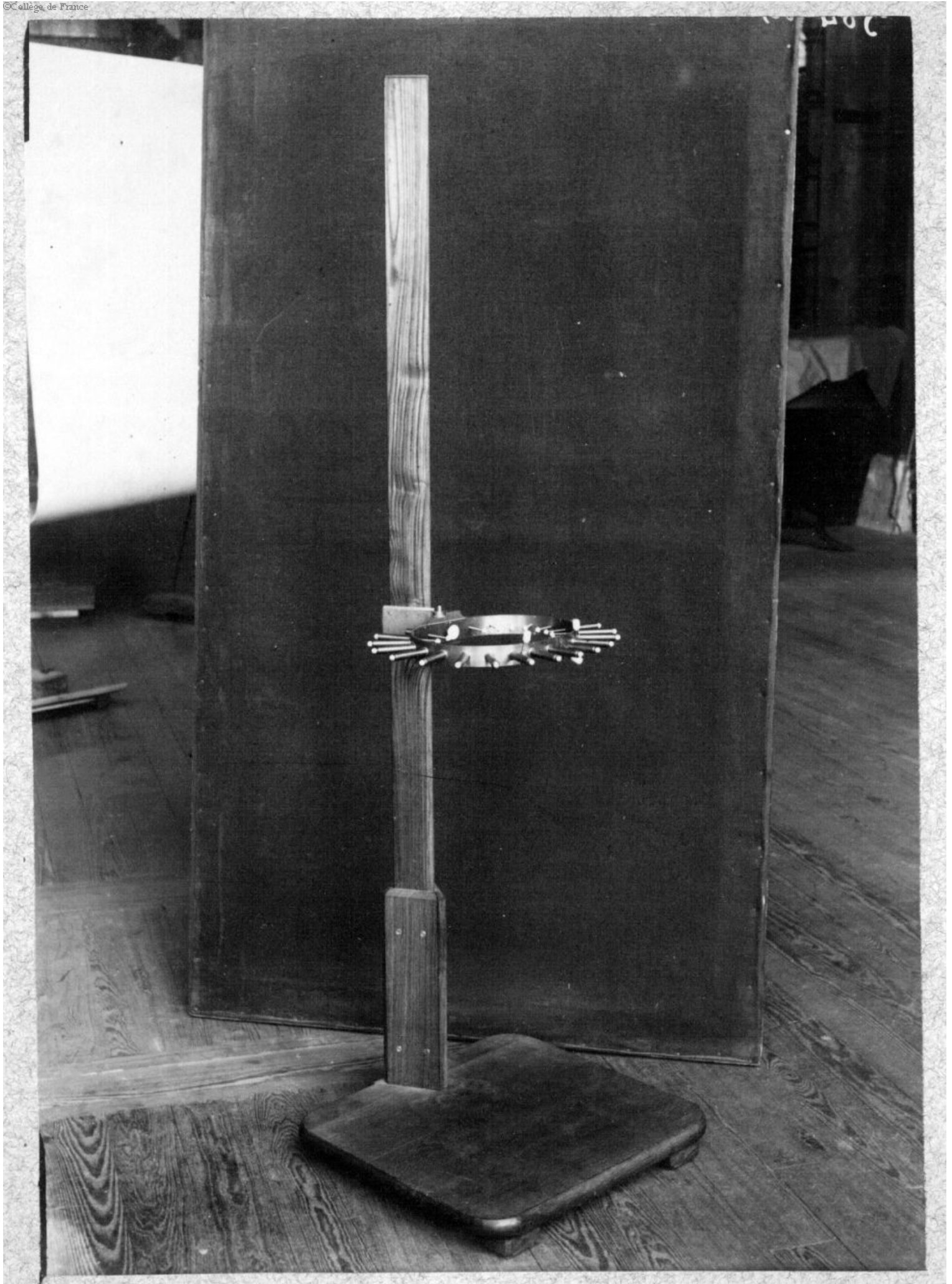
» L'appareil est rendu inscripteur en faisant communiquer l'air qu'il contient avec un tambour à levier. Les mouvements de celui-ci, inscrits sur un cylindre enregistreur, donnent toutes les indications désirables sur les phases du débit de l'air inspiré et expiré, la valeur de ce débit et même le rythme des mouvements respiratoires.

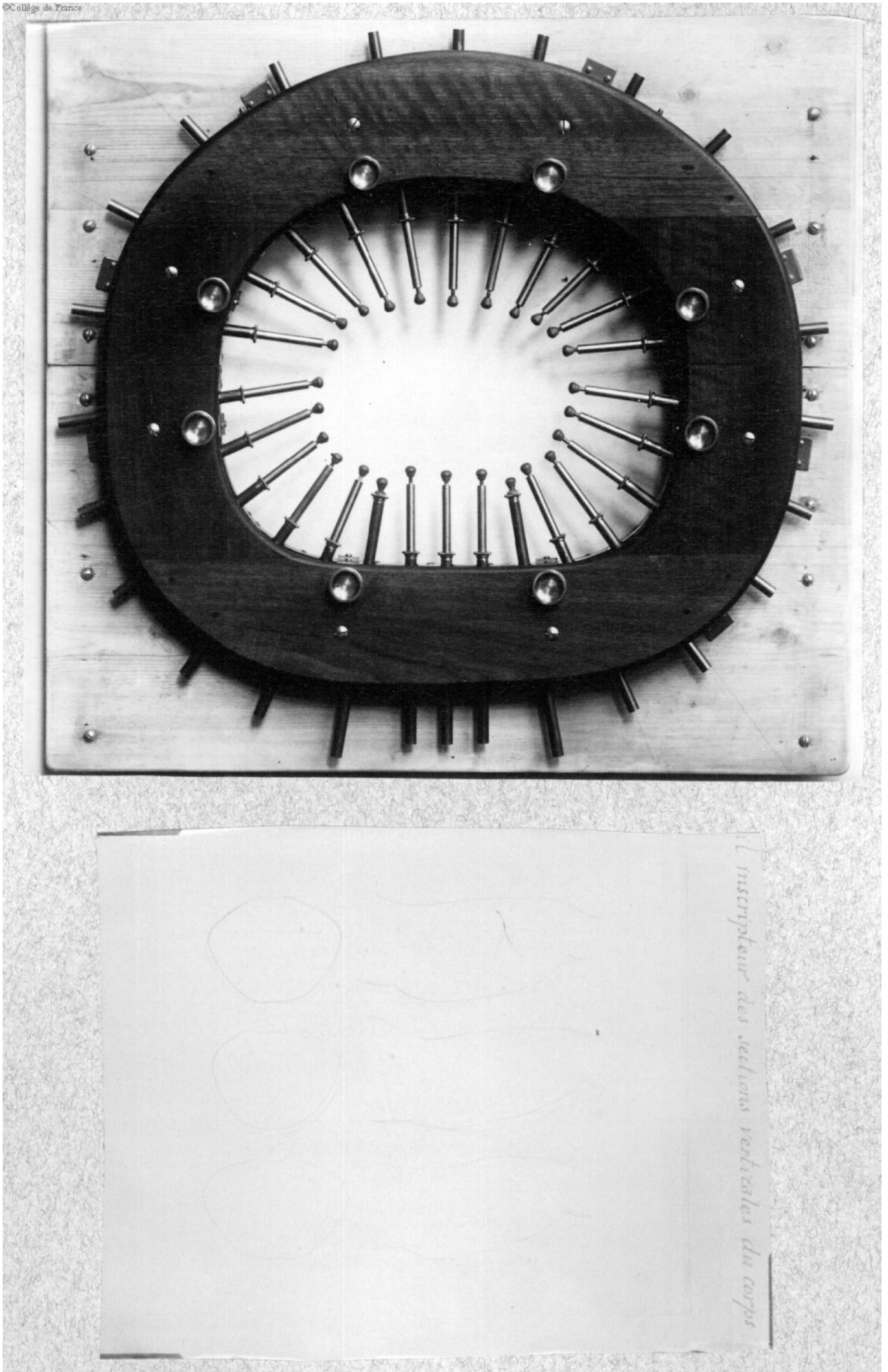
» On compare facilement cette courbe du débit de l'air à celles des mouvements du thorax ou de l'abdomen.

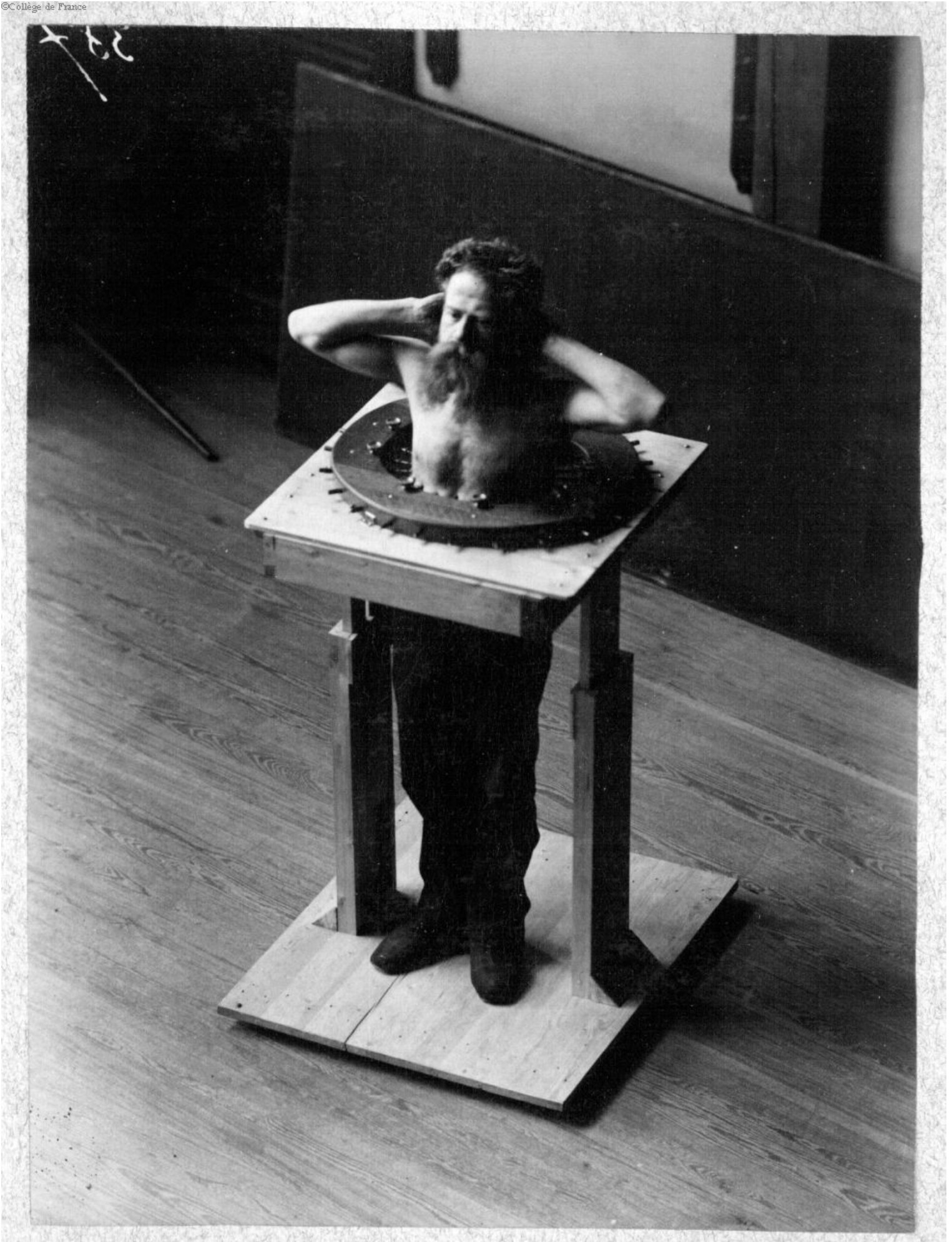
» Nous avons entrepris, au moyen de ces divers appareils de mesure et avec le concours de M. G. Rey, une série de recherches sur les enfants des écoles. Les résultats acquis feront l'objet d'une prochaine Communication. »

(7 mai 1888.)

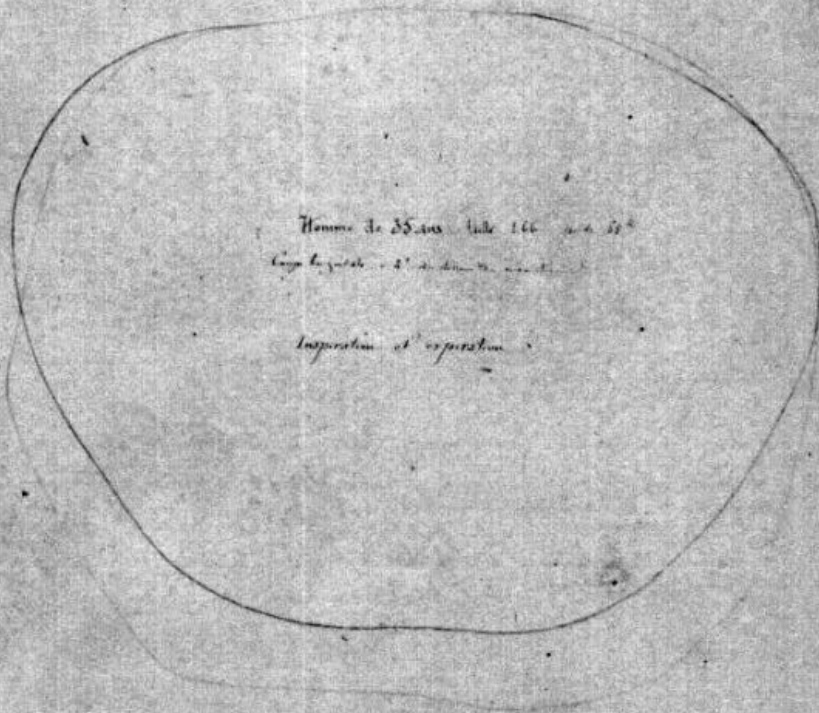








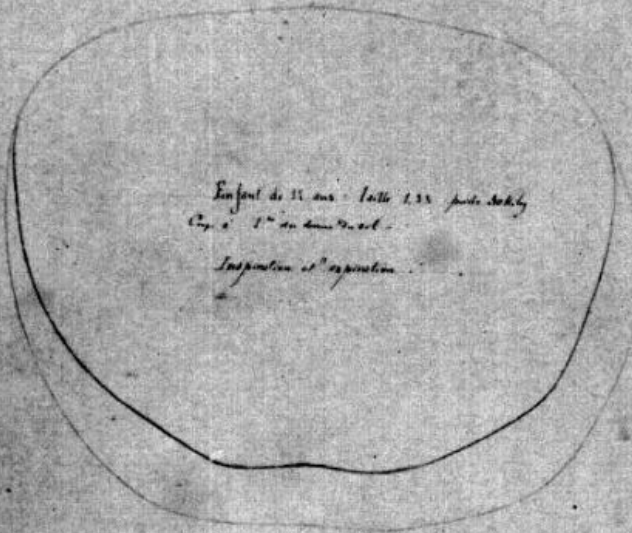
Coupes transversales du Thorax



Homme de 35 ans - taille 1.66 - âge 32

Coupe la plus élevée - 2^e de la base du cœur

Inspiration et expiration



Enfant de 11 ans - taille 1.33 - poids 26 kg

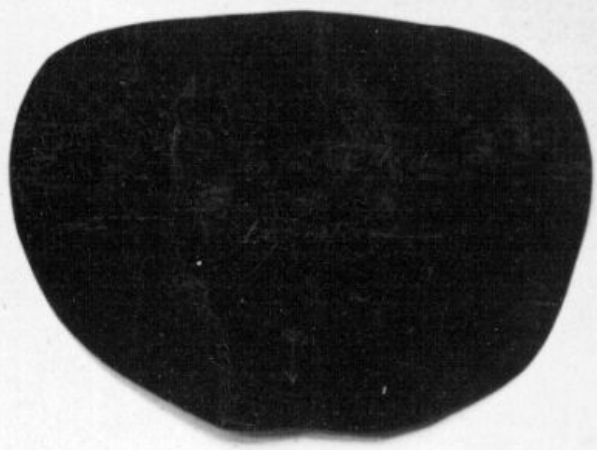
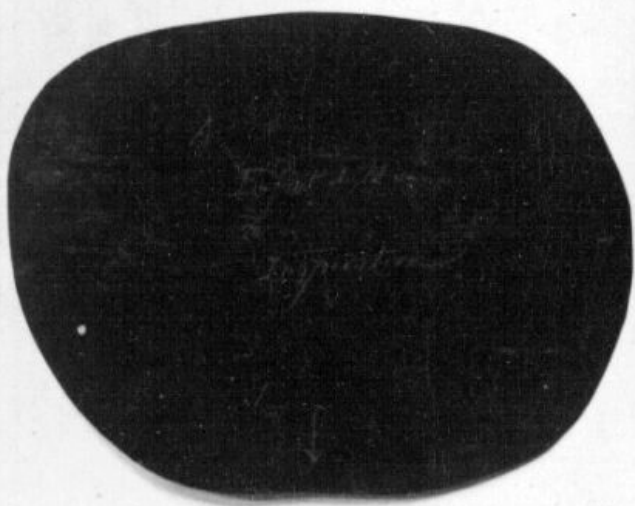
Coupe 1^{re} de la base du cœur

Inspiration et expiration

1102

1

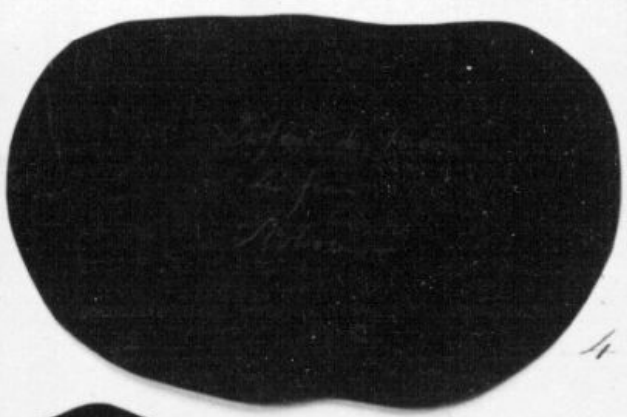
2



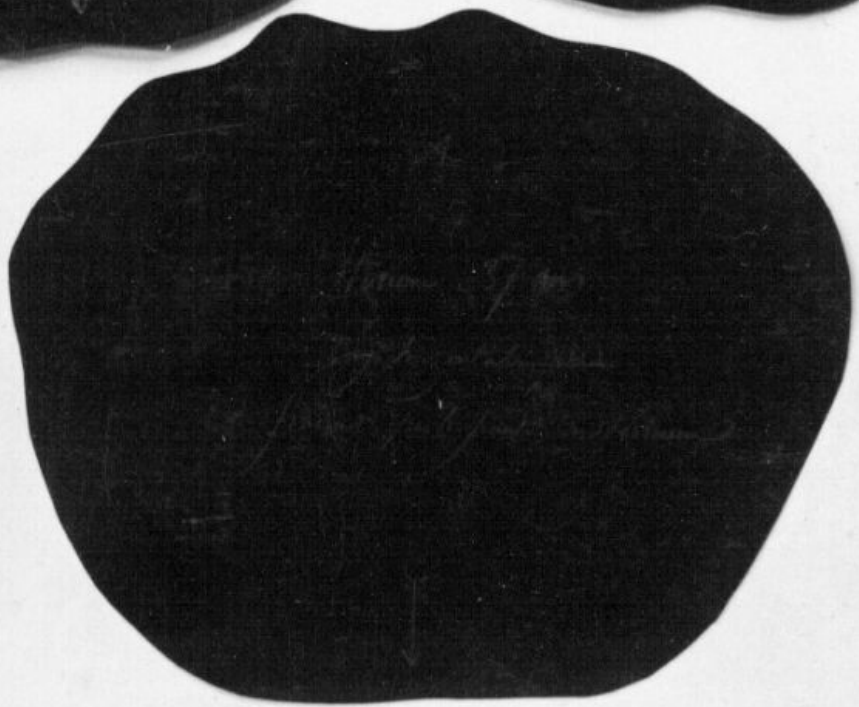
3

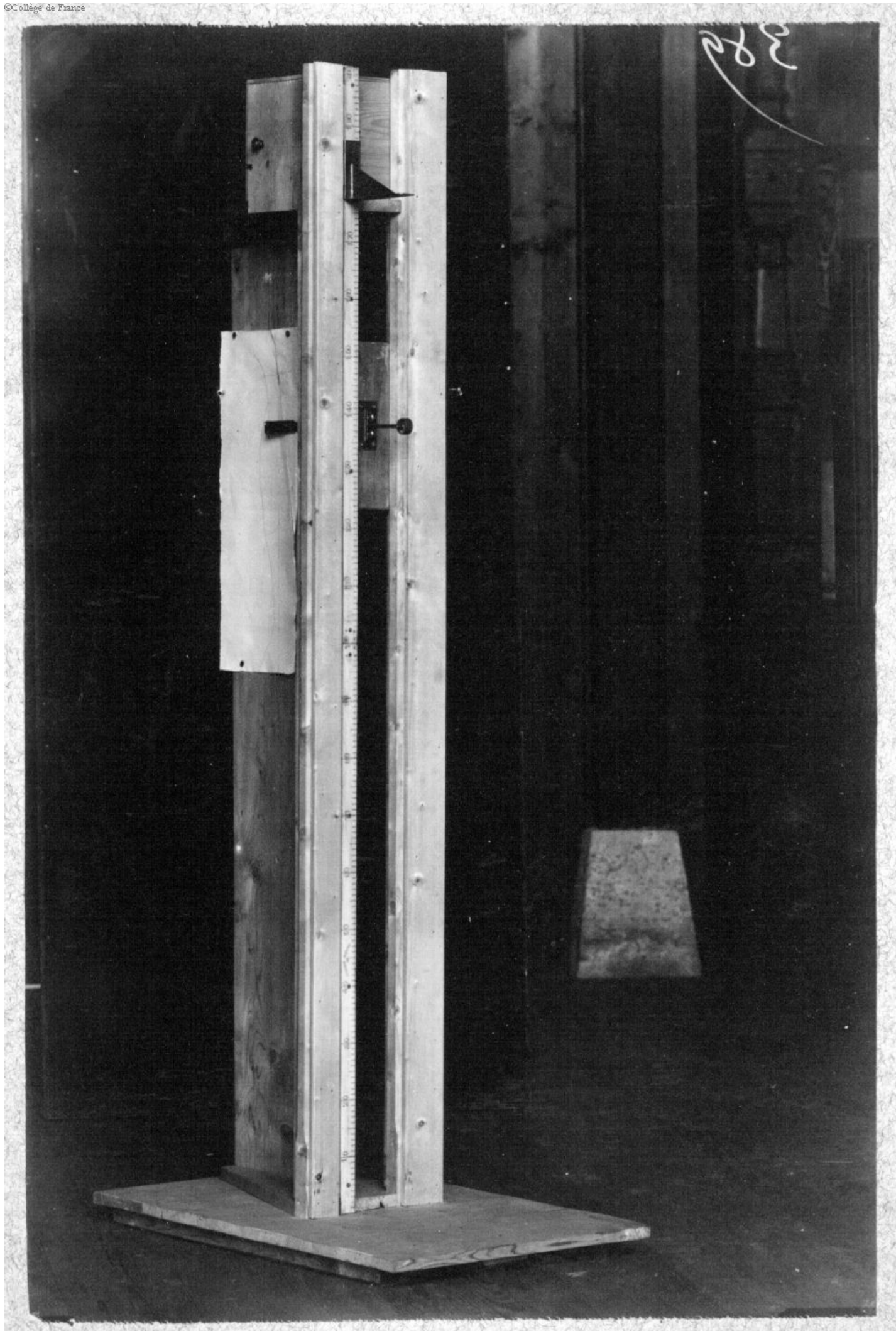


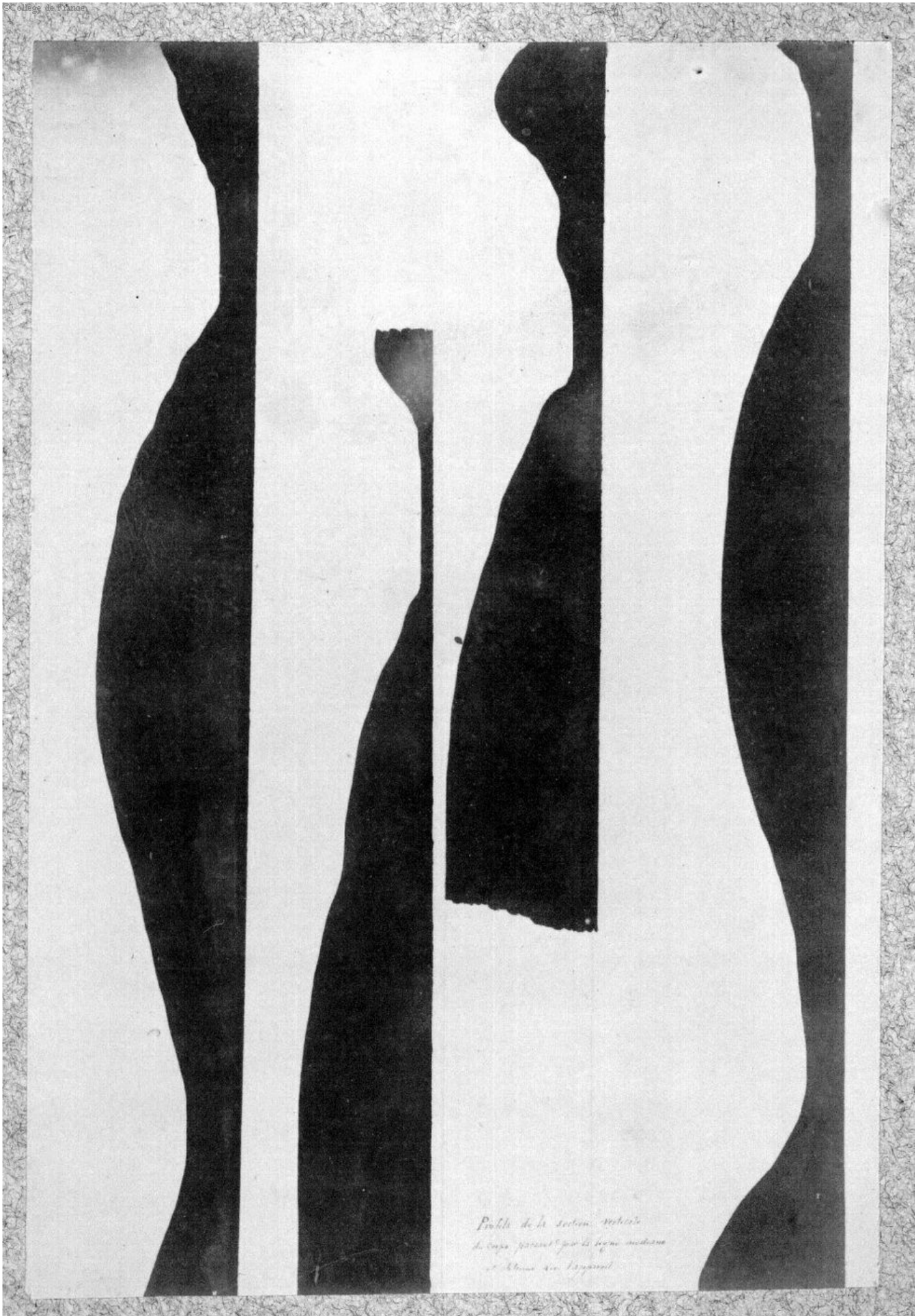
4

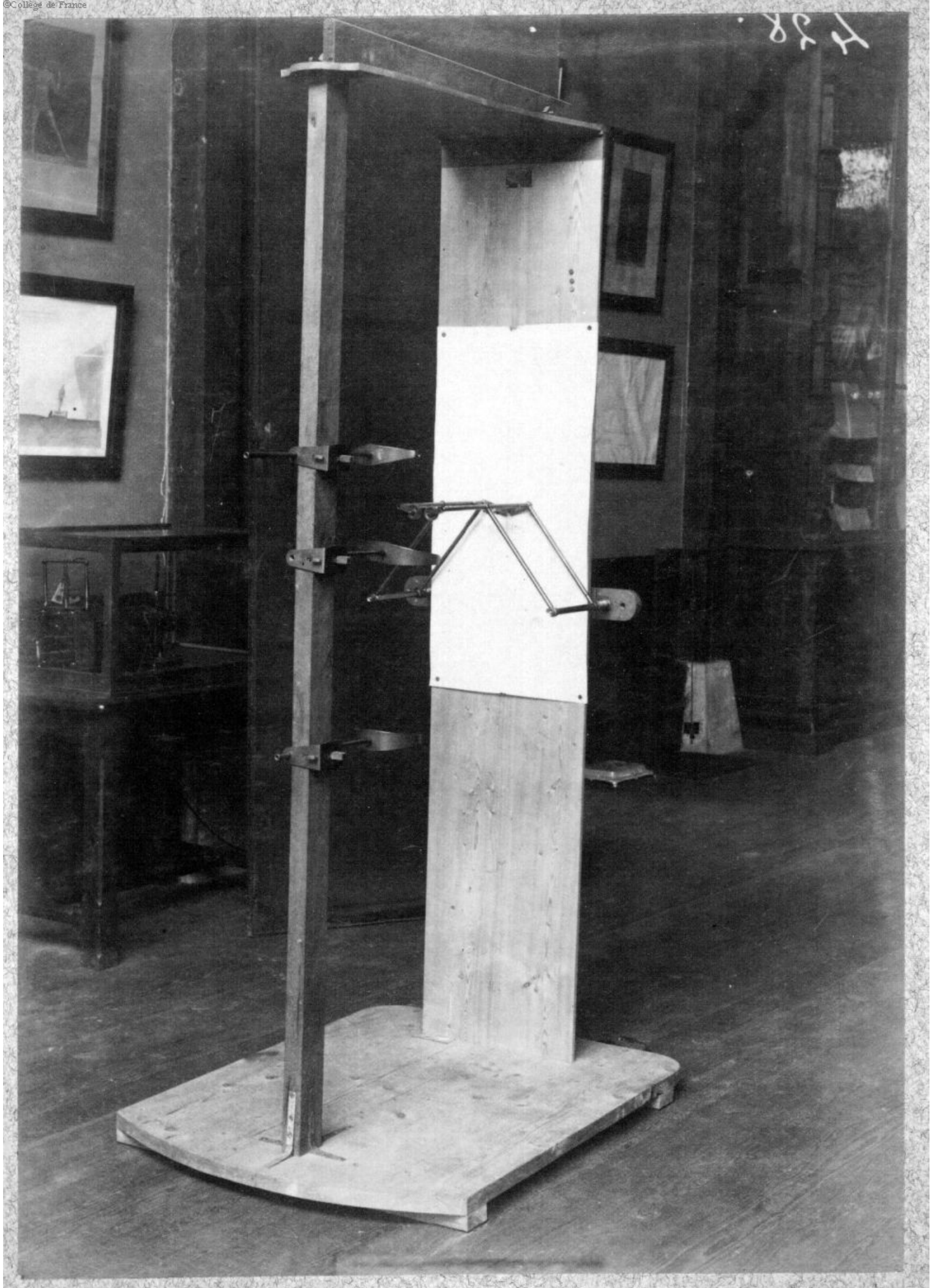


5



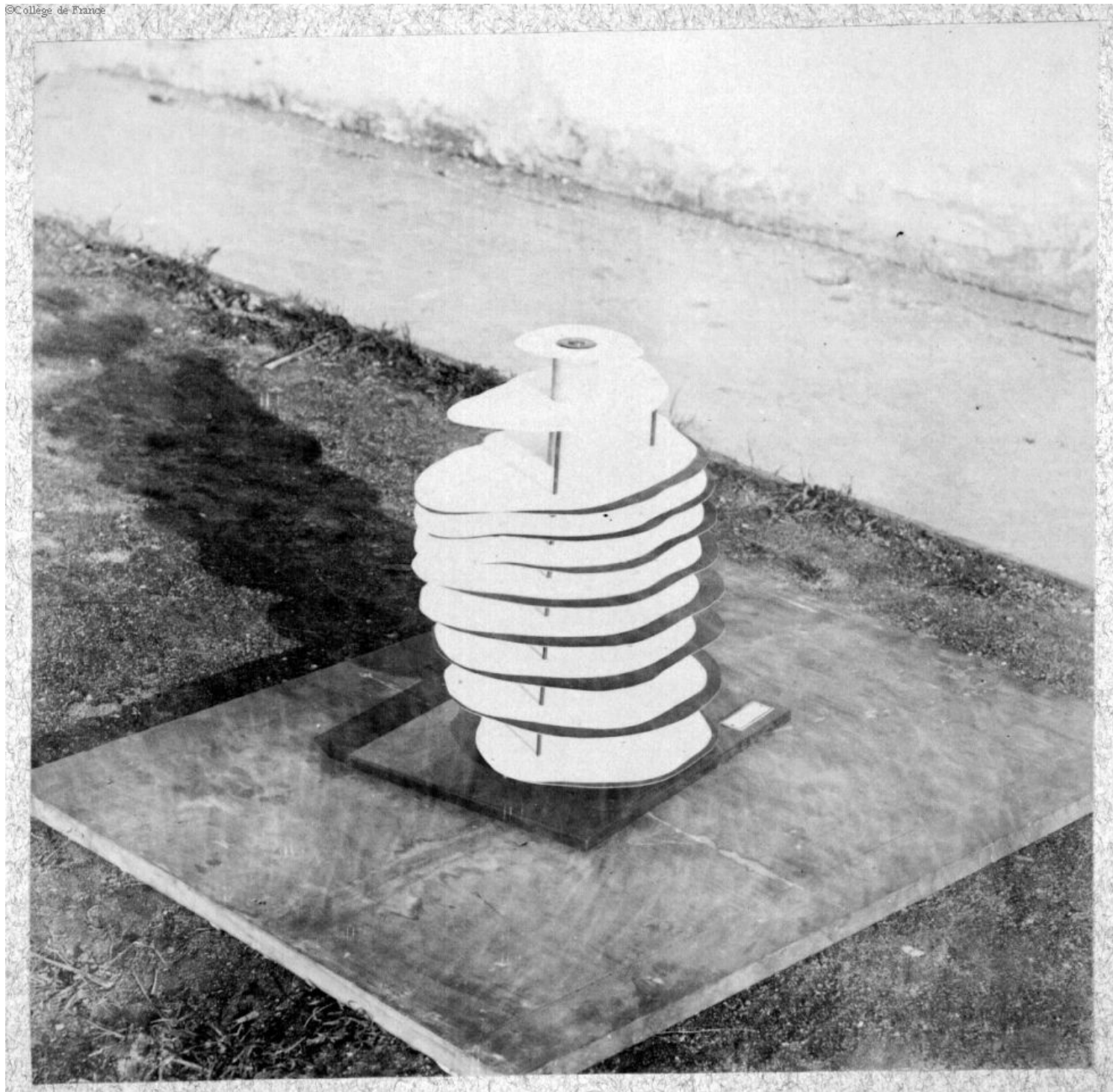




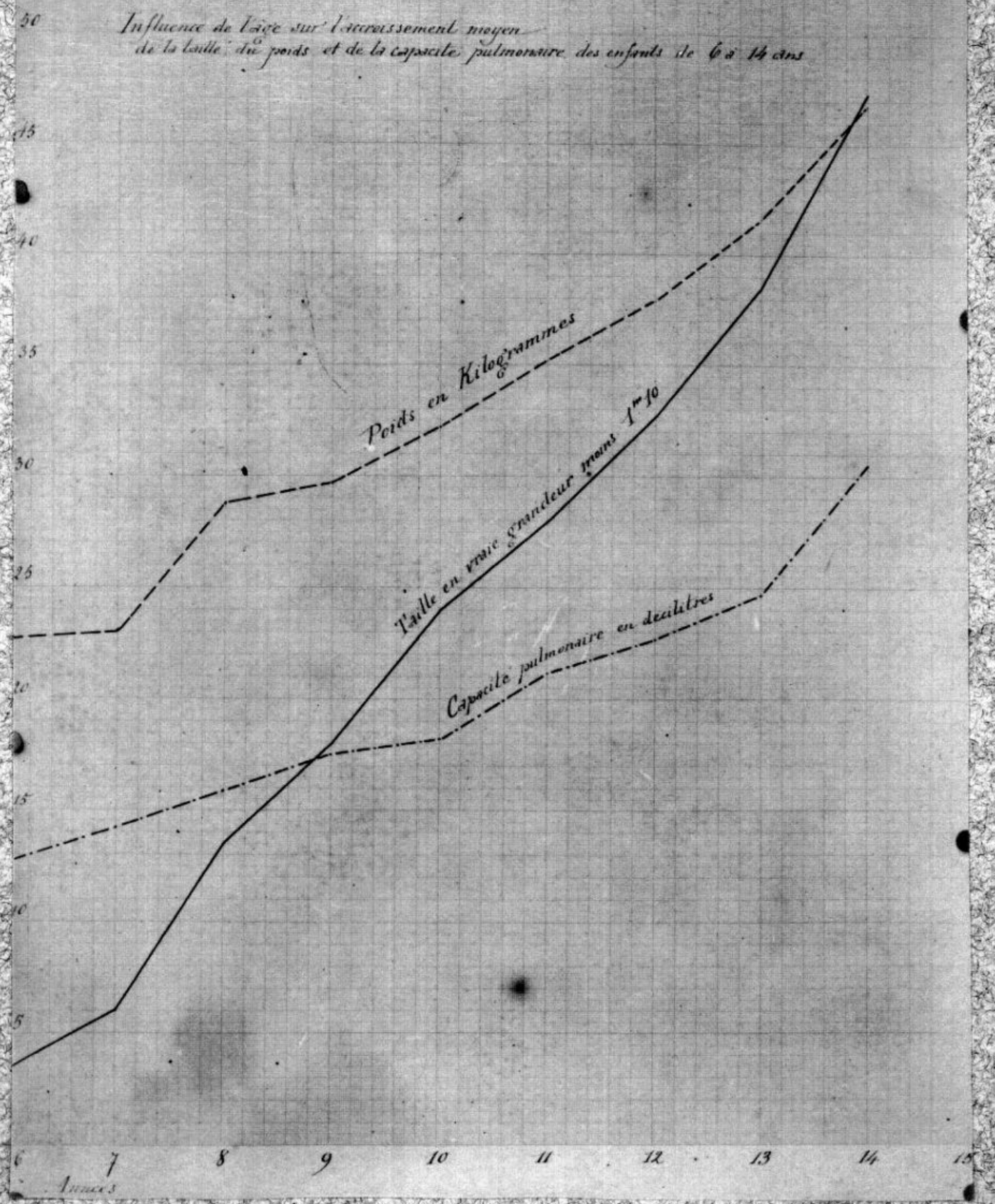








*Influence de l'âge sur l'accroissement moyen
de la taille, du poids et de la capacité pulmonaire des enfants de 6 à 14 ans*



INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CVII;
séance du 15 octobre 1888.

Modifications de la Photo-chronographie pour l'analyse des mouvements exécutés sur place par un animal;

PAR M. MAREY.

« L'essence de la méthode photo-chronographique consiste à recueillir, sur une même plaque sensible, des images instantanées et successives d'un objet qui se déplace plus ou moins rapidement. La translation de l'objet au devant de l'écran noir se reproduit sur la plaque photographique de telle sorte que les images successivement obtenues ne se confondent pas entre elles.

» Mais si l'objet est animé d'une translation trop lente, ou s'il exécute des mouvements sur place, les images sont imparfaitement séparées ou même se superposent complètement.

» Or il est d'un grand intérêt de pouvoir décomposer, dans leurs phases successives, les mouvements qui s'accompagnent d'une translation lente ou qui se font sur place, tels que la marche de l'homme, le maniement des outils ou des armes et la plupart des exercices gymnastiques.

M.

I

» La méthode de Muybridge donnait, il est vrai, ces résultats en recevant les images sur les plaques d'appareils photographiques différents, placés en série et fonctionnant successivement; mais la multiplicité des appareils entraîne des changements dans l'aspect de l'objet en mouvement, puisque ses images successives sont prises de points différents et sous des incidences toujours changeantes.

» Étant admise la nécessité de prendre, d'un point toujours le même, la série des images successives d'un objet qui ne change pas de place, il n'y a que deux moyens d'en empêcher la superposition. L'un consiste à déplacer la surface sensible, afin que des points différents de cette surface se présentent successivement pour recevoir les images de l'objet; l'autre procédé consiste à imprimer à l'image une translation, de façon qu'elle se produise en des points différents de la plaque immobile.

» Je me suis appliqué, dans ces derniers temps, à essayer comparative-ment ces deux méthodes, et j'espère obtenir une série d'images sur une longue bande de papier sensible, animée d'une translation rapide avec arrêts aux moments des poses.

» En attendant, une méthode beaucoup plus simple m'a donné des résultats assez satisfaisants. Elle consiste à recevoir sur un miroir tournant les rayons émanés de l'objet et à les réfléchir dans l'appareil photographique. Sous l'influence de la rotation du miroir, l'image de l'objet se transporte d'un bout à l'autre de la plaque sensible. La rotation du miroir se fait avec une grande régularité sous l'influence d'un mouvement d'horlogerie, dont on règle à volonté la marche suivant l'intervalle qui doit séparer les images.

» C'est ainsi qu'a été obtenue la série des attitudes d'un gymnaste qui fait tourner des massues autour de sa tête. Le cycle complet du mouvement contient quatorze images, et la durée totale du mouvement n'excédait pas une seconde.

» De la même façon ont été obtenues des images d'un marcheur; le nombre en est de douze en moins d'une seconde.

» La vitesse angulaire du miroir tournant est si faible, qu'il sera sans doute facile de l'immobiliser pendant les temps de pose, ce qui accroîtra encore la netteté des images, déjà assez satisfaisante.

» Ces séries photo-chronographiques avec dissociation artificielle des images se prêtent, comme celles de Muybridge, à être examinées au moyen du zootrope. En faisant tourner l'instrument avec lenteur, on se rend très bien compte de l'enchaînement des phases du mouvement représenté.

» *Application du miroir tournant à l'étude de la natation des poissons.* — En se servant du miroir tournant, on n'a plus besoin d'opérer devant un fond obscur comme dans la Photo-chronographie ordinaire; cela m'a permis d'étudier le mécanisme de la natation des poissons que j'avais placés dans un aquarium à fond de verre, éclairé par en dessous au moyen d'un réflecteur.

» Une longue caisse opaque, verticalement placée, emboîtait exactement les contours de l'aquarium et, par son autre extrémité, enfermait le miroir tournant qui renvoyait dans l'appareil photo-chronographique l'image de l'aquarium sous forme d'une bande lumineuse, au milieu de laquelle se détachait la silhouette noire du poisson. En réglant convenablement la rotation du miroir, la bande lumineuse et la silhouette qu'elle contenait se déplaçaient de telle sorte que la glace sensible recevait une douzaine d'images juxtaposées, représentant douze attitudes successives du poisson avec les phases de sa progression liées aux différents mouvements de sa nageoire caudale.

» Des grenouilles, des lézards et de petits mammifères, placés sur le fond de l'aquarium mis à sec, ont donné la série des phases de leurs mouvements de progression.

» Dans une Note prochaine, j'exposerai le résultat d'expériences, faites avec le concours de M. Corblin, sur la natation de l'anguille et sur la nature du mouvement ondulatoire qui caractérise la locomotion de ce poisson. »

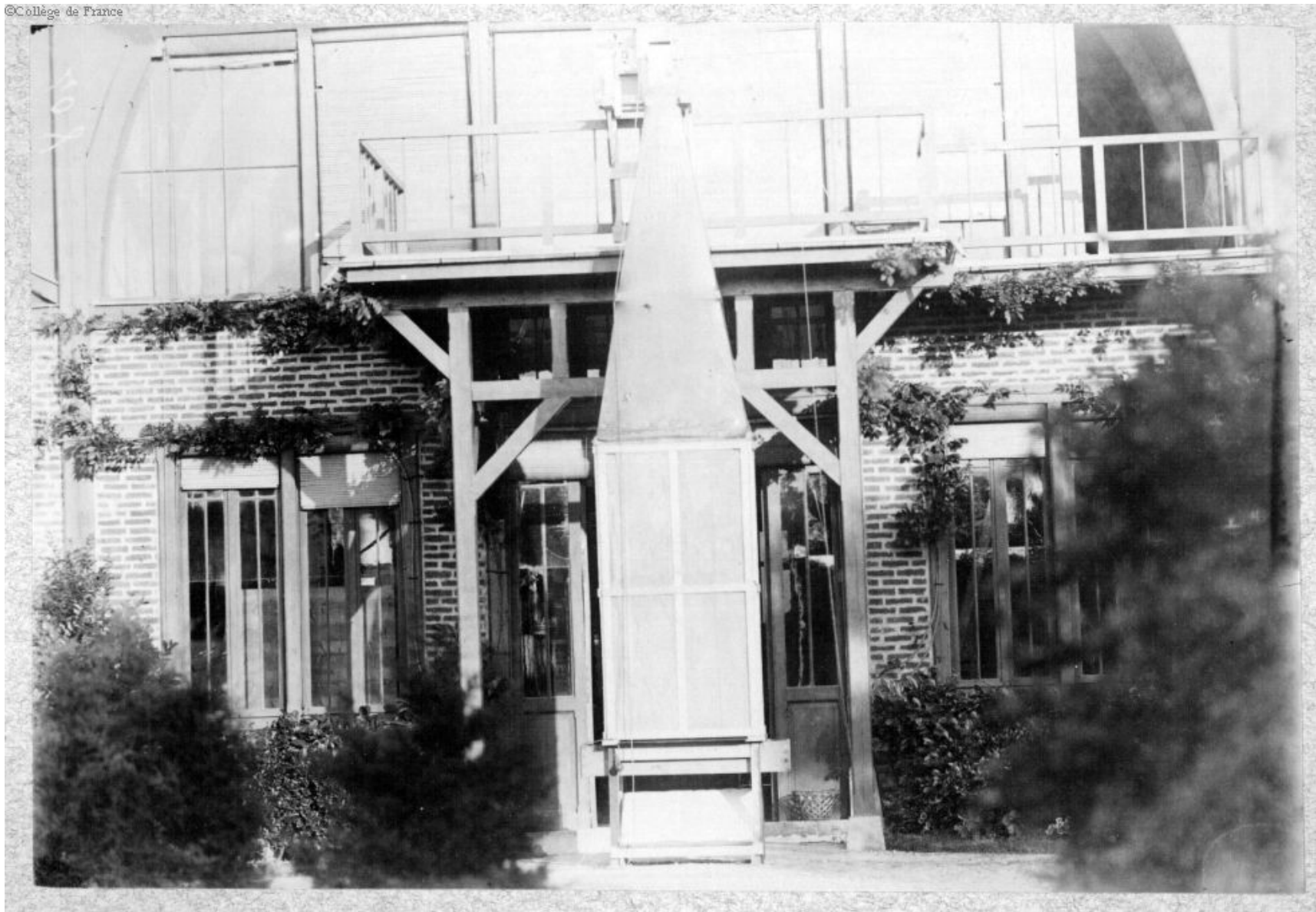
Décomposition des phases d'un mouvement au moyen d'images photographiques successives, recueillies sur une bande de papier sensible qui se déroule.

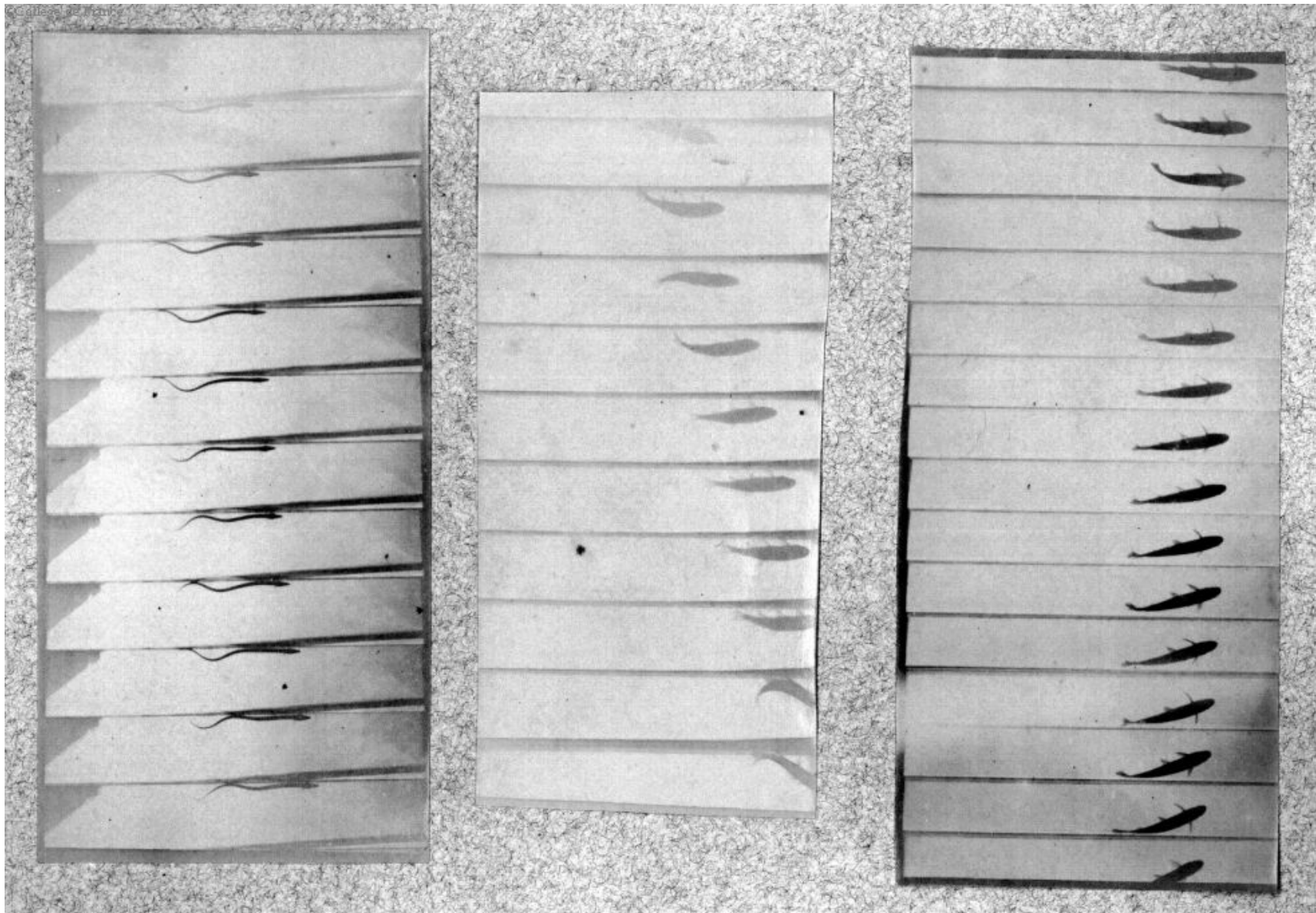
Extrait des *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, t. CVII;
séance du 29 octobre 1888.

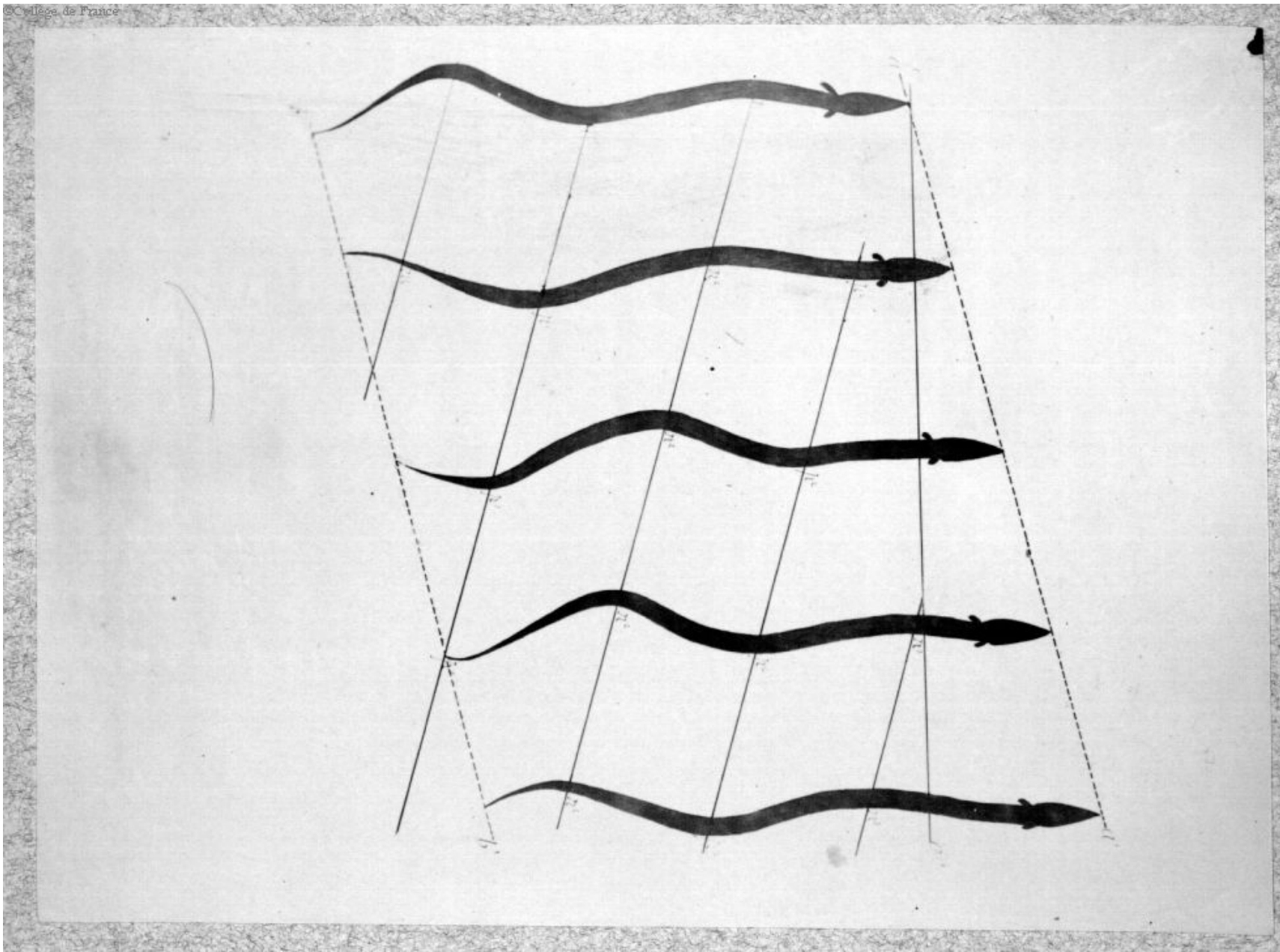
« Pour compléter les recherches dont j'ai entretenu l'Académie dans les dernières séances, j'ai l'honneur de lui présenter aujourd'hui une bande de papier sensible sur laquelle une série d'images a été obtenue, à raison de vingt images par seconde. L'appareil que j'ai construit à cet effet déroule une bande de papier sensible avec une vitesse qui peut atteindre 1^m, 60 par seconde. Cette vitesse excédant mes besoins actuels, je l'ai réduite à 0^m, 80.

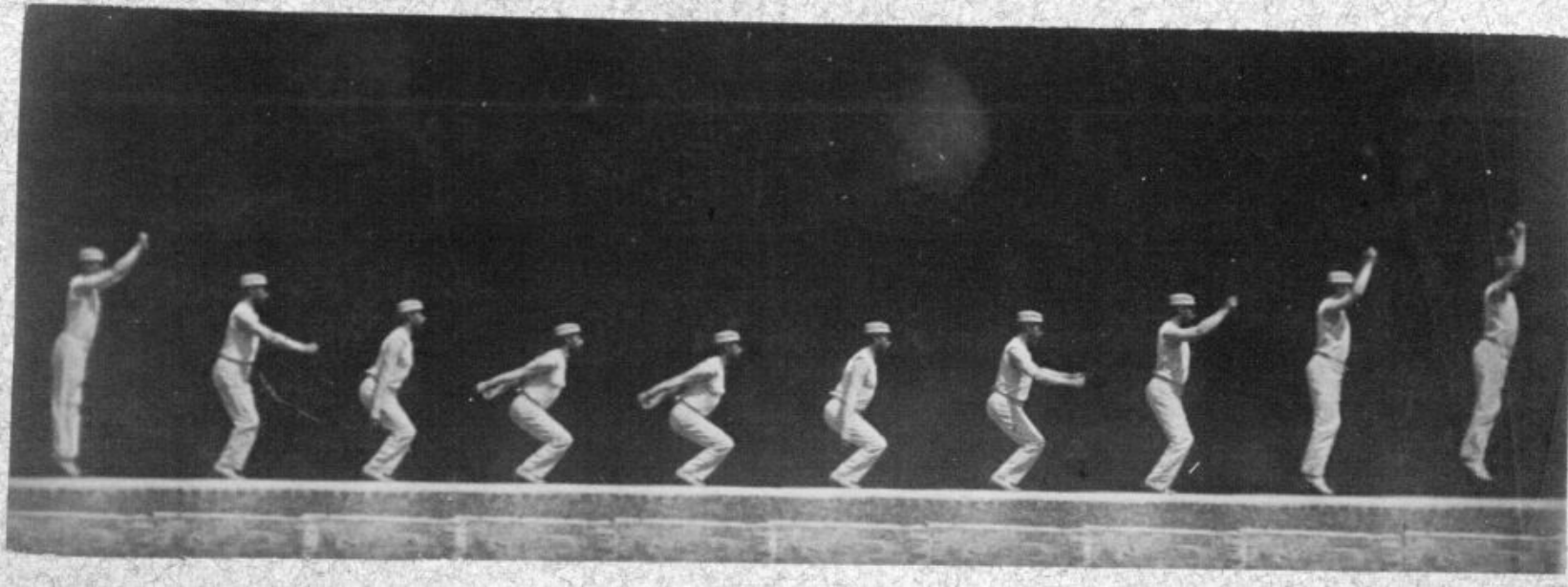
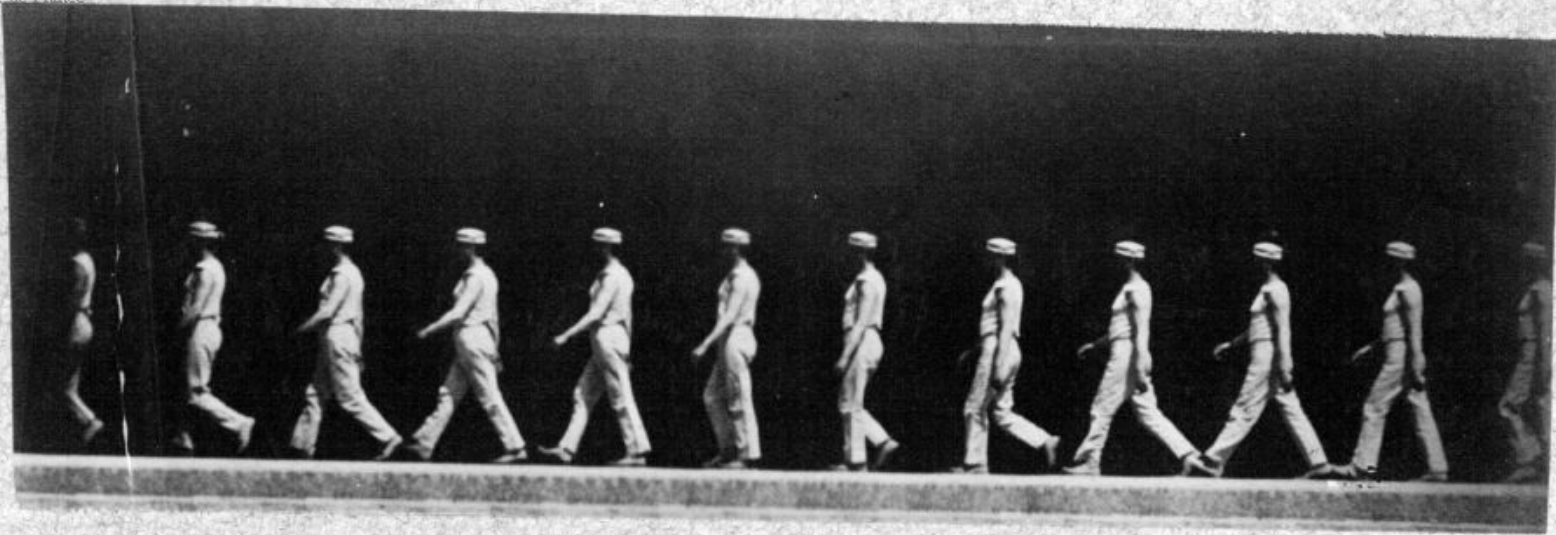
» Si l'on prend les images pendant que le papier se déroule, on n'obtient aucune netteté : on peut seulement apprécier les changements d'attitude du sujet en expérience. Mais si, au moyen d'un dispositif spécial basé sur l'emploi d'un électro-aimant, on arrête le papier pendant la durée de l'éclairage, $\frac{1}{5000}$ de seconde, les images prennent toute la netteté désirable.

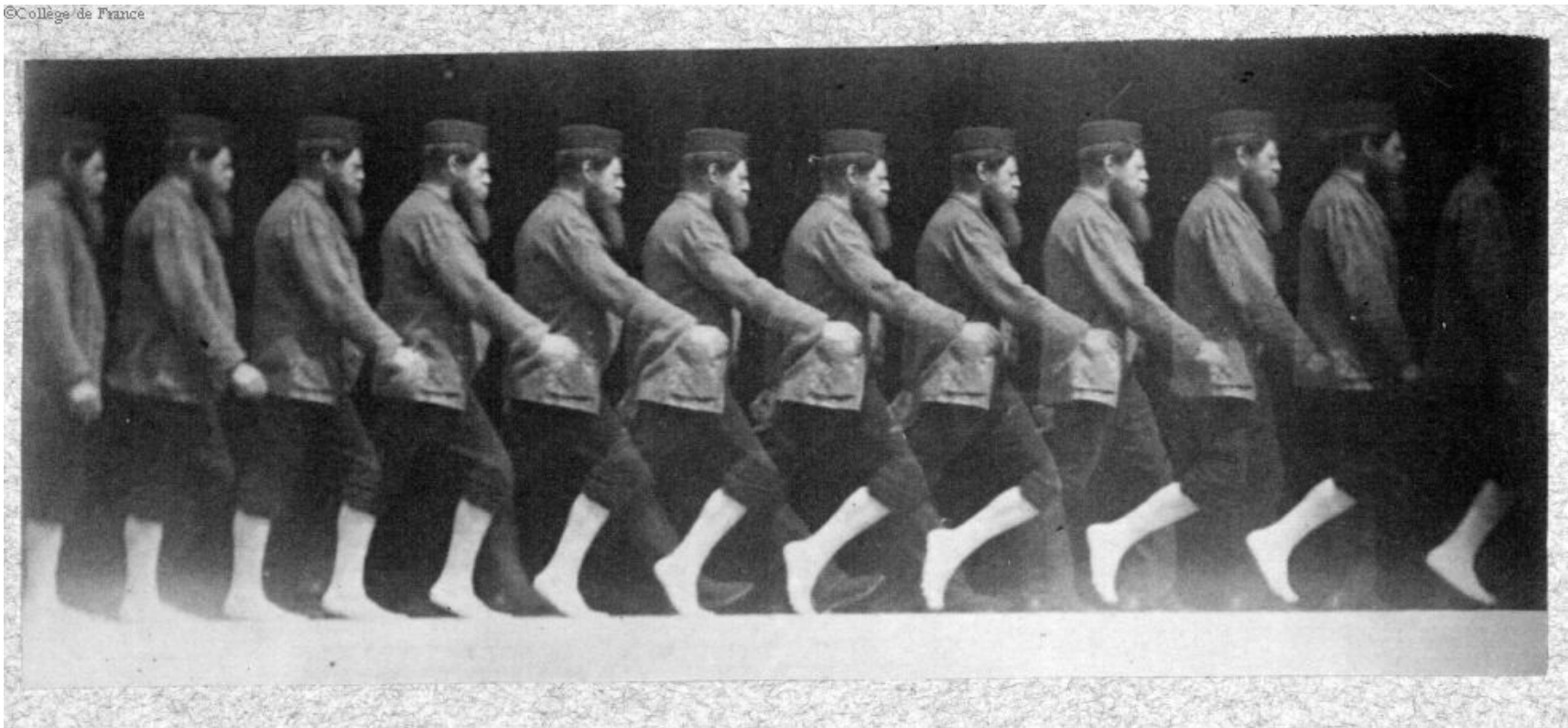
» Cette méthode permettra de recueillir des images successives d'un homme ou d'un animal en mouvement, en s'affranchissant de la nécessité d'opérer devant un fond obscur. Elle semble donc destinée à faciliter grandement les études sur la locomotion de l'homme et des animaux. »

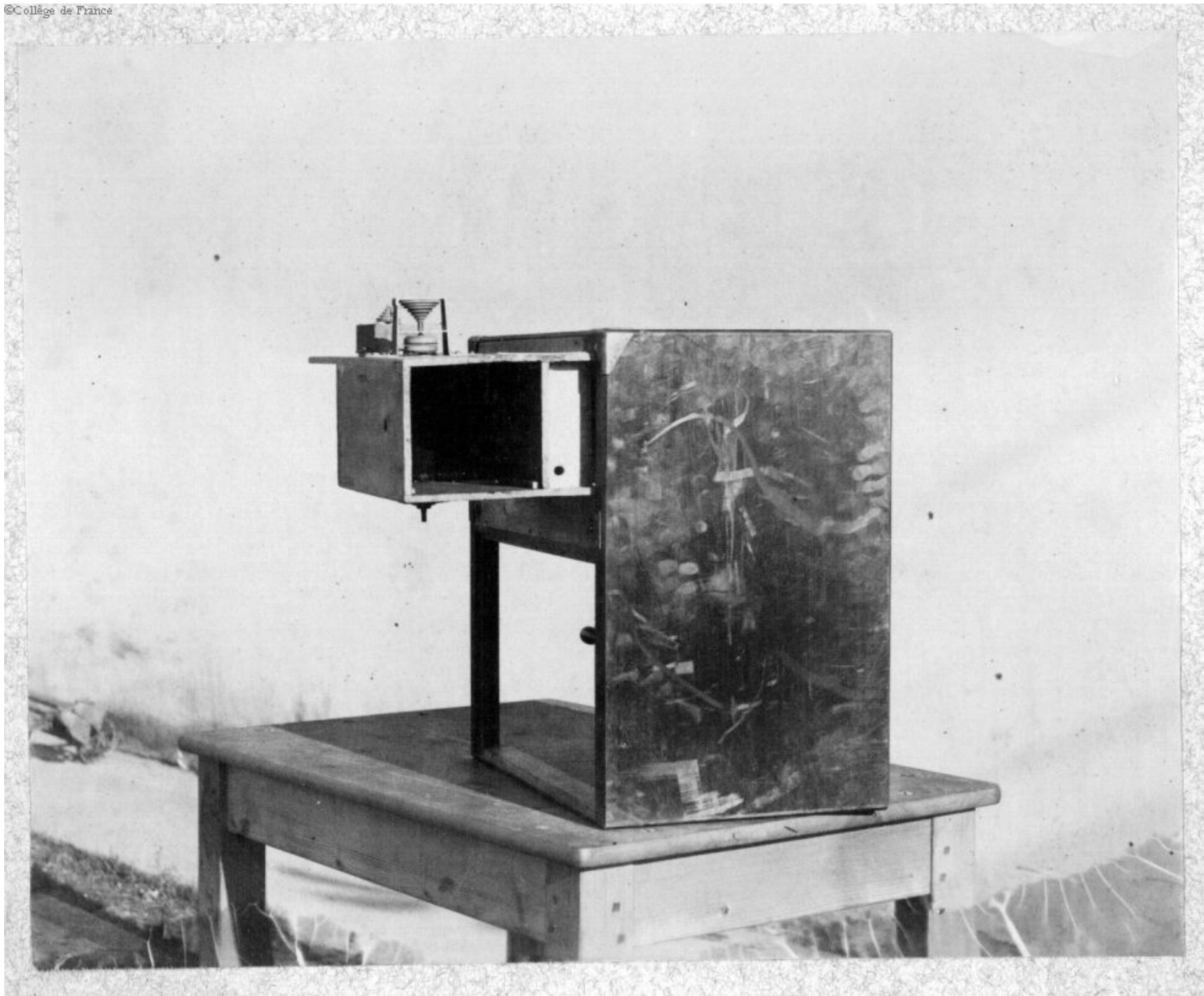


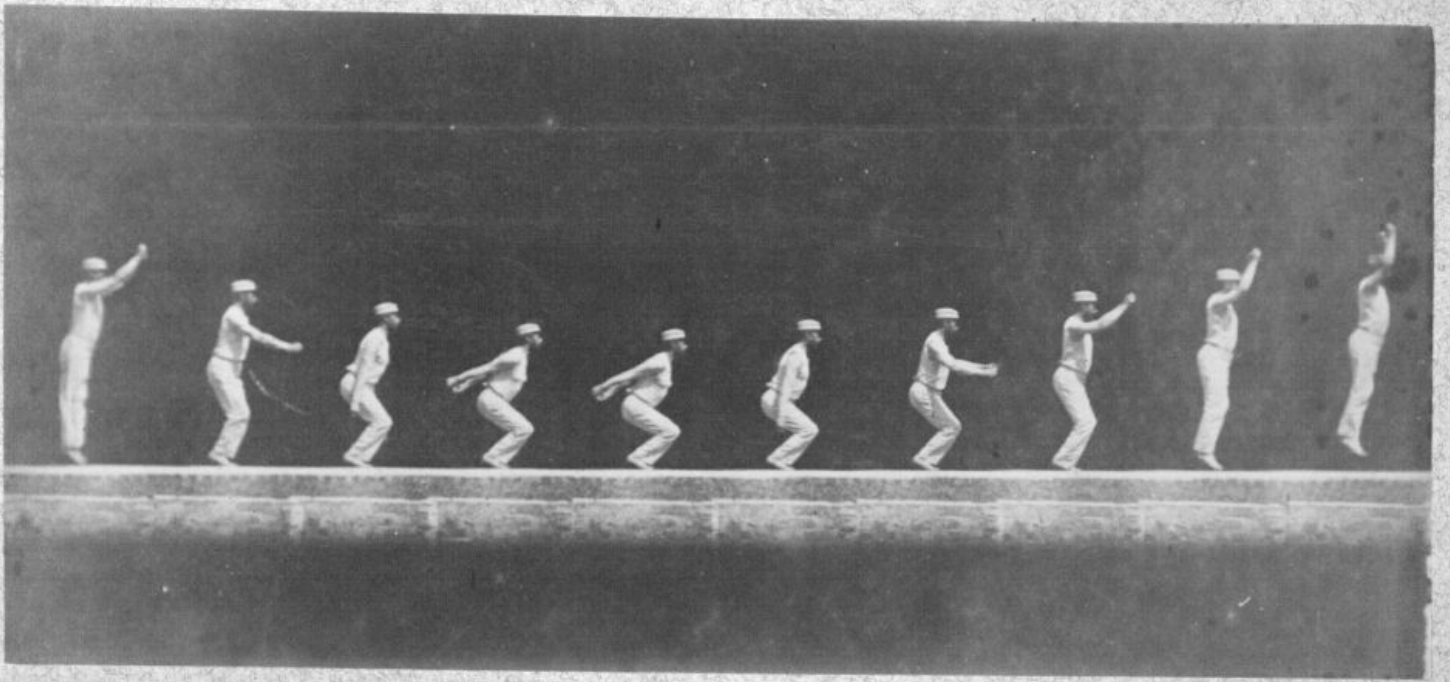
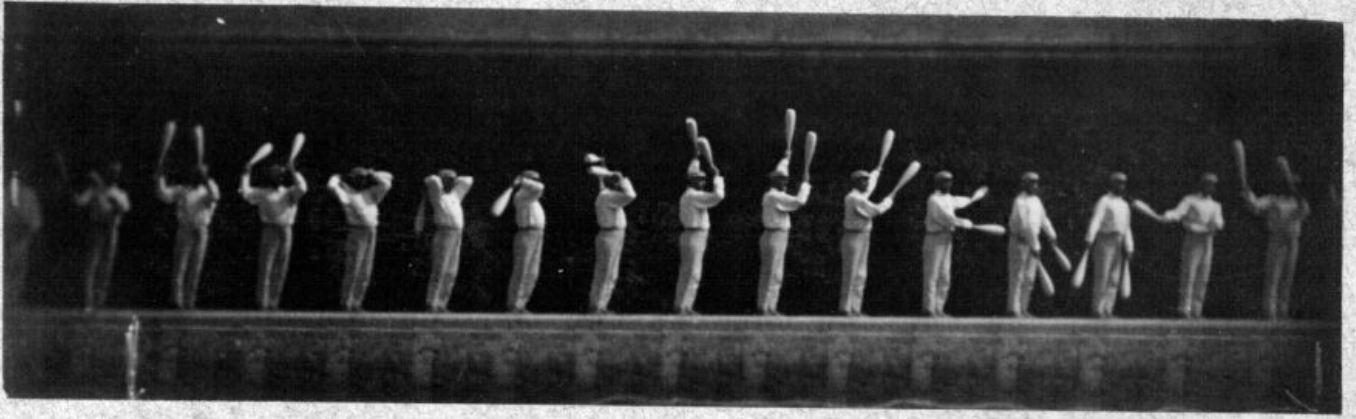


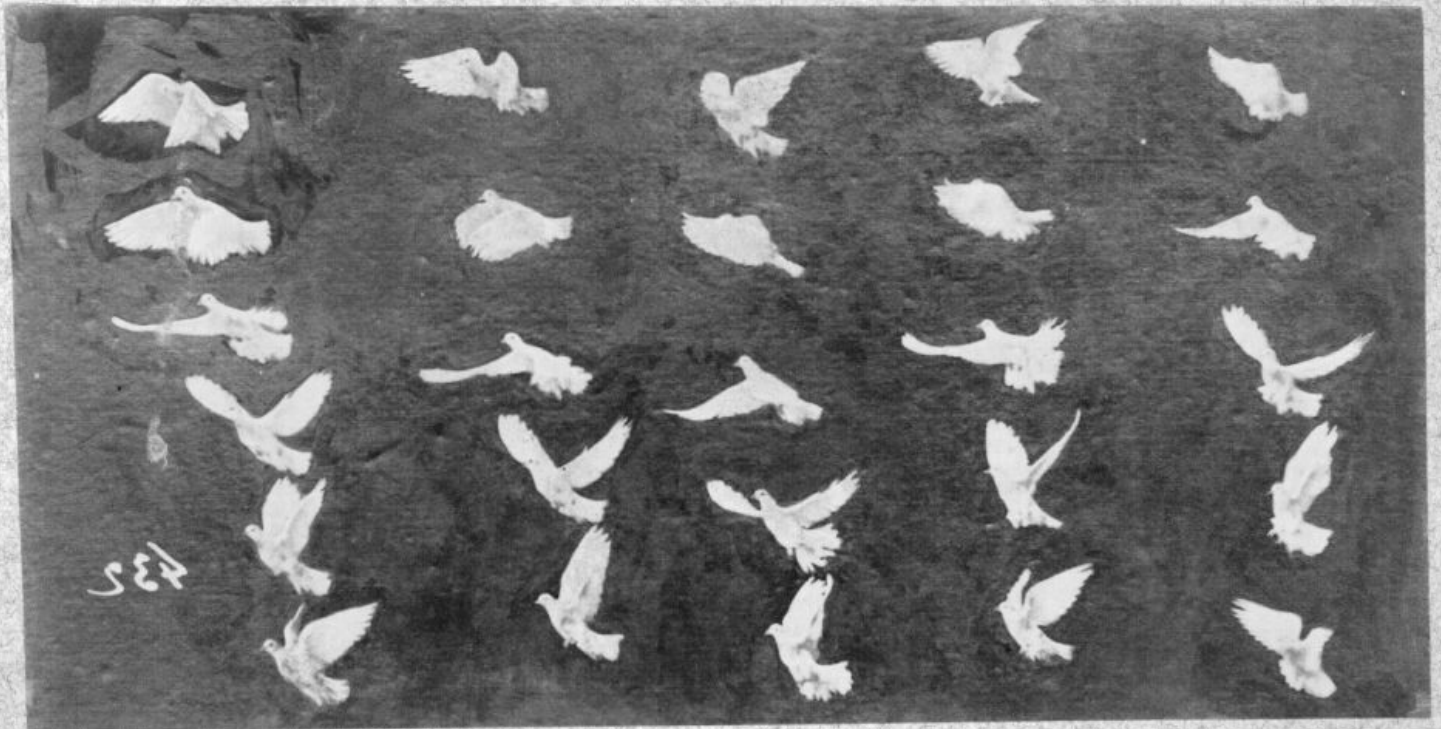
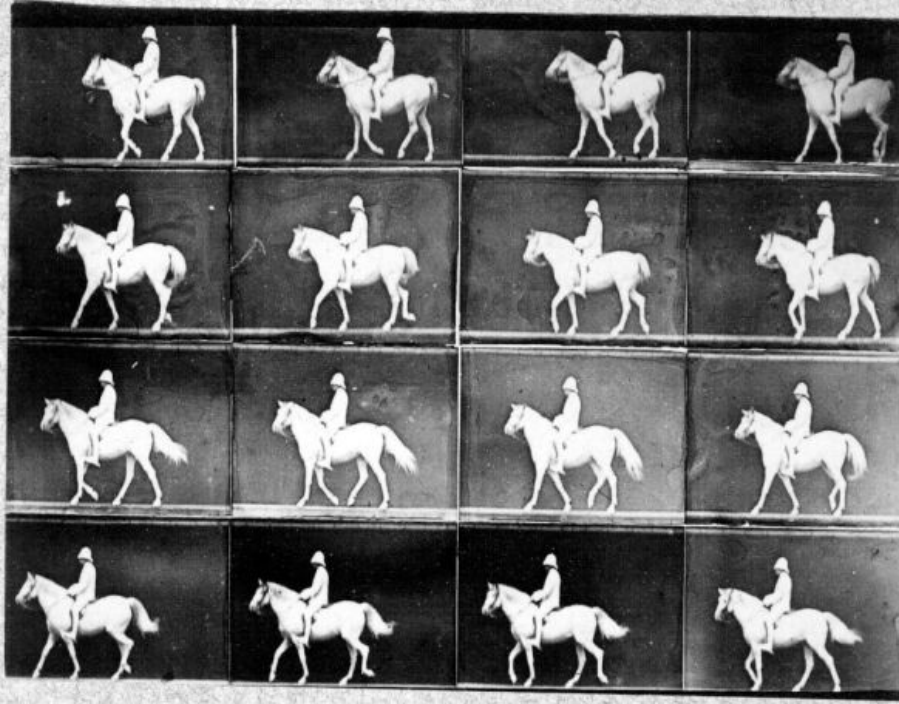


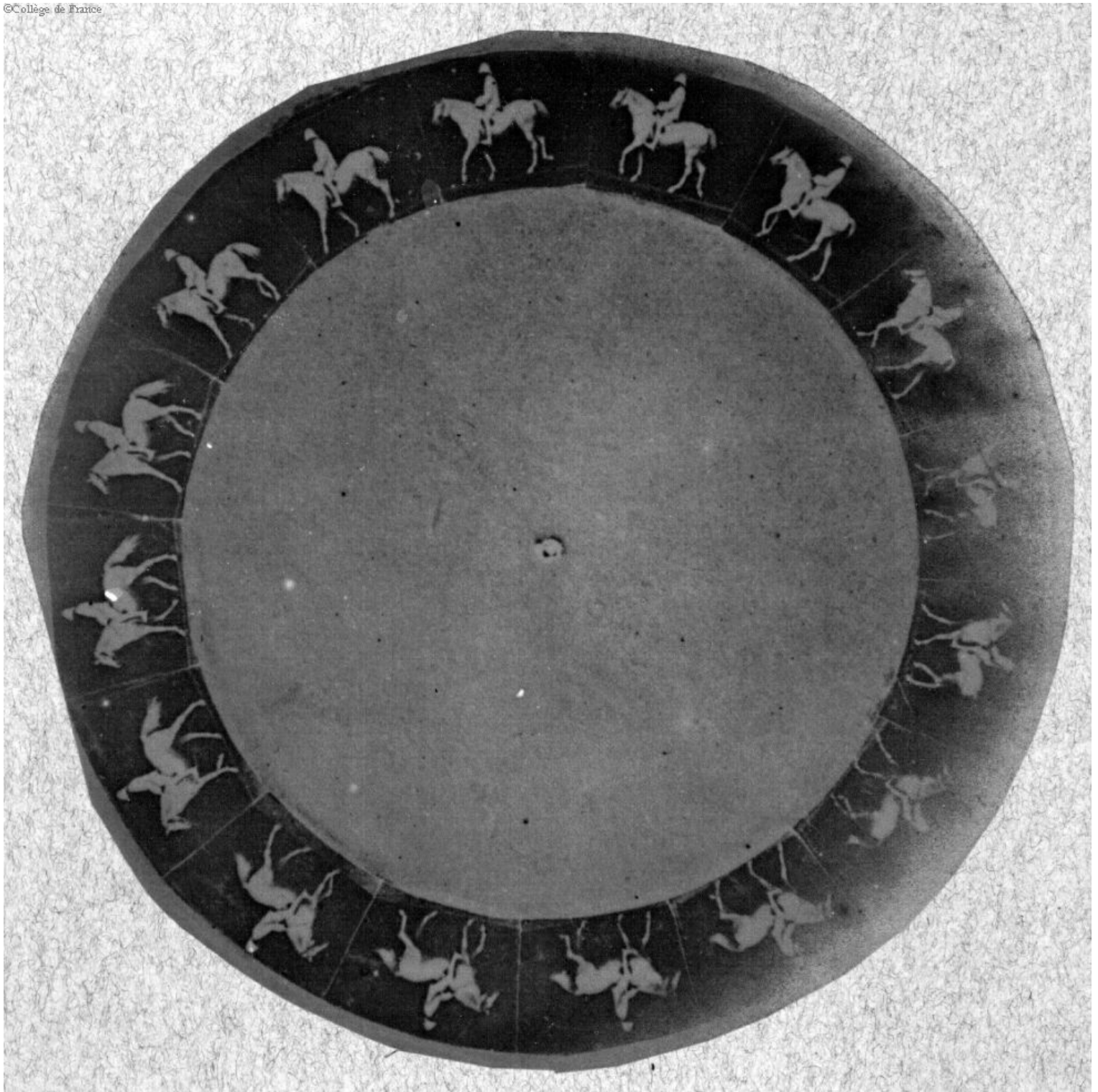












Analyse cinématique de la locomotion du cheval;

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

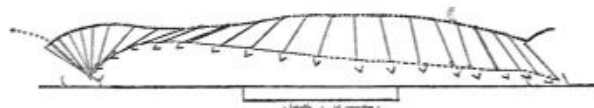
⁽¹⁾ Voir, pour la description des appareils et des expériences, MAREY, *Méthode graphique*, 2^e édition; Paris, 1884.

(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.

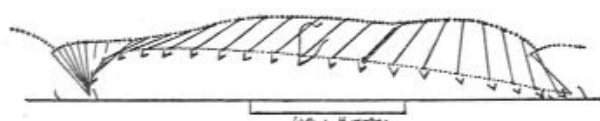
Trajectoires du boulet et du sabot aux différentes allures du cheval.

Fig. 1.



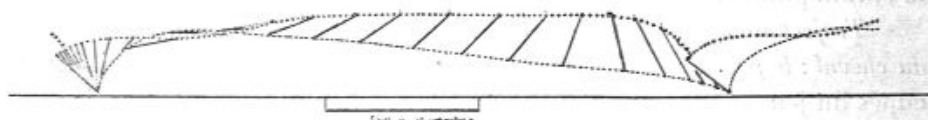
Membre postérieur droit, dans le pas.

Fig. 2.



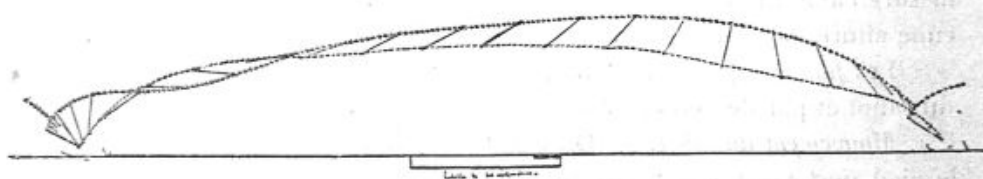
Membre antérieur droit, dans le pas.

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 $\frac{1}{80}$ 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

(3)

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 > 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*, tome CV,
séance du 18 juillet 1887.

*Locomotion comparée : mouvement du membre pelvien chez l'homme,
l'éléphant et le cheval;*

PAR MM. MAREY ET PAGÈS.

« Des recherches récentes sur la locomotion de l'éléphant et du cheval nous ont permis d'établir les analogies et les différences que présente le mouvement du membre postérieur de ces deux quadrupèdes, comparé au mouvement du membre inférieur de l'homme.

» Notre parallèle portera successivement sur les allures marchées et sur les allures sautées communes aux trois types que nous voulons considérer.

I. — ALLURES MARCHÉES.

» Contrairement à ce qui a été admis jusqu'ici, il existe, dans l'allure marchée des quadrupèdes désignée sous le nom de *pas*, une période de double appui plus prononcée dans le bipède postérieur que dans le bipède antérieur. Nous n'insisterons pas, pour l'instant, sur cette phase importante du déplacement, ni sur ses conséquences au point de vue du rythme

M. et P.

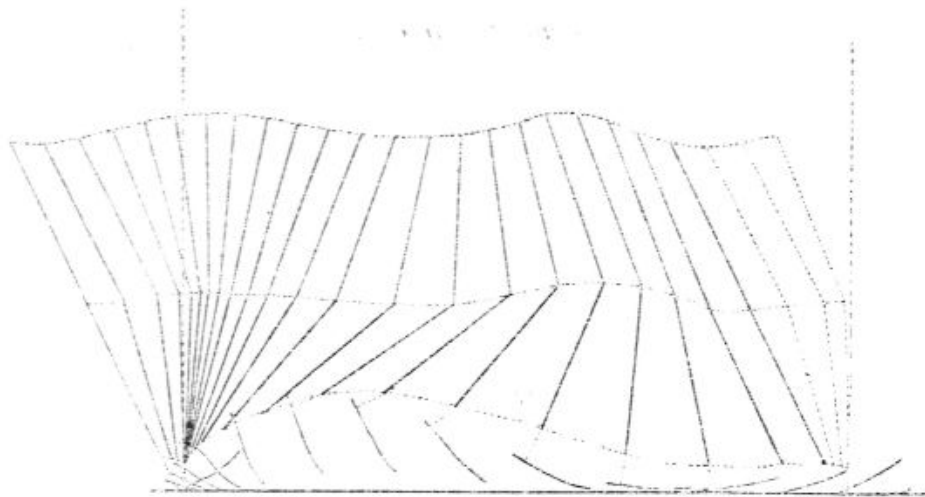
(2)

propre à cette allure; nous ferons remarquer simplement que, au point de vue du mouvement du membre pelvien, elle permet d'assimiler complètement le pas des quadrupèdes à la marche de l'homme.

» MARCHÉ DE L'HOMME, PAS DE L'ÉLÉPHANT ET DU CHEVAL. — Dans les *fig. 1, 2 et 3*, relatives aux allures marchées, et dans les suivantes, nous avons choisi comme échelle commune la longueur absolue du membre pelvien, c'est-à-dire la somme des longueurs des différents rayons qui le constituent.

» A. *Période d'appui.* — Dans les trois types considérés, la période d'appui comprend trois phases distinctes caractérisées : la première par le raccourcissement, la deuxième par la rotation, la troisième par l'allonge-

Fig. 1.

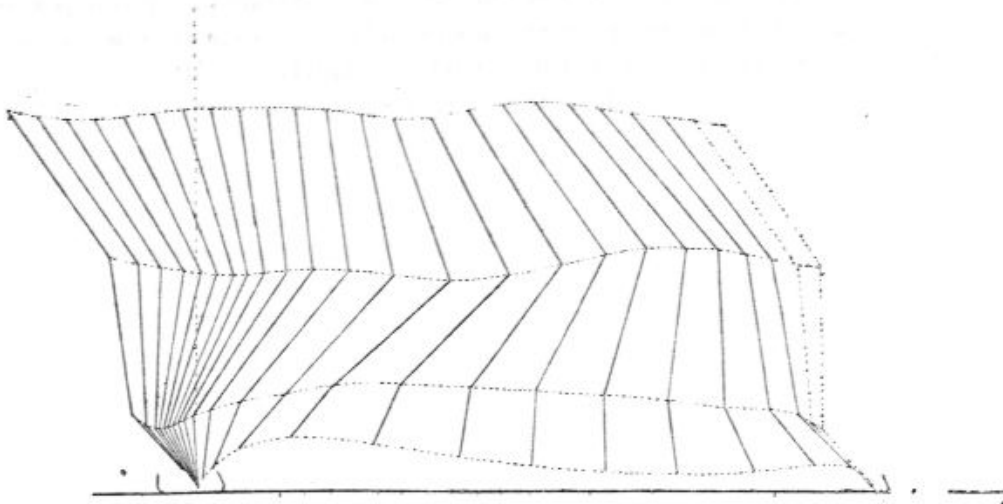


ment du membre pelvien. Pendant la première phase se produit l'annulation graduelle de la réaction du sol : nous proposons de désigner cette première fonction du membre à l'appui sous le nom d'*amortissement de la réaction verticale du sol*; durant la deuxième phase, le membre pelvien, jouant le rôle de rayon tournant autour du point d'appui du pied sur le sol, élève le niveau de la hanche : nous appellerons cette phase *rotation simple*; enfin, pendant la dernière phase, qui commence dès que la hanche a dépassé la verticale passant par le pied, le membre pelvien pousse le corps en avant : nous conserverons à cette troisième fonction le nom d'*impulsion* qu'on lui a si justement donné.

(3)

» Il en résulte donc que, chez l'homme, l'éléphant et le cheval, le membre pelvien à l'appui fait successivement de l'amortissement, de la rotation et de l'impulsion, ce que traduit la trajectoire de la hanche qui s'abaisse d'abord au moment de la chute, décrit ensuite sensiblement un arc de cercle jusqu'à la verticale passant par le pied, puis s'élève en parcourant une courbe convexe supérieurement, pour s'abaisser de nouveau à la fin de l'appui, lorsque l'impulsion est terminée.

Fig. 2.



» Ce mouvement total étant le résultat des mouvements partiels qu'accomplissent les différents rayons du membre, il est intéressant de voir le rôle de chacun de ces segments chez des animaux aussi différemment conformés que ceux qui nous occupent.

» Tandis que, chez l'homme, l'amortissement a lieu uniquement par la flexion du genou et du tarse, cette fonction est remplie en outre, chez l'éléphant, par l'écrasement du pied et par la divergence des rayons digités qui en est inséparable. Pour le cheval, le raccourcissement initial du membre résulte bien moins de la fermeture du genou et du tarse que de l'abaissement et de la rétrogradation de l'articulation métatarso-phalangienne ⁽¹⁾. Il est à remarquer que, grâce aux puissances élastiques (ligament suspenseur du boulet, etc.) qui soutiennent cette articulation,

⁽¹⁾ Voir la Note du 12 octobre 1885.

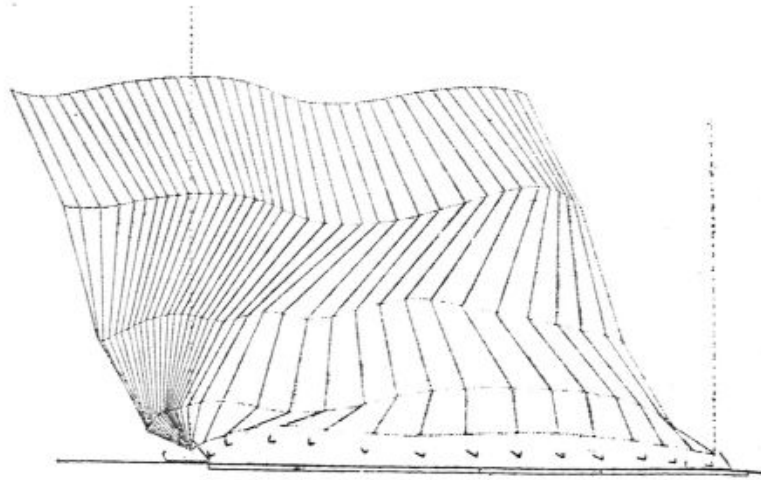
(4)

l'amortissement se fait ici, en partie, par l'intervention d'organes absolument élastiques qui restituent au moment de l'impulsion la force qu'ils ont emmagasinée au moment de la chute.

» Deux rayons seulement, le fémur et le tibia, participent dans l'homme au mouvement de rotation; chez l'éléphant, le rôle joué par les doigts, dans cette phase, est peu considérable, tandis que, chez le cheval, le rayon phalangien et le métatarse prennent une large part au mouvement total.

» Pendant l'impulsion, l'allongement du membre inférieur de l'homme résulte d'abord de l'extension du genou, puis du soulèvement du talon; l'allongement du membre postérieur de l'éléphant est produit par les

Fig. 3.



mêmes segments, mais l'extension de l'articulation du tarse y est beaucoup moins prononcée; dans le cheval, il dépend à la fois de l'extension du genou, de celle du tarse et de celle du boulet.

» Quoique nous négligions pour le moment les variations de vitesse, nous devons signaler comme un fait très intéressant le ralentissement notable du boulet au moment de l'impulsion, ainsi que l'on pourra s'en convaincre par l'examen de la fig. 3.

» B. *Période de soutien.* — Cette période comprend deux phases distinctes : la première, très courte, pendant laquelle le membre se raccourcit; la deuxième, comprenant au moins les $\frac{4}{5}$ du soutien, pendant laquelle le membre s'allonge.

» Le raccourcissement du membre inférieur de l'homme et du membre

postérieur de l'éléphant résulte surtout de la flexion du tibia sur le fémur; celui du membre postérieur du cheval est la conséquence, non seulement de la fermeture du genou, mais aussi de celle du tarse et plus encore de celle du boulet.

» L'allongement du membre offre des considérations analogues. La présence, chez le cheval, d'une corde inextensible en avant du genou et du tarse (portion tendineuse de l'extenseur antérieur du métatarse) rend la flexion du tarse solidaire de celle du genou, et fait que le fémur et le métatarse occupent, l'un par rapport à l'autre, une direction constante.

» Remarquons que, pendant le soutien chez le cheval, les rayons inférieurs (métatarse et phalanges), relativement grêles, prennent une large part au soulèvement du pied et diminuent d'autant la flexion du genou, qui eût mis en mouvement des masses bien plus considérables.

II. — ALLURES SAUTÉES.

» Le trot du cheval correspond incontestablement à la course de l'homme; mais les éléphants sur lesquels nous avons expérimenté (éléphants des Cinghalais) n'avaient pas, à proprement parler, d'allure sautée. Lorsqu'on les forçait à aller très vite, l'un des membres postérieurs touchait le sol au moment où l'autre se levait, et le mouvement de ces organes se rapprochait alors sensiblement de ce qui se passe chez l'homme au moment de la transition de la marche à la course (1).

» COURSE DE L'HOMME; ALLURE RAPIDE DE L'ÉLÉPHANT; TROT DU CHEVAL (fig. 4, 5 et 6). — A. *Période d'appui*. — Au début de chaque appui, le pied exerce sur le sol une pression qui, pour le même animal, dépend de la rapidité du déplacement. Par suite, l'amortissement est ici beaucoup plus intense que dans le pas; comme il ne prend fin que lorsque la hanche a dépassé la verticale passant par le pied, il n'y a pas, dans les allures sautées, de phase de rotation simple, et le membre à l'appui remplit deux fonctions seulement : amortissement et impulsion.

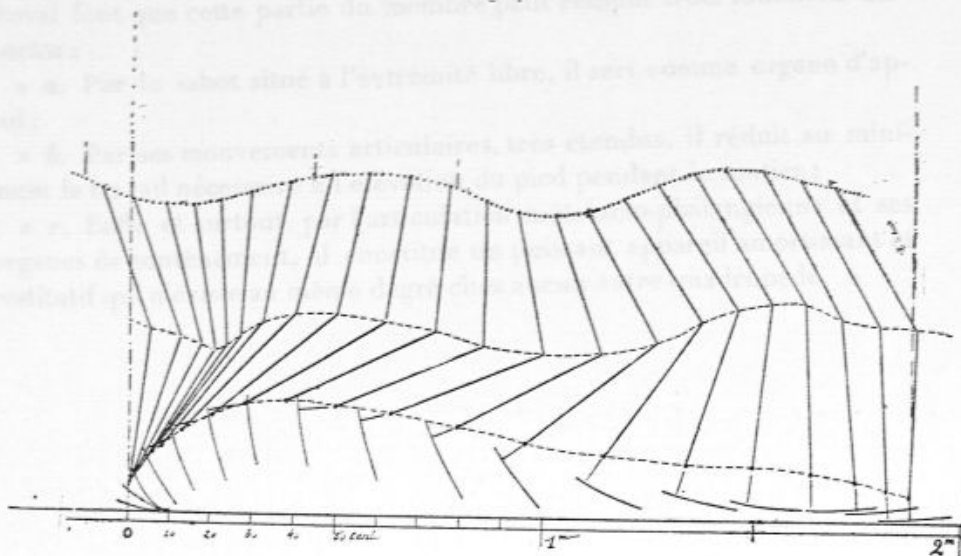
» Chez l'homme, le raccourcissement du membre inférieur et l'abaissement notable de la hanche qui en résulte dépendent uniquement de la flexion du genou et du tarse; chez l'éléphant, il y a en outre écrasement du pied et écartement des rayons digités; chez le cheval, le double mouve-

(1) L'allure du galop n'existant ni chez l'homme ni chez l'éléphant, nous ne la ferons pas entrer dans ce parallèle.

(6)

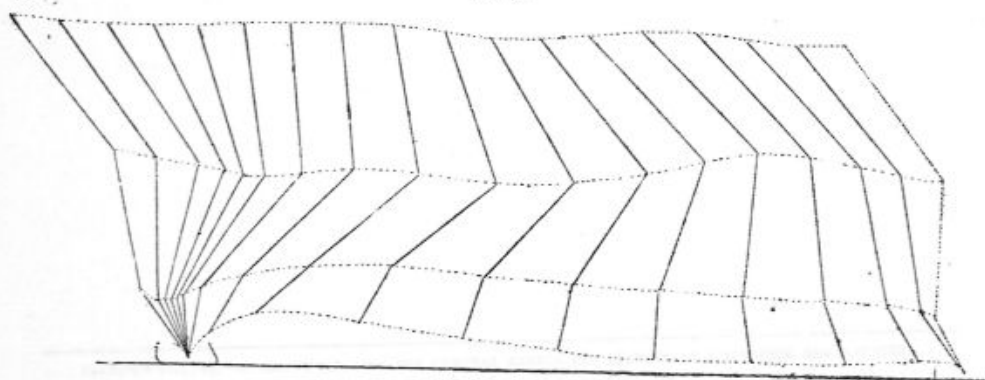
ment d'abaissement et de rétrogradation du boulet que nous avons déjà signalé devient très intense, le genou et le tarse se ferment aussi, mais beaucoup moins, relativement, que dans les deux espèces précédentes.

Fig. 4.



« L'allongement du membre et le soulèvement de la hanche, qui en est la conséquence, résultent, pour l'homme et l'éléphant, de l'extension du

Fig. 5.



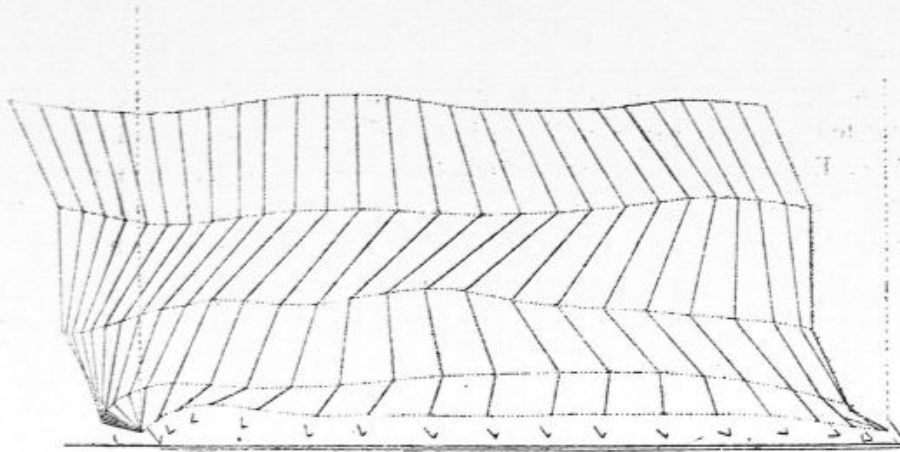
genou et du tarse; pour le cheval, de l'ouverture de ces deux articulations et surtout de celle du boulet.

(7)

» Dans l'homme, le soulèvement rapide du talon se traduit dans le genou par une ascension brusque que l'on ne retrouve pas au même degré dans l'éléphant et le cheval.

» B. *Période de soutien.* — Dans les trois types qui nous occupent, la trajectoire de la hanche présente également deux maxima correspondant aux suspensions pour l'homme et le cheval, à la transition de deux appuis

Fig. 6.



pour l'éléphant, et un minima synchronique de l'appui du membre opposé. Les flexions articulaires du membre sont plus prononcées dans l'homme que dans l'éléphant, dans l'éléphant que dans le cheval; le tibia de l'homme se fléchit fortement au début du soutien pour porter le pied à une certaine hauteur, alors que, dans le cheval, cette fonction est remplie par la flexion des phalanges sur le métatarse.

» Pour ce dernier type, on voit ici bien plus manifestement que dans l'allure du pas la solidarité du mouvement du genou et du tarse, dont nous avons donné plus haut la raison anatomique.

» *En résumé,* dans les allures sautées aussi bien que dans les allures marchées, le mouvement du membre pelvien reste essentiellement le même chez l'homme, l'éléphant et le cheval; ce qui varie, c'est la part de chacun des organes qui y concourent.

» 1° Entre l'homme et l'éléphant les différences sont faibles; elles tiennent à ce que, chez l'homme, le pied ne s'écrase pas sensiblement, tandis que, chez l'éléphant, un énorme coussinet plantaire qui fait de cet

animal un intermédiaire entre les plantigrades et les digitigrades, la disposition des rayons phalangiens pouvant s'éloigner l'un de l'autre permettent l'écrasement de l'organe d'appui.

» 2° Entre l'homme ou l'éléphant et le cheval, les différences sont beaucoup plus grandes.

» La disposition anatomique et le développement énorme du pied du cheval font que cette partie du membre peut remplir trois fonctions distinctes :

» *a.* Par le sabot situé à l'extrémité libre, il sert comme organe d'appui ;

» *b.* Par ses mouvements articulaires, très étendus, il réduit au minimum le travail nécessaire à l'élévation du pied pendant le soutien ;

» *c.* Enfin et surtout, par l'articulation métatarso-phalangienne et ses organes de soutènement, il constitue un puissant appareil amortissant et restititif qui n'existe au même degré chez aucun autre quadrupède. »

