

Bibliothèque numérique

medic@

**Marey, Etienne-Jules. - Marey / 1886 /
Station / physiologique / II /
Locomotion / humaine**

Paris, 1886 (circa).

Cote : Archives du Collège de France



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

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

INSTITUT MAREY

159

COLLÈGE DE FRANCE
INST MAREY

COLLÈGE DE FRANCE
INSTITUT MAREY
N° 159

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

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

Analyse cinématique de la marche;

PAR M. MAREY.

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

» La *fig. 1* montre ainsi la série des attitudes des membres du côté droit, avec les positions de la tête, chez un homme qui marche d'un pas assez rapide. Les photographies ont été prises à des intervalles de $\frac{1}{40}$ de seconde, la longueur d'un pas complet étant de 1^m,75, la vitesse de l'allure 6300^m à l'heure.

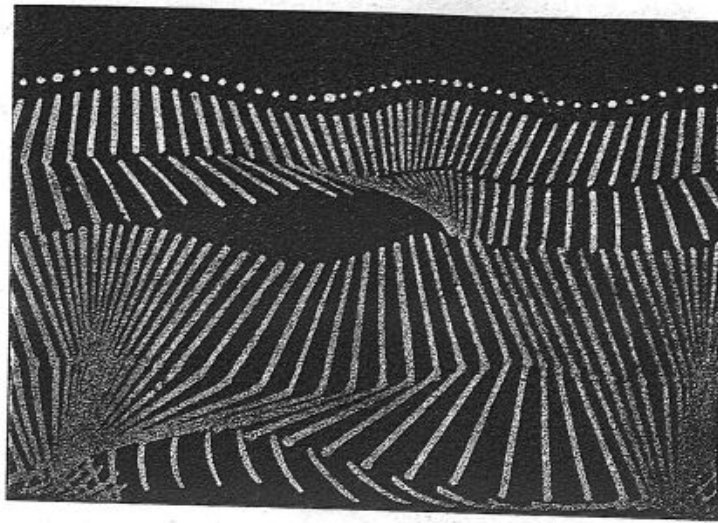
» Sur ces épreuves agrandies, on peut étudier, comme sur une épure, les lieux géométriques de chacune des articulations du membre inférieur, la façon dont chacun d'eux s'engendre, ainsi que la part d'action qui revient, dans la progression, à la pesanteur et à l'action musculaire.

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

(2)

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

Fig. 1.



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

ÉTUDE CINÉMATIQUE DE LA MARCHÉ DE L'HOMME.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(4)

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

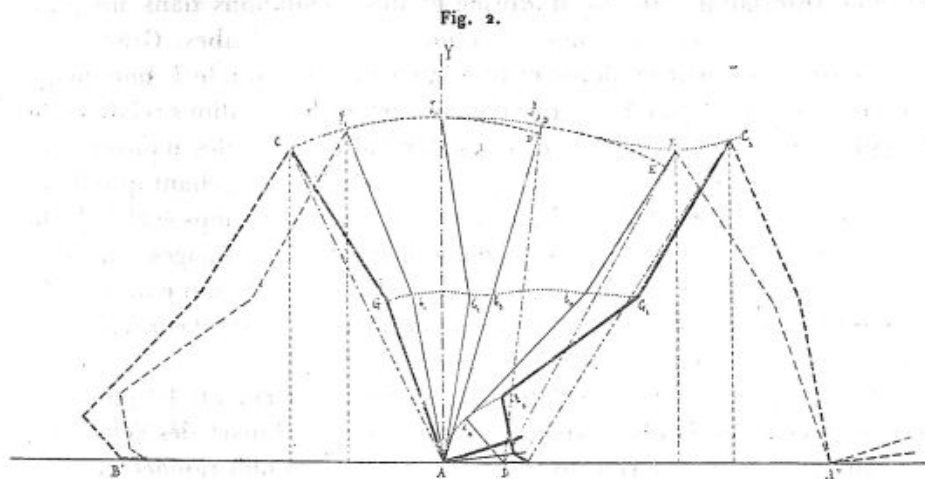
» A. *Mouvements du membre inférieur pendant la période d'appui du pied.*

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

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

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

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



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

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

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

» Dans la première phase de l'appui, c'est-à-dire lorsque le talon touche le sol, le genou G décrit un arc de cercle ξ^1, ξ^2 , dont le centre serait à la cheville du pied; dans la seconde phase, ξ^3, ξ^4, G_1 , ce mouvement se combine au déroulement du pied autour de l'extrémité des métatarsiens, mouvement dont la description a été donnée plus haut.

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

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

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

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

» Sous ces influences diverses, la trajectoire de la hanche C, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, C_1$

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

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

» Lorsque le pied droit s'est posé sur le sol en A, le pied gauche était encore appuyé par sa pointe; le corps reposait donc sur les deux pieds à la fois, et ce *double appui* a duré jusqu'au moment où la hanche est représentée en γ , et le genou en δ' . De même, à la fin de la *fig. 2*, lorsque le pied droit est en B et la hanche en E, le pied gauche se pose sur le sol; un double appui se produit encore et dure jusqu'au moment où la hanche est en C₁.

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

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

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

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

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

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

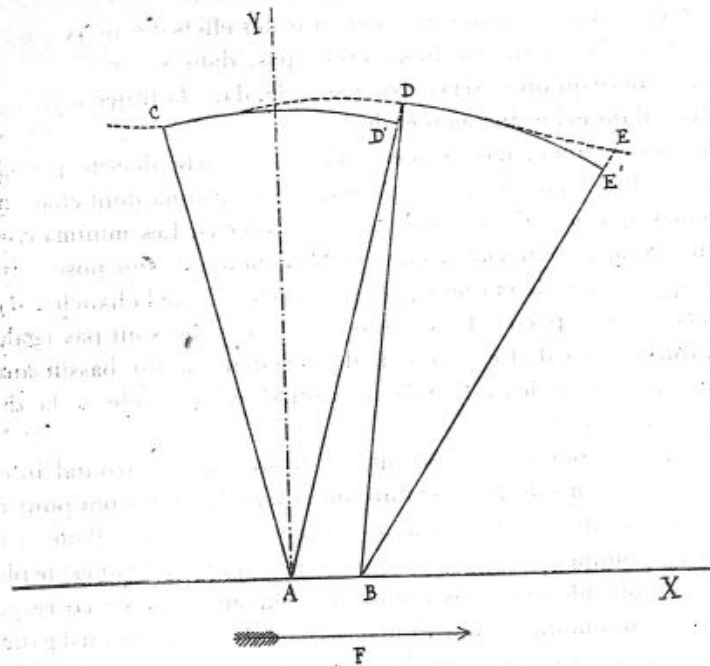
» Les oscillations du bassin autour de son axe horizontal interfèrent avec les ondulations de la trajectoire de la hanche; elles ont pour effet de rendre fort inégaux les deux minima de cette trajectoire. Pour la hanche droite, le minimum qui se produit après le levé du pied droit est le plus bas, parce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

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

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

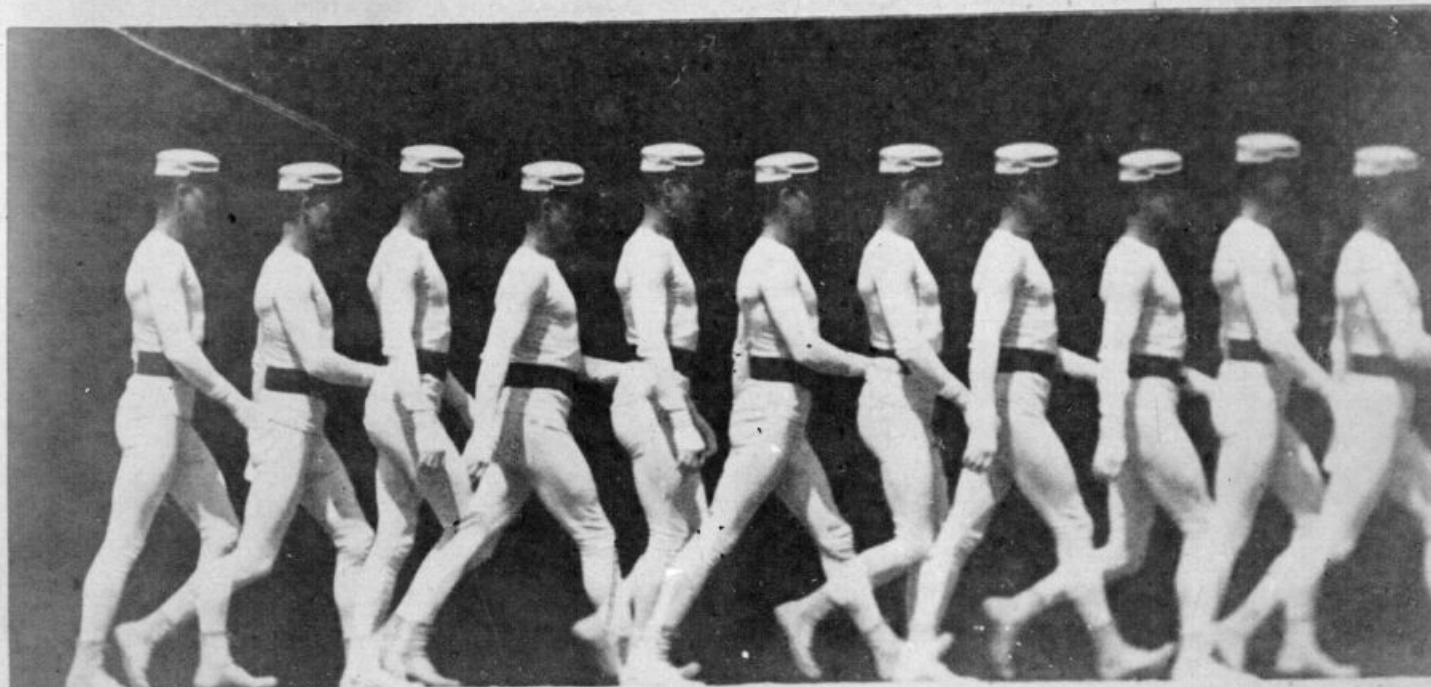
» Si l'on voulait réduire à son expression cinématique la plus simple le mouvement de la hanche et, par conséquent, du tronc sur sa trajectoire, pendant l'appui du pied correspondant, on caractériserait ce mouvement par la *fig. 3*. Dans cette figure, pendant une première phase, le membre tourne autour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

Fig. 3.



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

M^r Schenkel
Société - Alsacienne - Lorraine



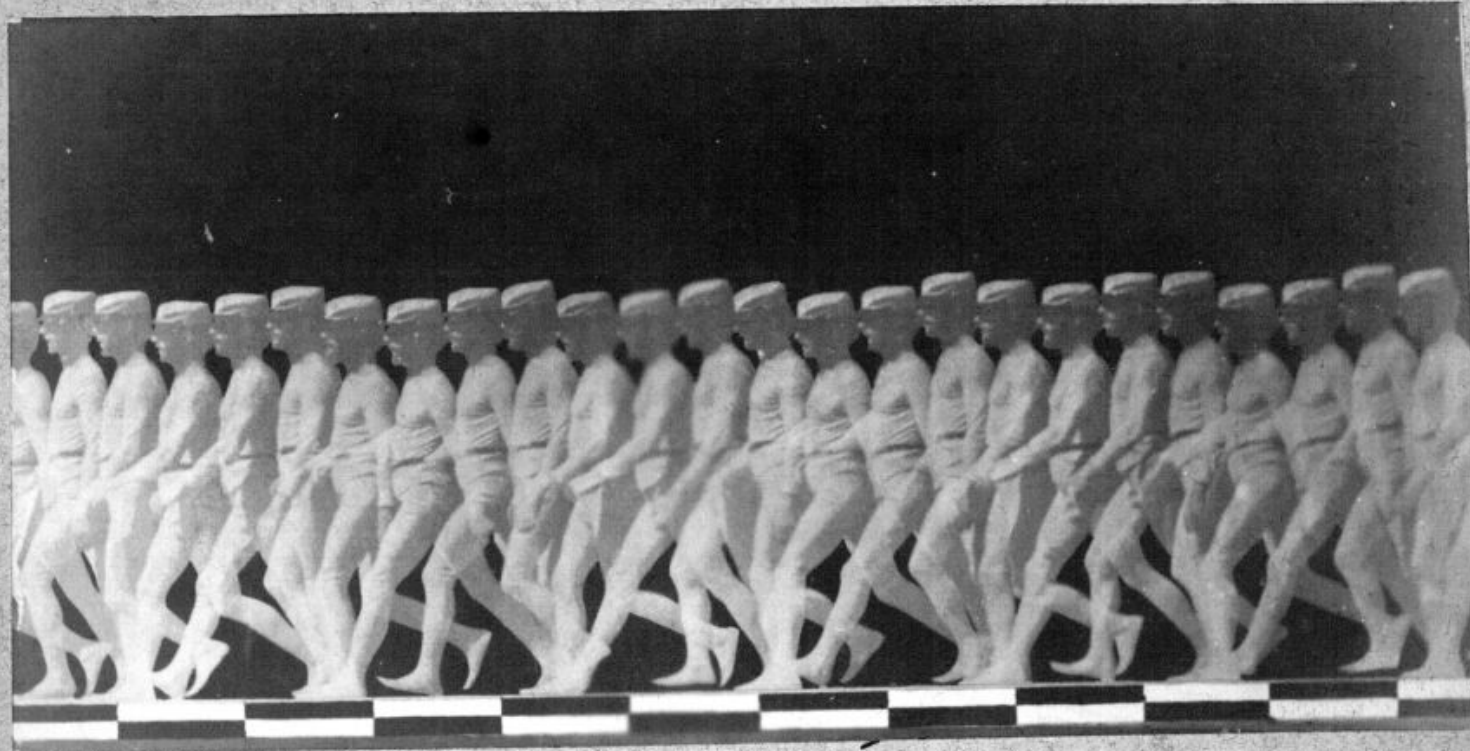
N^o 135

Sujet M^r Schenkel.

Analyse de la marche par des photographies
successives et complètes

Locomotion Humaine

Analyse Cinématique



← 1 m. — × N° 10

Images successives d'un marcheur prises sur la même
plaque photographique à des intervalles
de temps égaux

Locomotion Humaine

Analyse Cinématique



N°12

Images successives prises sur une même plaque photographique

pas de parade (Suj. M. Viata)

Étab. d. J. J. M. L. le Pont

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

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

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

PAR MM. MAREY ET DEMENY.

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

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

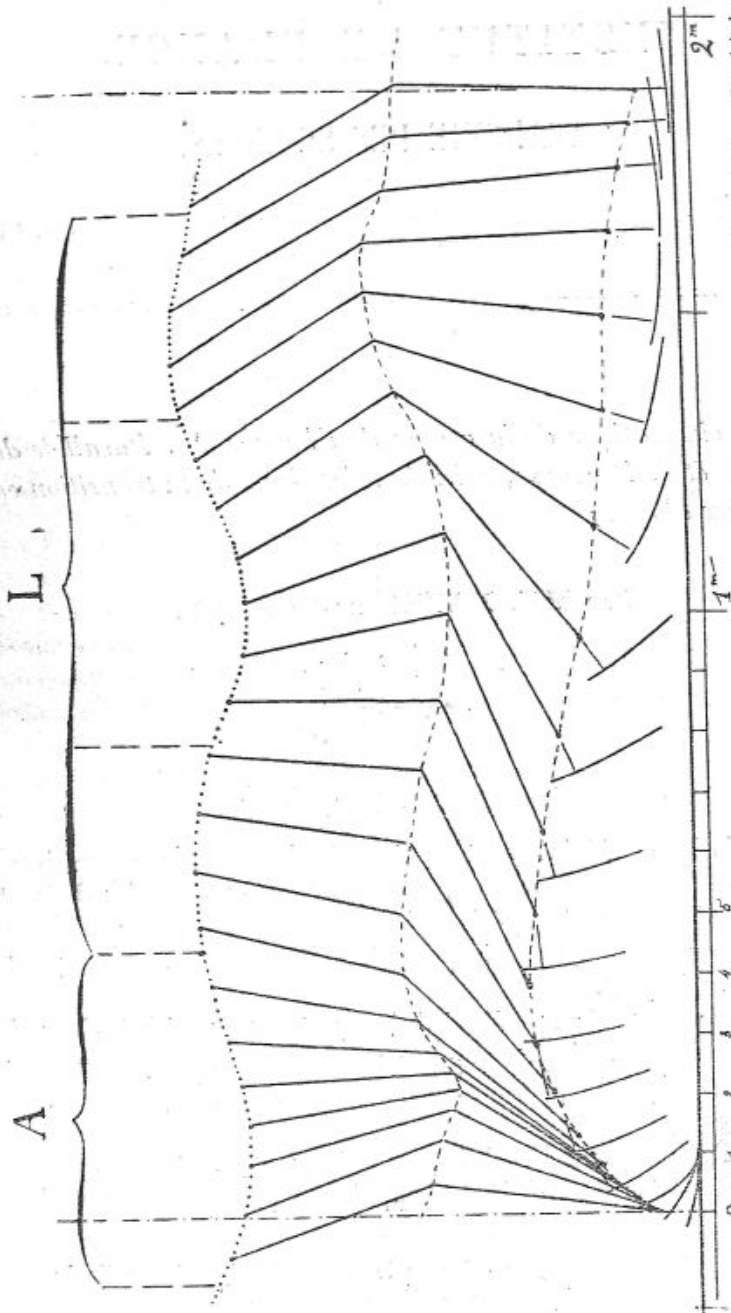
» Dès qu'elle a touché le sol, la plante du pied y reste appliquée pendant un peu moins de moitié de l'appui; elle pivote ensuite autour de

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

M. et D.

CINÉMATIQUE DE LA COURSE.

MOUVEMENTS DE MEMBRE INFÉRIEUR DROIT.



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

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

l'extrémité des métatarsiens, et, dans ce déroulement, l'angle décrit peut être de 90° , de sorte que la face plantaire du pied soit à peu près verticale. L'emploi de semelles plus ou moins rigides et plus ou moins longues reporte le centre de déroulement du pied en avant des métatarsiens et même au delà de l'extrémité des orteils.

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

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

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

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

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

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

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

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

(4)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

M. et D.

1.

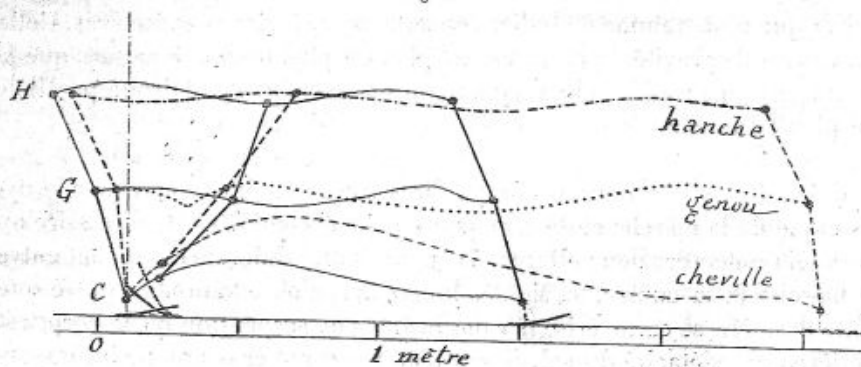
(6)

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

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

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

Fig. 1.



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

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

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

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

Marche.

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

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

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

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

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

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

Course.

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

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

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

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

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

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

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

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

Marche.

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

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

Course.

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

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

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

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

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

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

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

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

Marche.

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

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

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

Course.

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

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

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

(9)

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

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

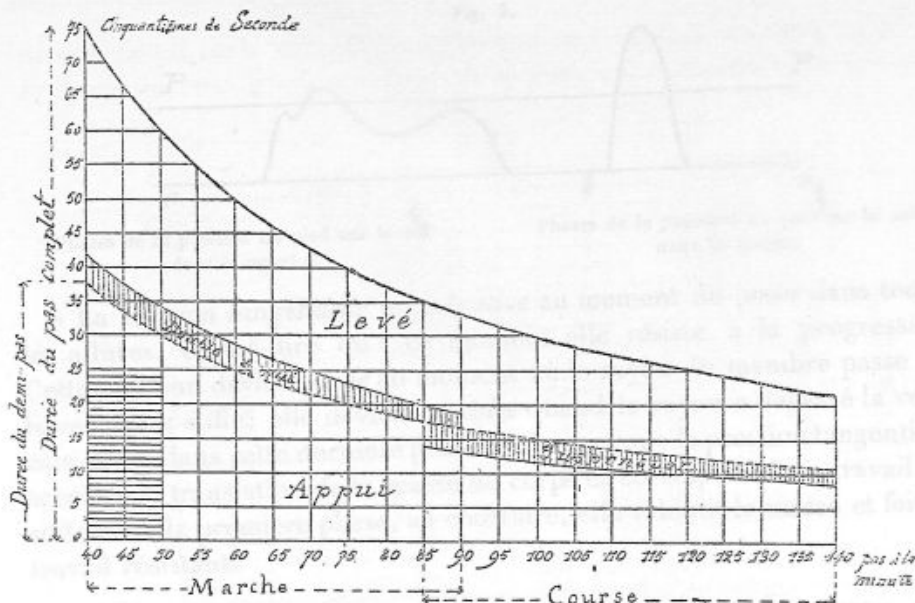
» La *longueur du pas* règle l'amplitude des oscillations verticales; ces oscillations croissent avec cette longueur.

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

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

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

Fig. 2.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

Marche.

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

Course.

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

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

LOI DES LONGUEURS DE PAS ET DES VITESSES DE PROGRESSION.

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

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

Marche.

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

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

Course.

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

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

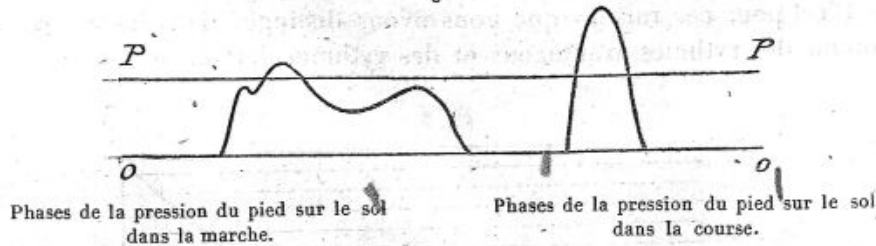
(1) Voir la Note du 3 novembre 1884.

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

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

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

Fig. 3.



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

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

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

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

⁽²⁾ Note du 9 novembre 1885.

(12)

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

Marche.

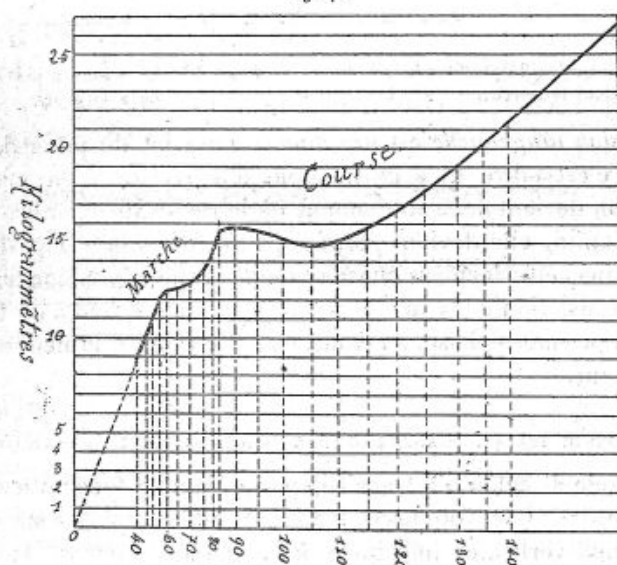
La dépense de travail croît toujours avec la vitesse de progression, et cet accroissement est très grand pour les allures qui dépassent les cadences normales de 55 à 65 doubles pas à la minute.

Course.

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

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

Fig. 4.



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

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

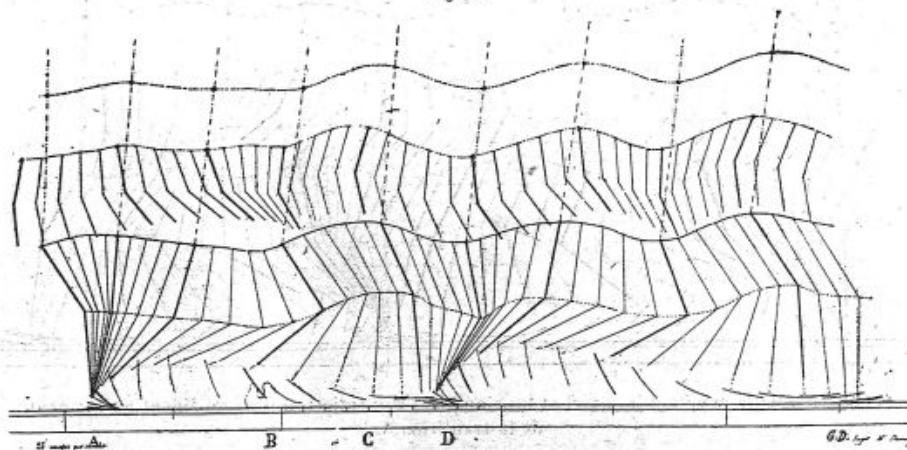
vue de l'utilisation économique de la force musculaire, utilisation qui est le but final de nos études sur la locomotion.

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

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

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

Fig. 5.



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

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

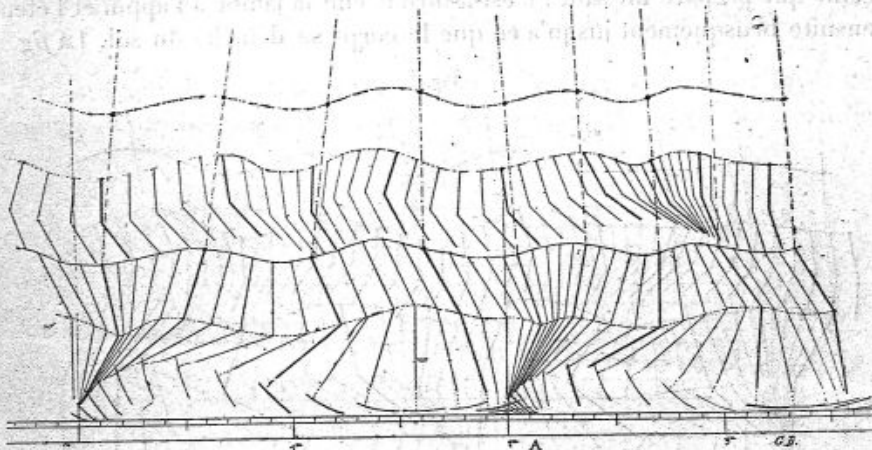
» *De la course à la marche* la transition est inverse (*fig. 6*) : le coureur ralentit sa vitesse en penchant le corps en arrière. L'appui prochain A est

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

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

Fig. 6.

sans changement de rythme

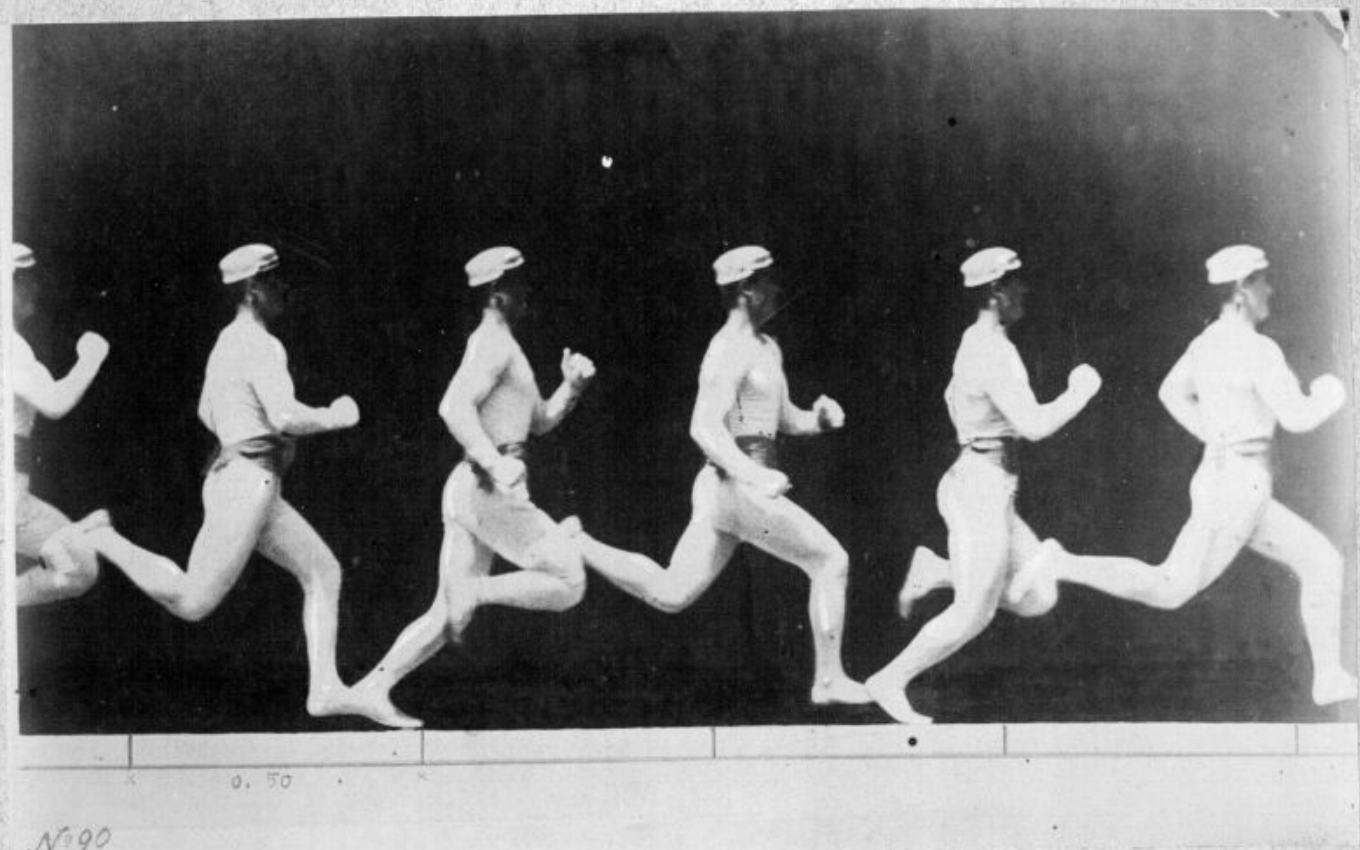


Transition de la course à la marche; les sinuosités des trajectoires se modifient au moment de la transition A.

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

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

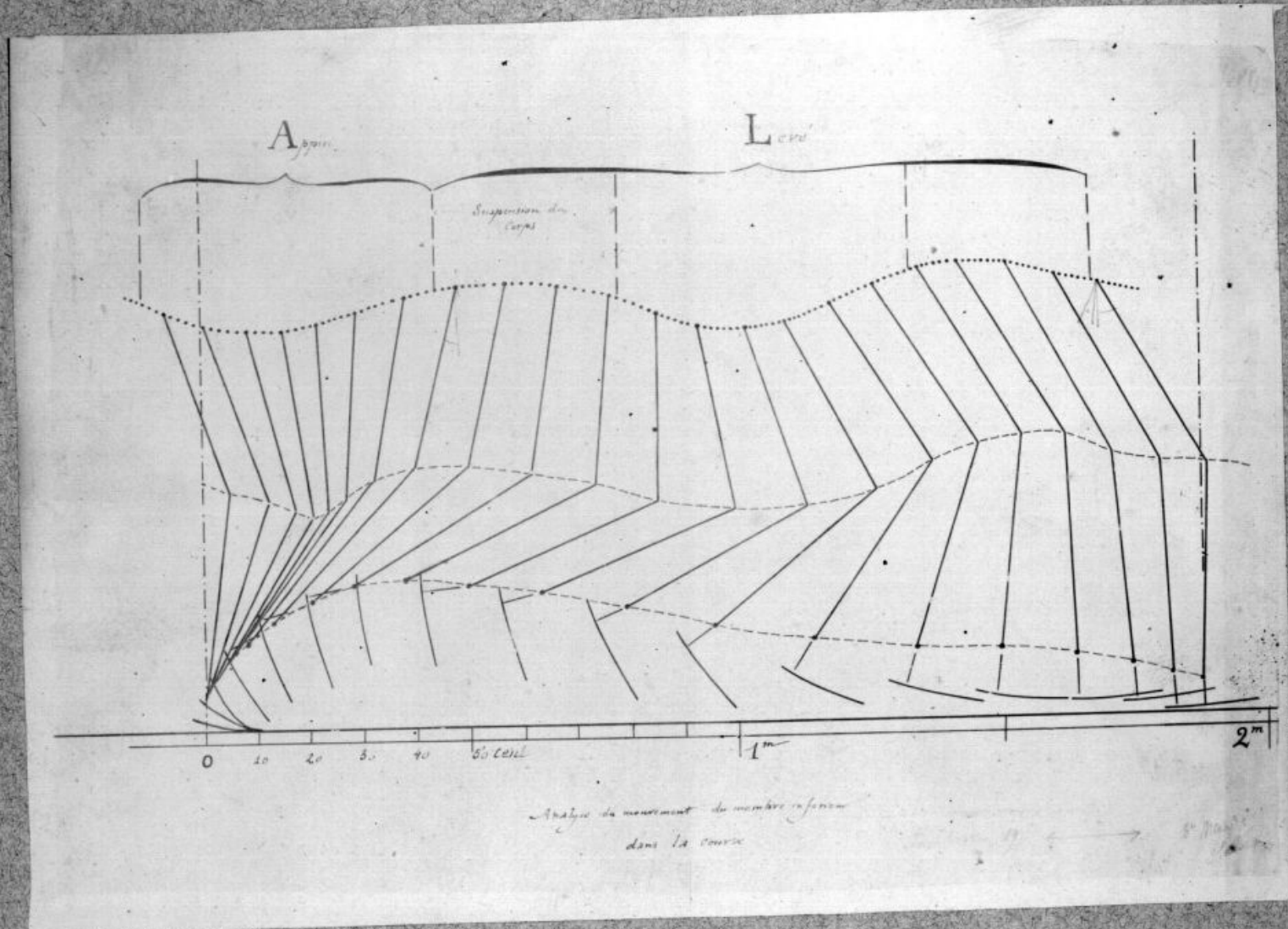
Course de vitesse



N°90

10 images par seconde

Sujet M. Franck (Abdennour-Torano)



Analyse du mouvement du membre inférieur dans la course

N°192

Analyse du mouvement du membre inférieur dans la course

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

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

Locomotion humaine, mécanisme du saut;

PAR MM. MAREY ET G. DEMENY.

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

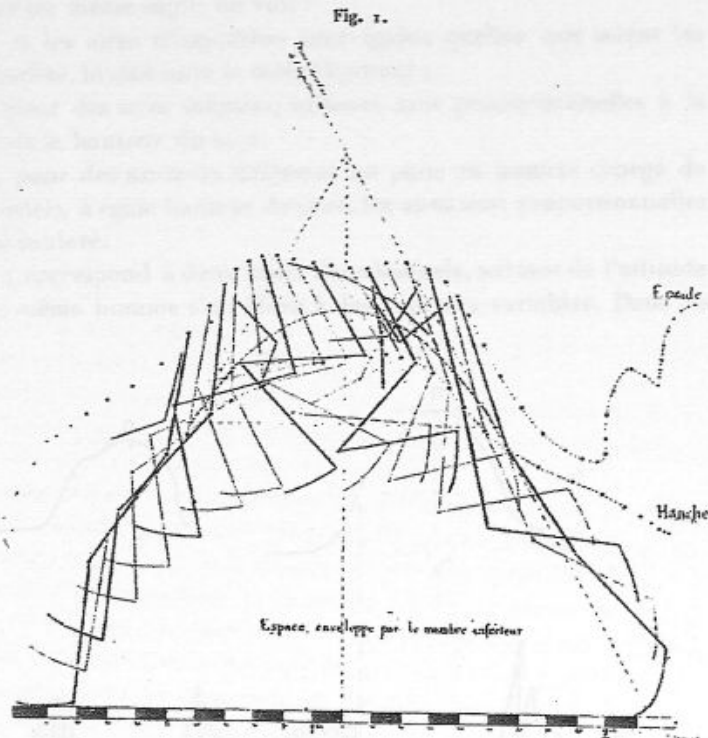
» L'intelligence de ce mécanisme suppose à la fois la notion cinématique et la notion dynamique du saut, c'est-à-dire la connaissance du mouvement et celle des forces en action.

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

(2)

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

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



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

bras et de l'épaule chez un homme qui exécute un saut en longueur de pied ferme, c'est-à-dire sans course préalable (on a retranché de cette figure les images qui précèdent et qui suivent le saut proprement dit). Des lignes ponctuées ont été tracées pour éclairer cette figure : l'une montre la direction de l'impulsion au moment où le corps quitte le sol ; l'autre, inclinée inversement, correspond à la direction dernière de la chute. La bissectrice de l'angle formé par ces deux lignes est verticale et représente l'axe de la parabole sur laquelle se mouvra le centre de gravité.

(1) Voir la Note du 25 juin 1883.

Mais, puisque le centre de gravité se déplace dans le changement d'attitude, il a fallu déterminer la position de ce centre de gravité pour un certain nombre des attitudes représentées par la chrono-plaque afin de construire la parabole décrite et même pour déterminer la courbe de construction dont on vient de parler.

A cet effet, M. Demeny, reprenant une méthode imaginée par lui-même, a mesuré la quantité dont le centre de gravité se déplace suivant les corps dans les différentes attitudes des bras et des jambes; cette détermination qu'on a pu vérifier que le centre de gravité décrit exactement une parabole. Mais un point du corps qui n'est pas le centre de gravité ne se déplace pas suivant cette ligne; on voit, en effet, que le point supérieure du corps s'abaisse si les jambes se relèvent; c'est la condition nécessaire du maintien du centre de gravité sur une courbe parabolique.

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

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

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

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

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

» Quand la pression verticale des pieds accusée par le dynamographe est supérieure au poids du corps, elle exprime à chaque instant, par sa valeur, la force impulsive qui imprime au corps une accélération verticale.

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

(4)

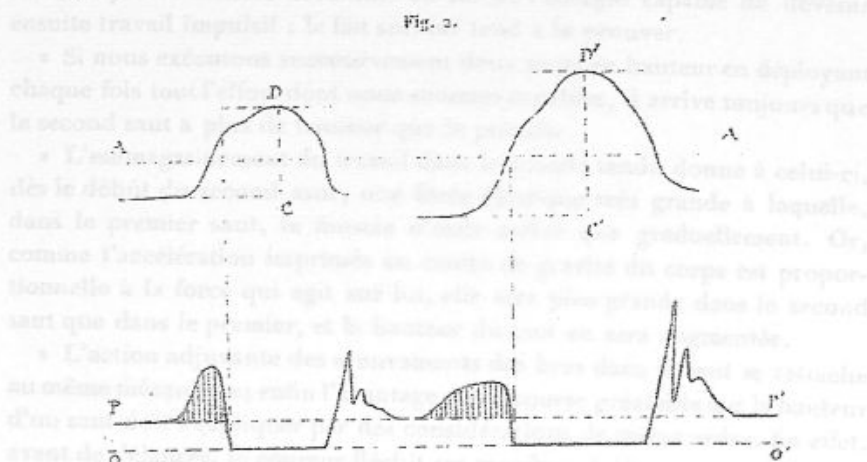
la courbe dynamographique mesurera la quantité de mouvement communiquée au corps par l'action musculaire. L'expérience a montré que cette courbe suffit, en général, pour donner la loi du mouvement dans un saut. En opérant sur un même sujet, on voit :

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

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

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

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



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

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

» Ces mêmes figures montrent encore que ce n'est pas l'intensité absolue

de l'effort qui influe sur la hauteur du saut, mais la *quantité de mouvement* c'est-à-dire le produit des efforts par leur durée, produit qui correspond à l'aire de la courbe. En effet, dans les figures ci-dessus, c'est au plus petit saut que correspondait l'effort le plus intense, mais aussi le plus bref; de sorte, pour des aires d'impulsion égales et correspondant à des sauts de même hauteur, il peut y avoir une infinité de formes diverses de la courbe dynamographique, un effort intense, mais bref, pouvant toujours équivaloir un effort plus faible, mais de plus longue durée.

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

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

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

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

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

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

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

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

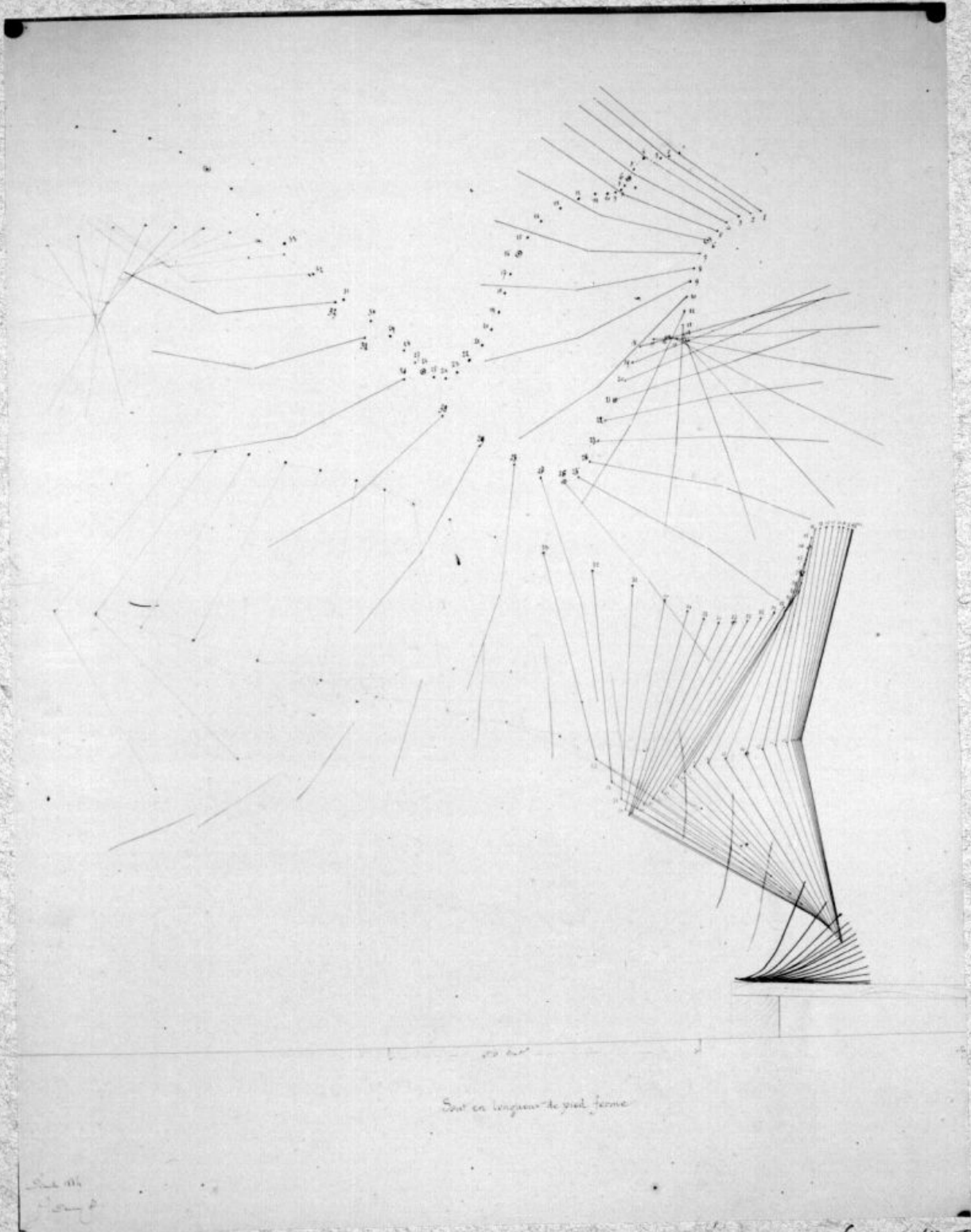
» Dans tous les actes de la locomotion, on observe ainsi une alternance entre le travail impulsif et le travail résistant ; or, dans ce dernier cas, il semble que le muscle accumule en lui de l'énergie capable de devenir ensuite travail impulsif : le fait suivant tend à le prouver.

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

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

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

Saut en longueur de pied ferme

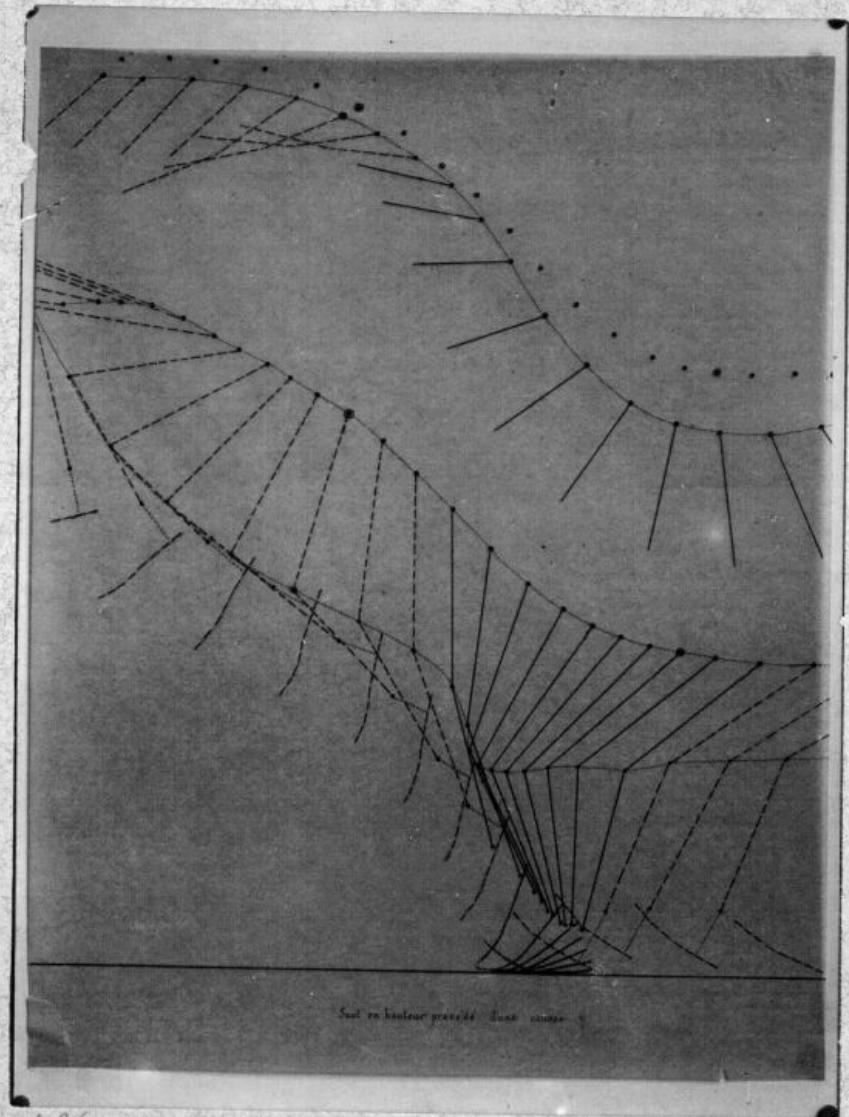


N: 172

Sujet M. Demeny

Préparation impulsion et suspension dans un saut en longueur de pied ferme.

Analyse cinématique par la chronophotographie

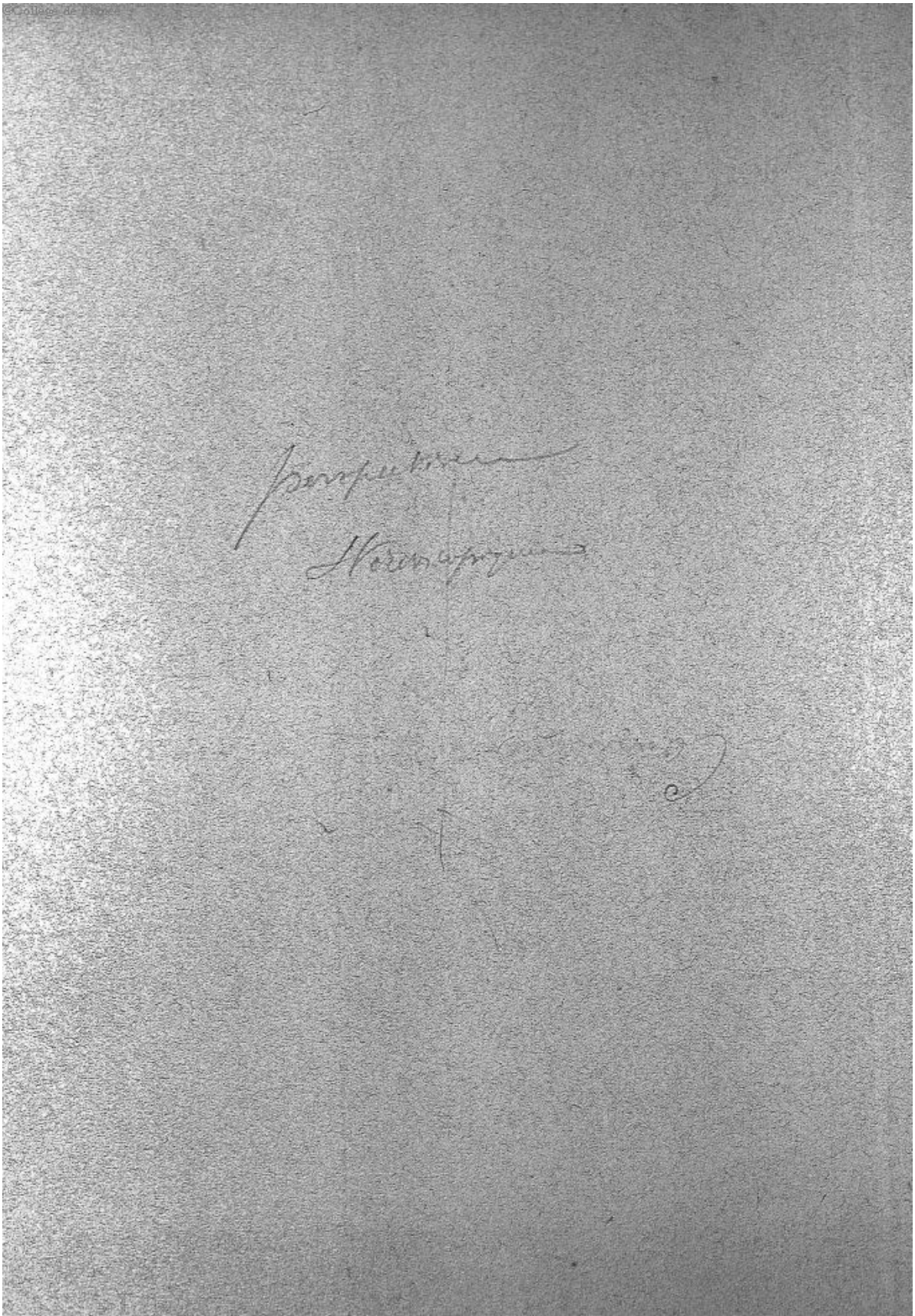


N°26

Suzor M Pradelle

Saut en hauteur précédé d'une course
les images correspondant à l'appui du pied sont en trait plein

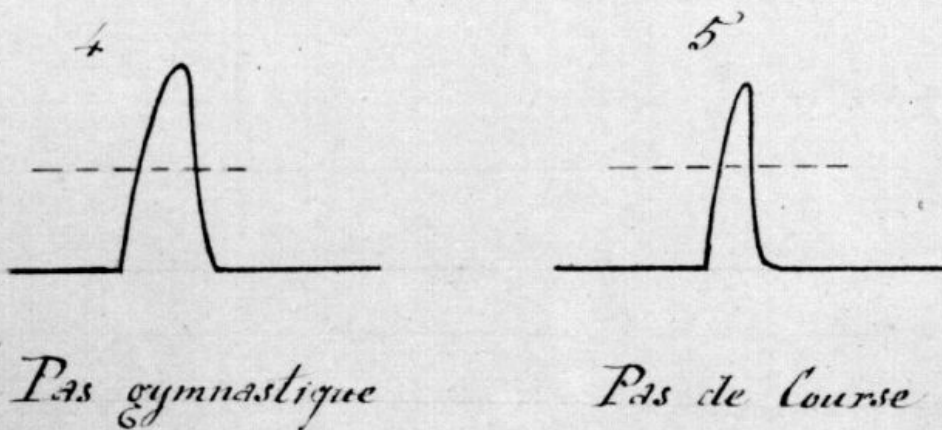
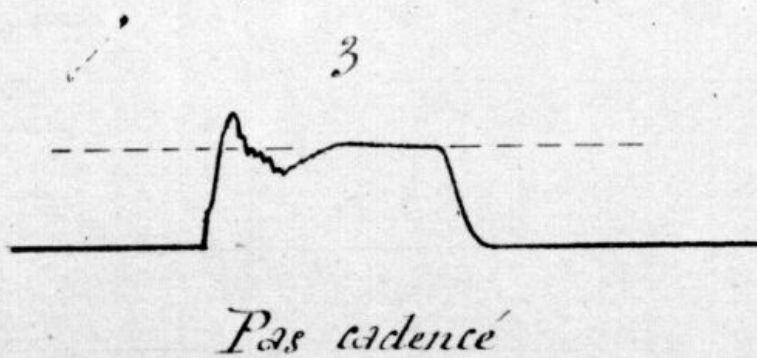
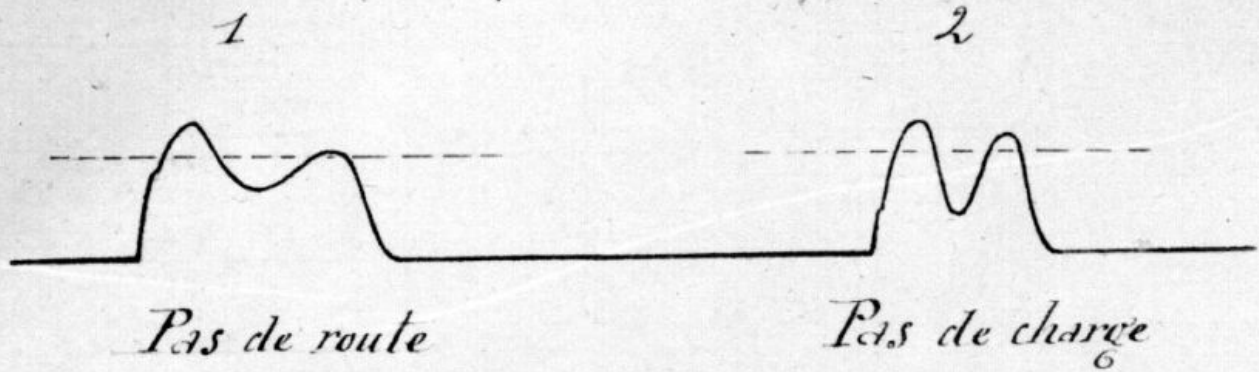




Étude dynamique
de la

Locomotion humaine
(Documents dynamographiques)

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



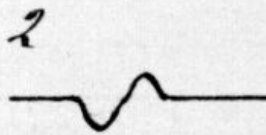
Le pas cadencé (3) se fait remarquer par le choc du pied au début puis par le maintien de la pression du pied à la ligne de poids.
Le pas gymnastique (4) présente une valeur de la pression plus grande que le pas de course. Cela s'explique par la grande valeur des oscillations verticales que l'on y remarque.

N° 267

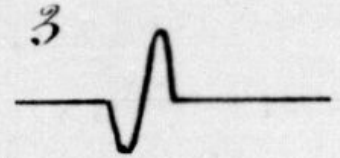
Formes différentes de la courbe de la composante
 Tangentielle des pieds sur le sol
 dans différentes allures



Marche



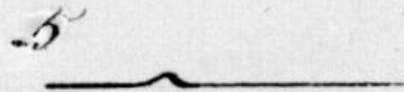
Course



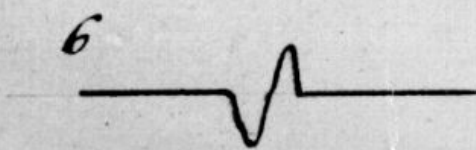
Course vive



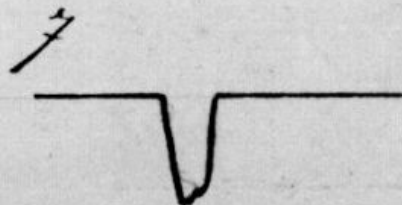
Saut sur place en longueur



Saut en hauteur

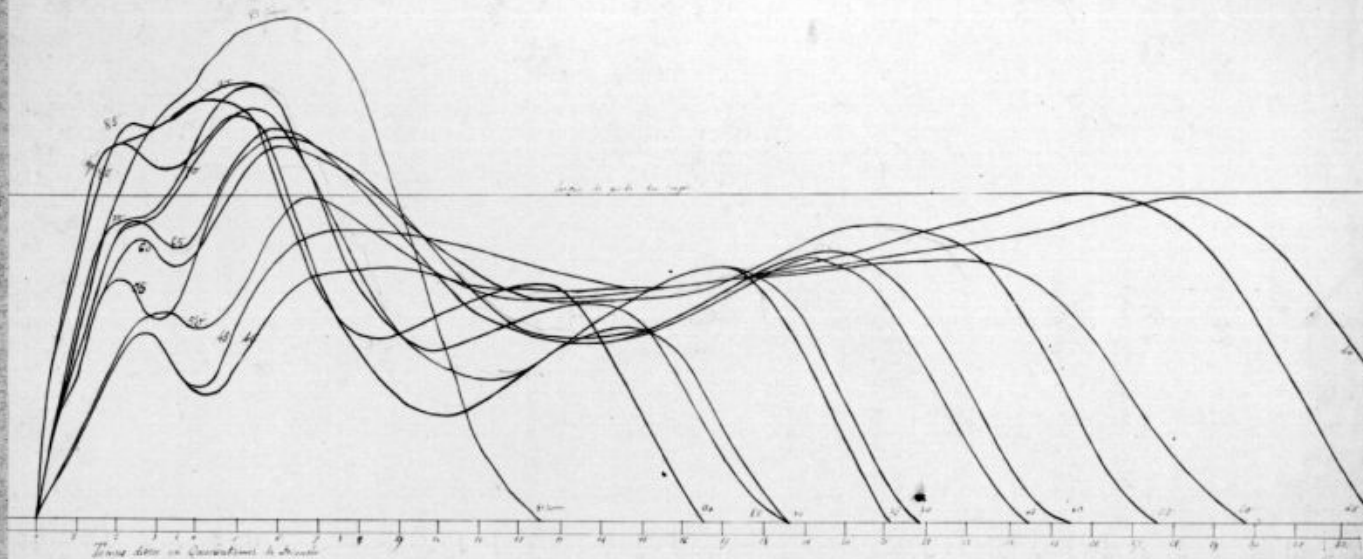


Saut en longueur
 précédé d'une course



Saut en hauteur
 précédé d'une course

Instrument de Marey

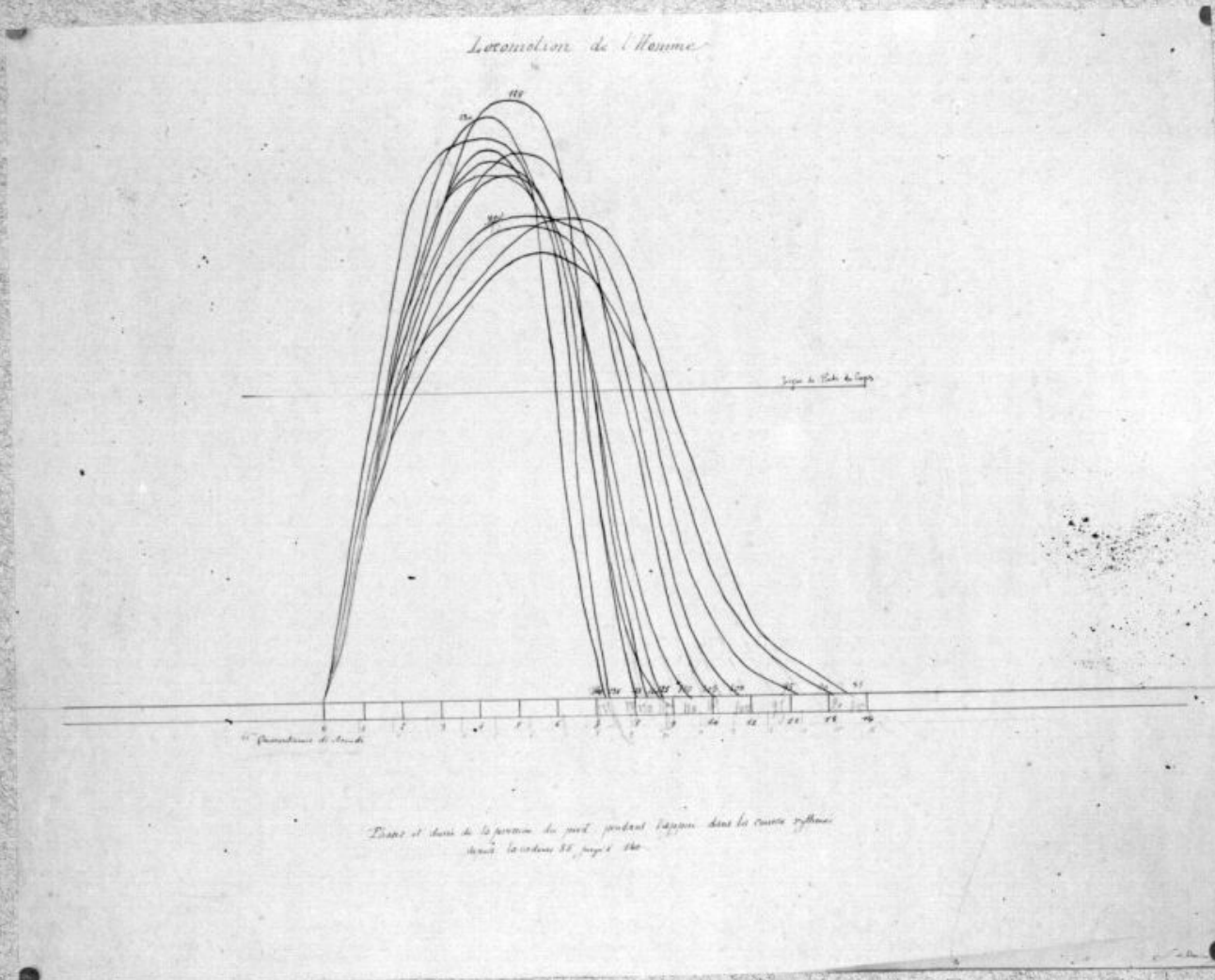


*Variations de la pression normale du pied
dans des marches croissant de 5 en 5 fois à la minute*

*1. Marche normale à 5 fois à la minute
2. Marche normale à 10 fois à la minute
3. Marche normale à 15 fois à la minute
4. Marche normale à 20 fois à la minute
5. Marche normale à 25 fois à la minute
6. Marche normale à 30 fois à la minute
7. Marche normale à 35 fois à la minute
8. Marche normale à 40 fois à la minute
9. Marche normale à 45 fois à la minute
10. Marche normale à 50 fois à la minute
11. Marche normale à 55 fois à la minute
12. Marche normale à 60 fois à la minute*

N°186

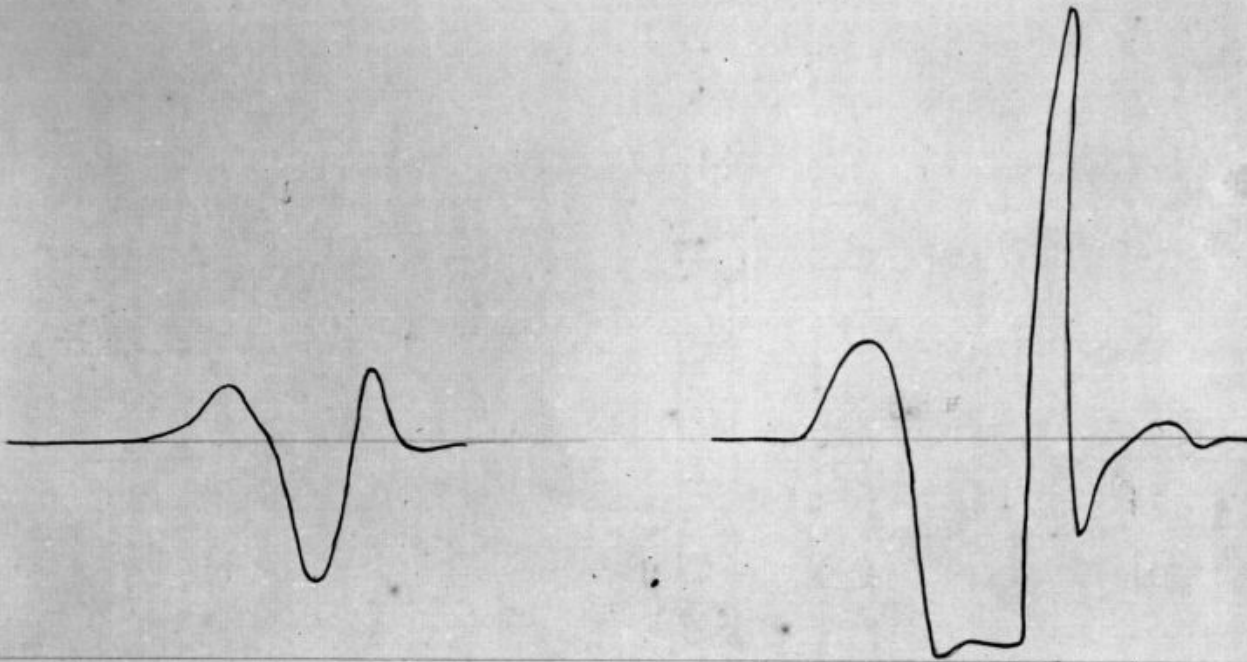
*Courbe de la pression normale du pied
dans des marches à des cadences croissant de 5 en 5 fois à la minute*



N° 187

*Graphique de la pression normale du pied sur le sol.
dans des courses dont les rythmes vont en s'accélérant
de 5 en 5 fois à la minute.*

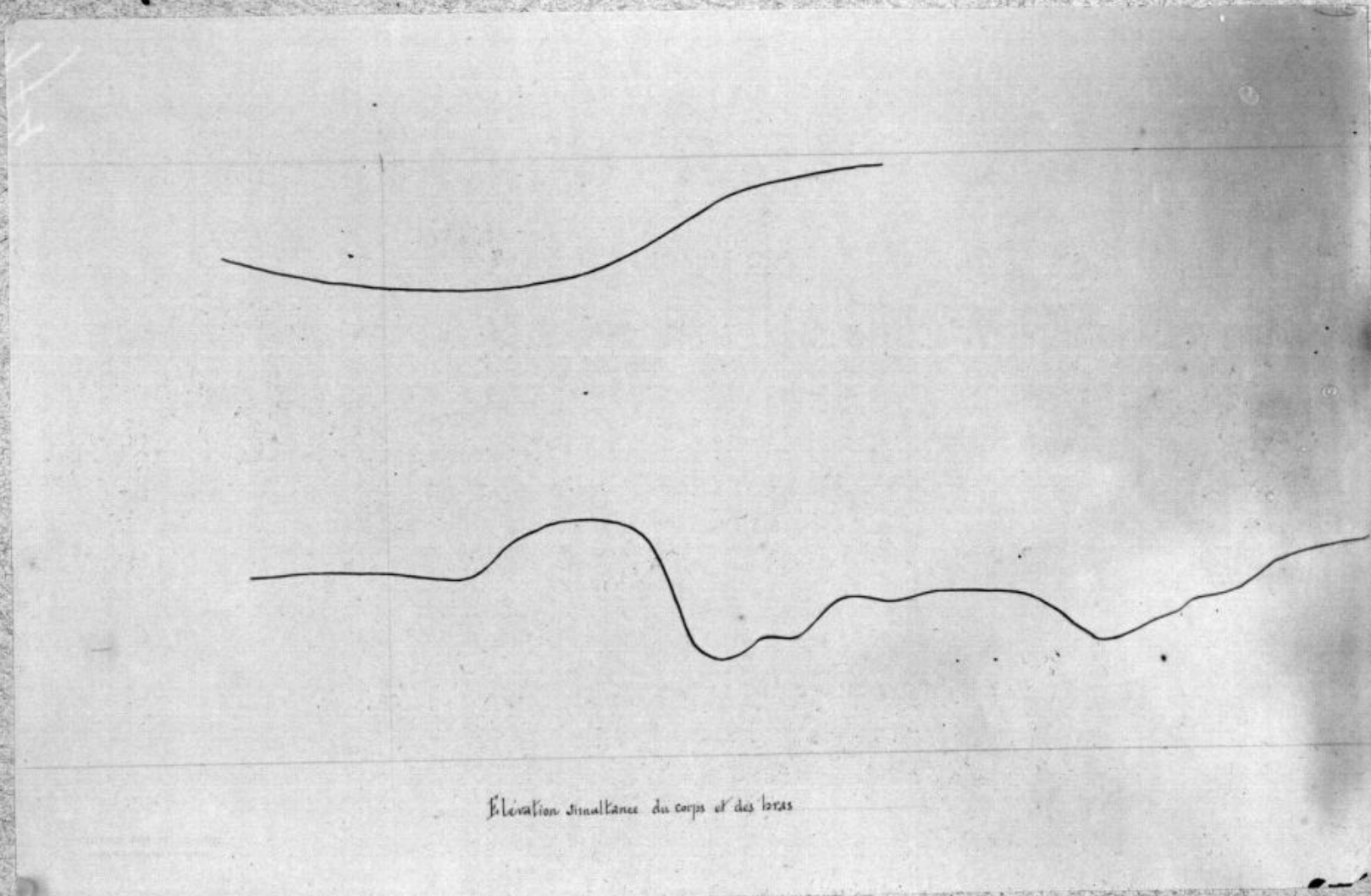
170



Elevation des bras avec arrêt brusque à l'horizontale
Le second mouvement est plus vif que le premier

N° 170

Elevation des bras avec arrêt brusque à l'horizontale



Elevation simultanée du corps et des bras

N°174

Elevation simultanée du corps et des bras

Ligne de poids du corps



Niveau de la tête en station droite.



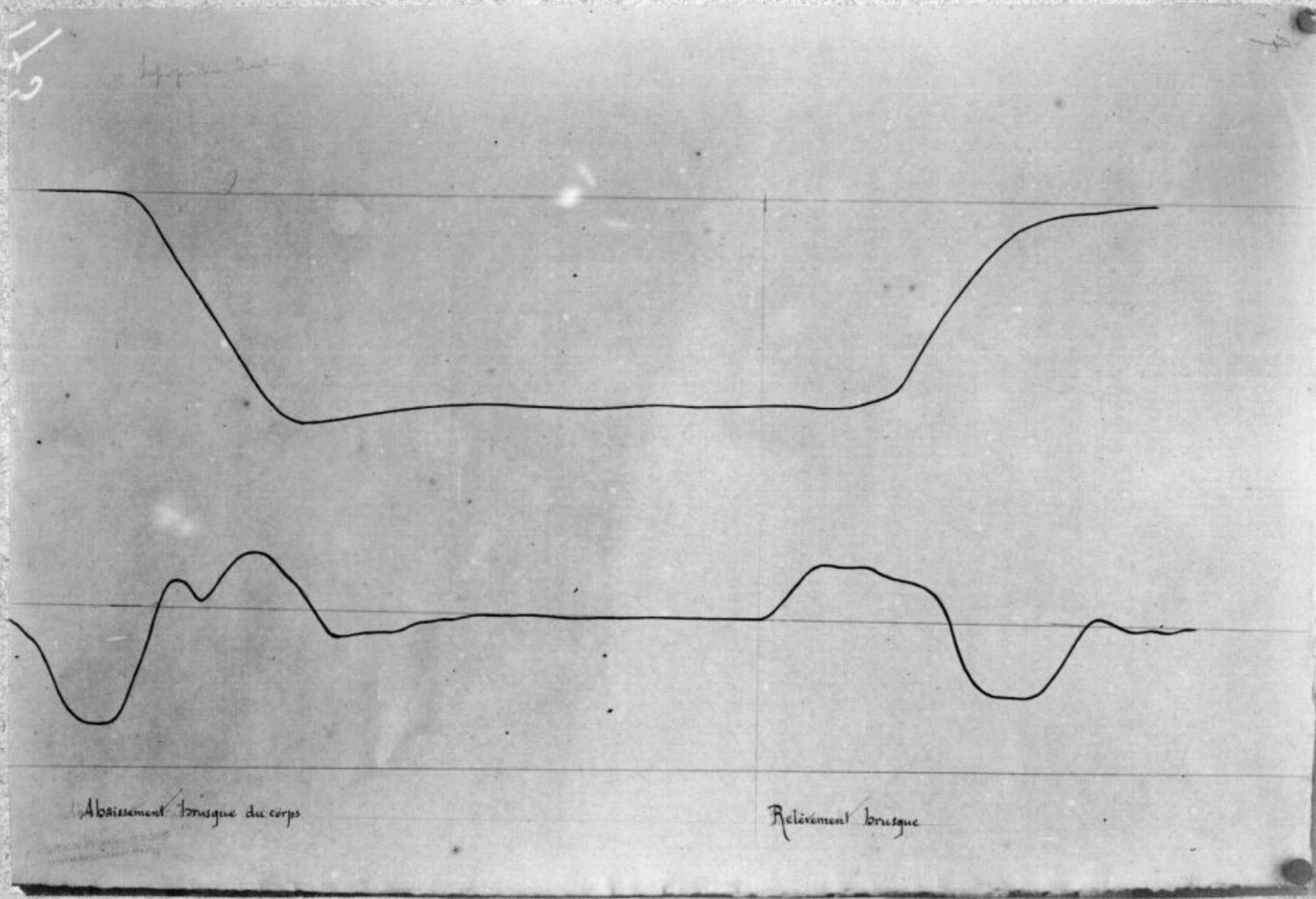
Ligne de poids.



Abaissement brusque des bras avec arrêt à l'horizontale.

N° 169

Abaissement brusque des bras avec arrêt
à l'horizontale

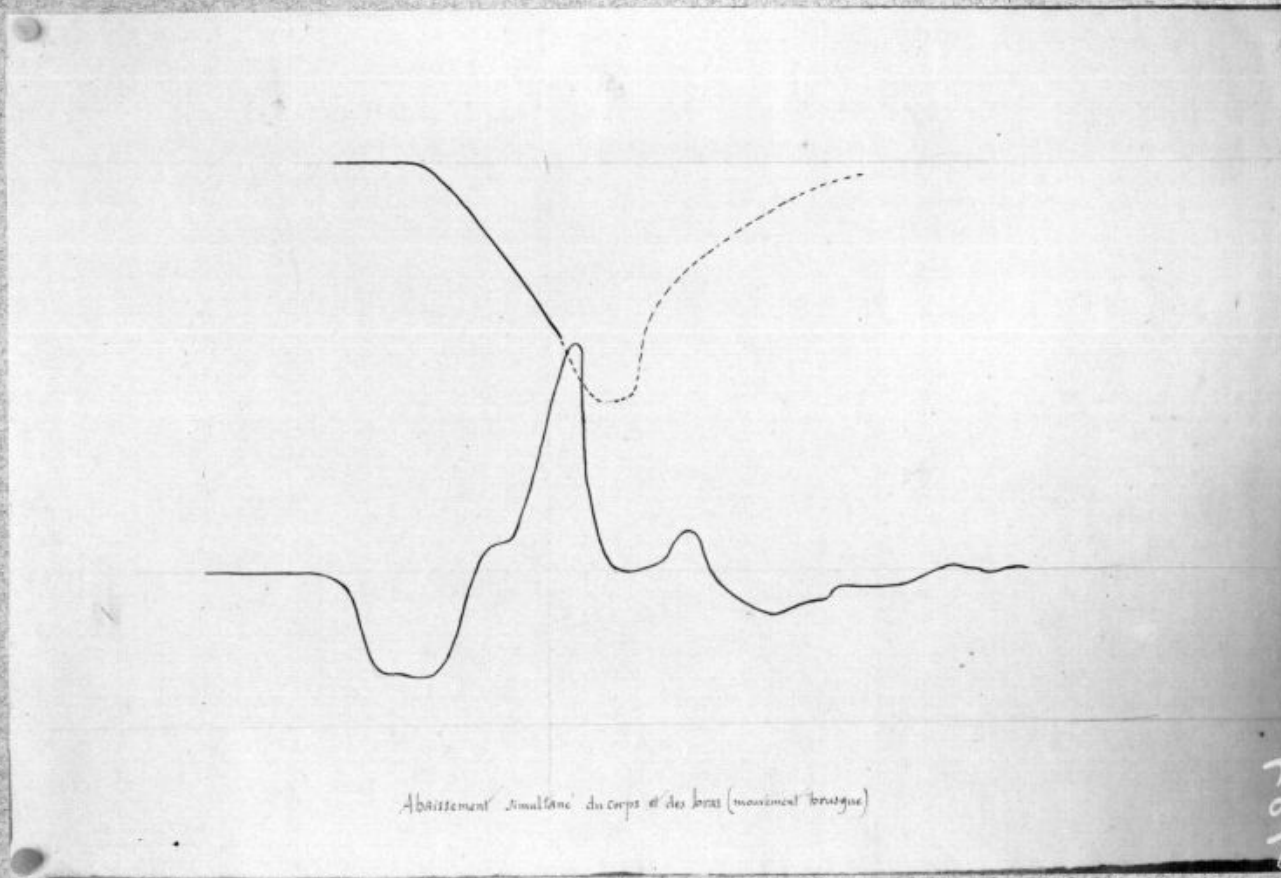


Abaissement brusque du corps

Relèvement brusque

N° 178

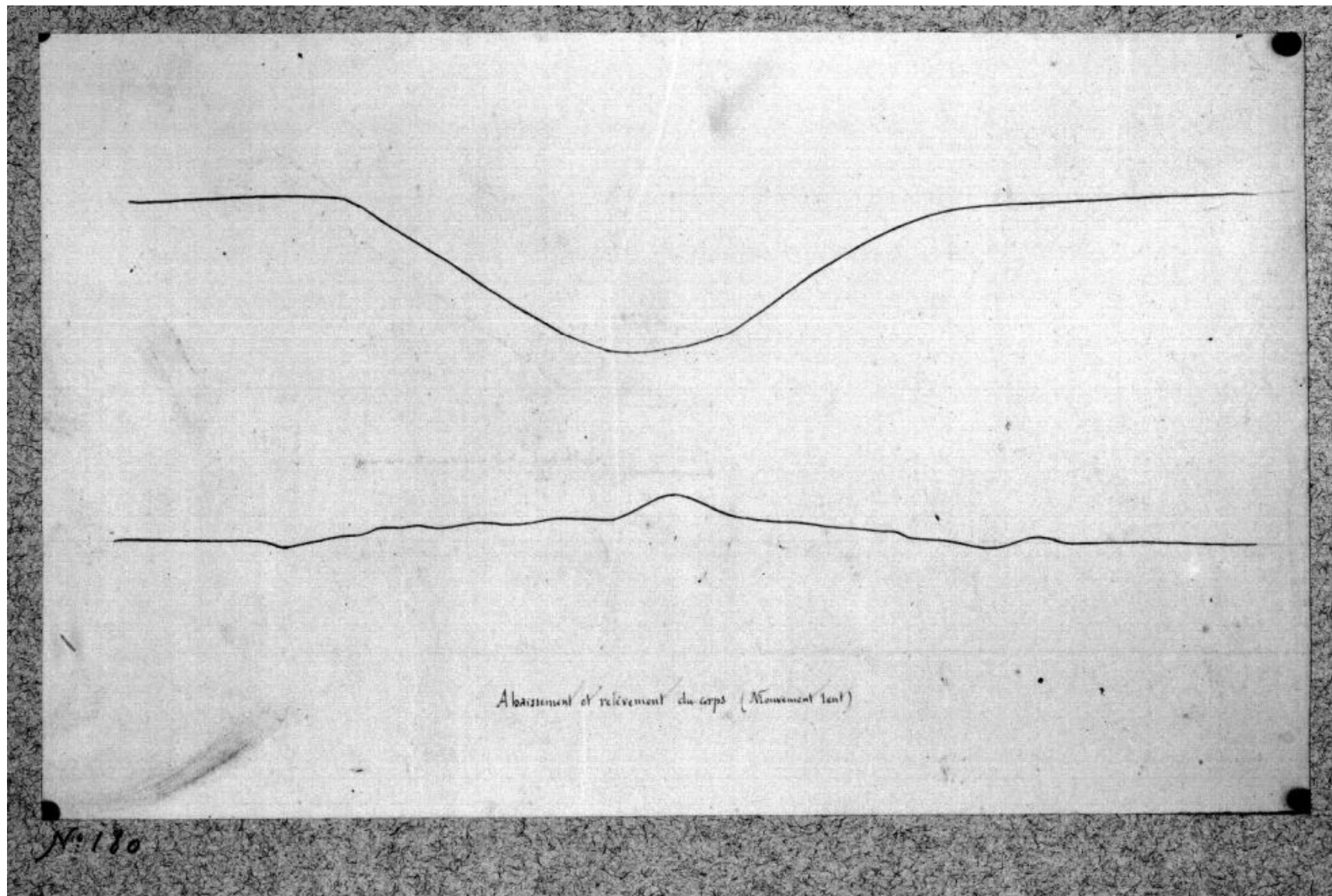
Abaissement et relèvement brusque du corps.

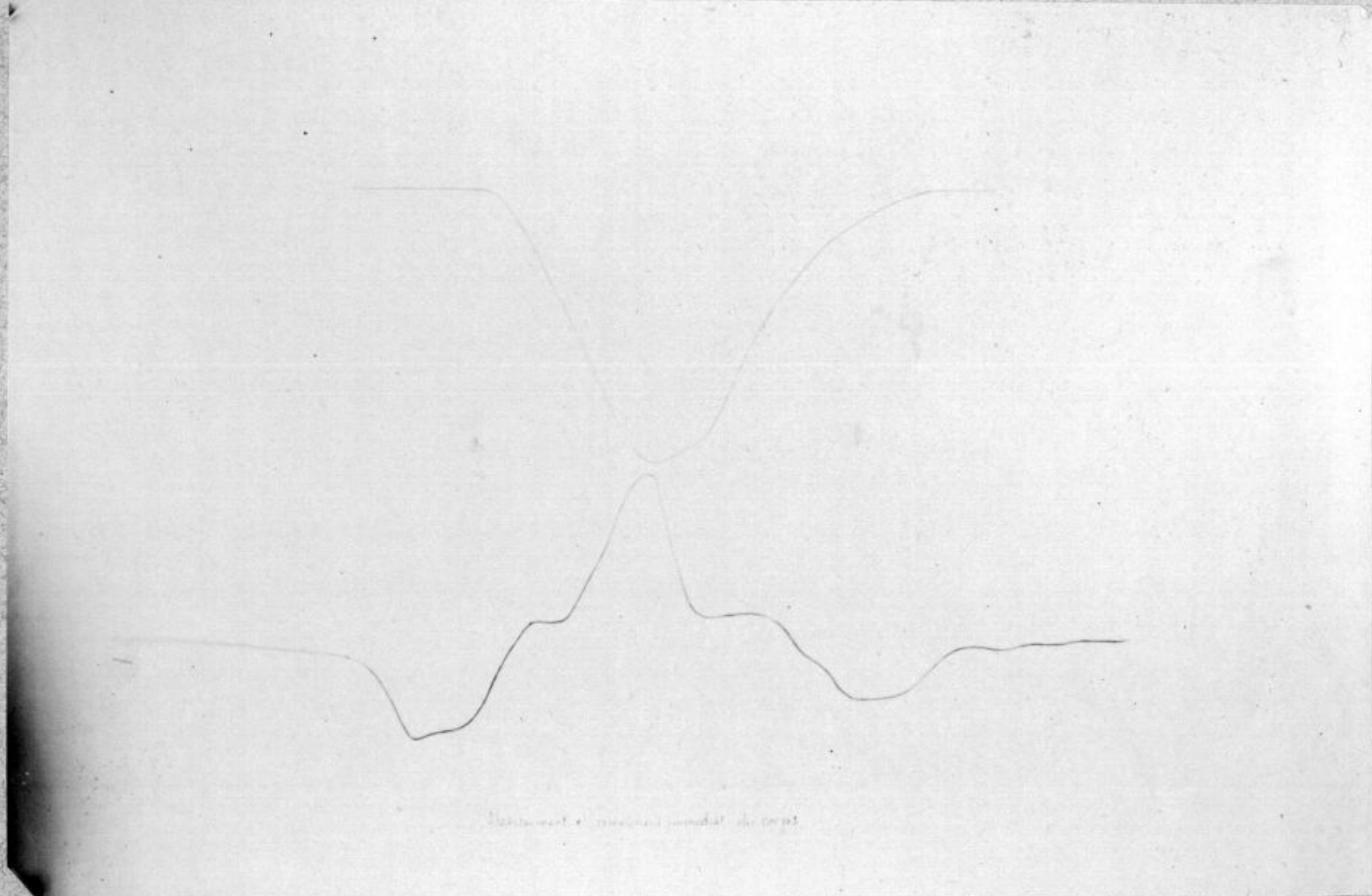


Abaissement simultané du corps et des bras (mouvement brusque)

N° 184

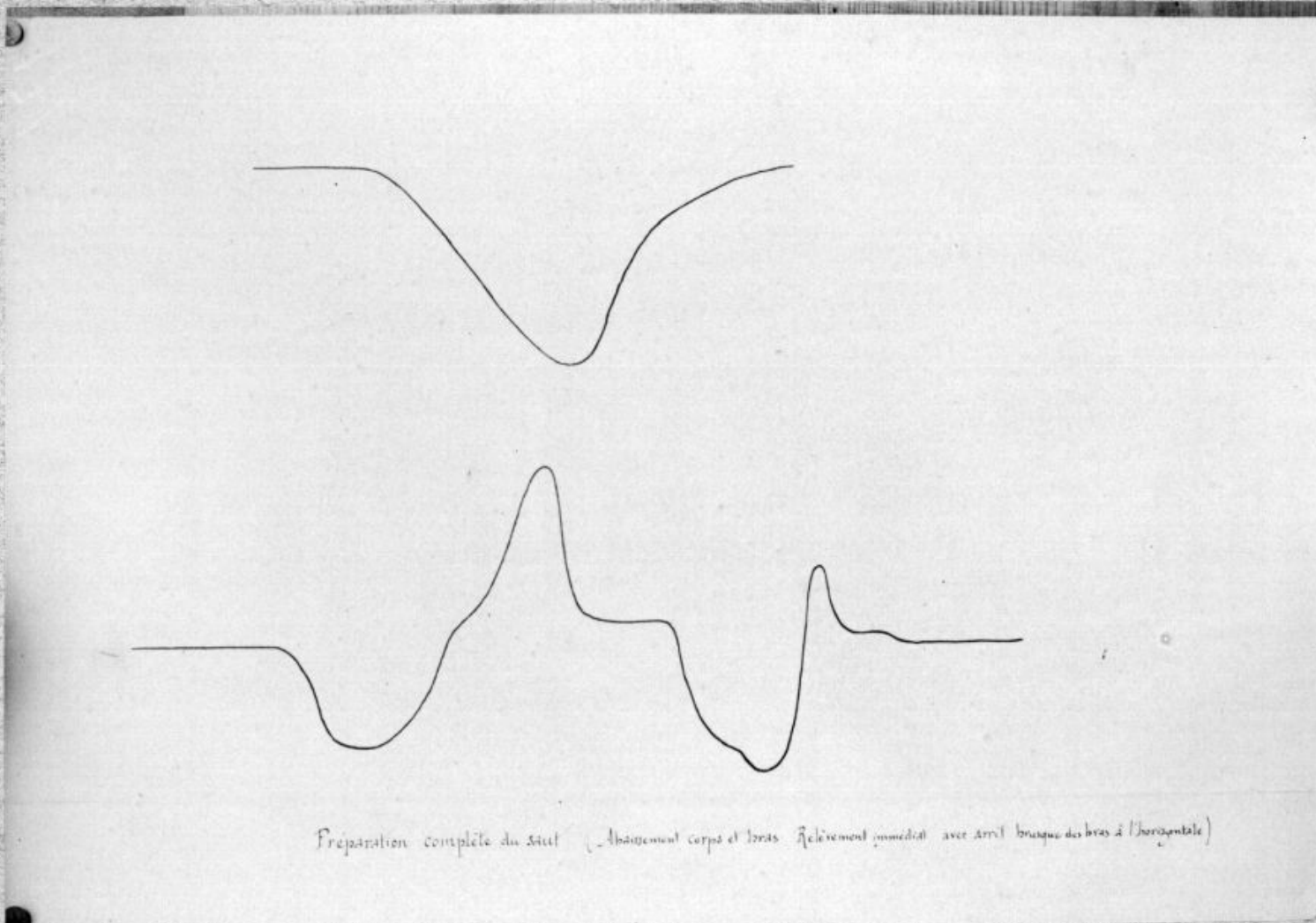
Abaissement simultané du corps et des bras (mouvement brusque).





N° 178

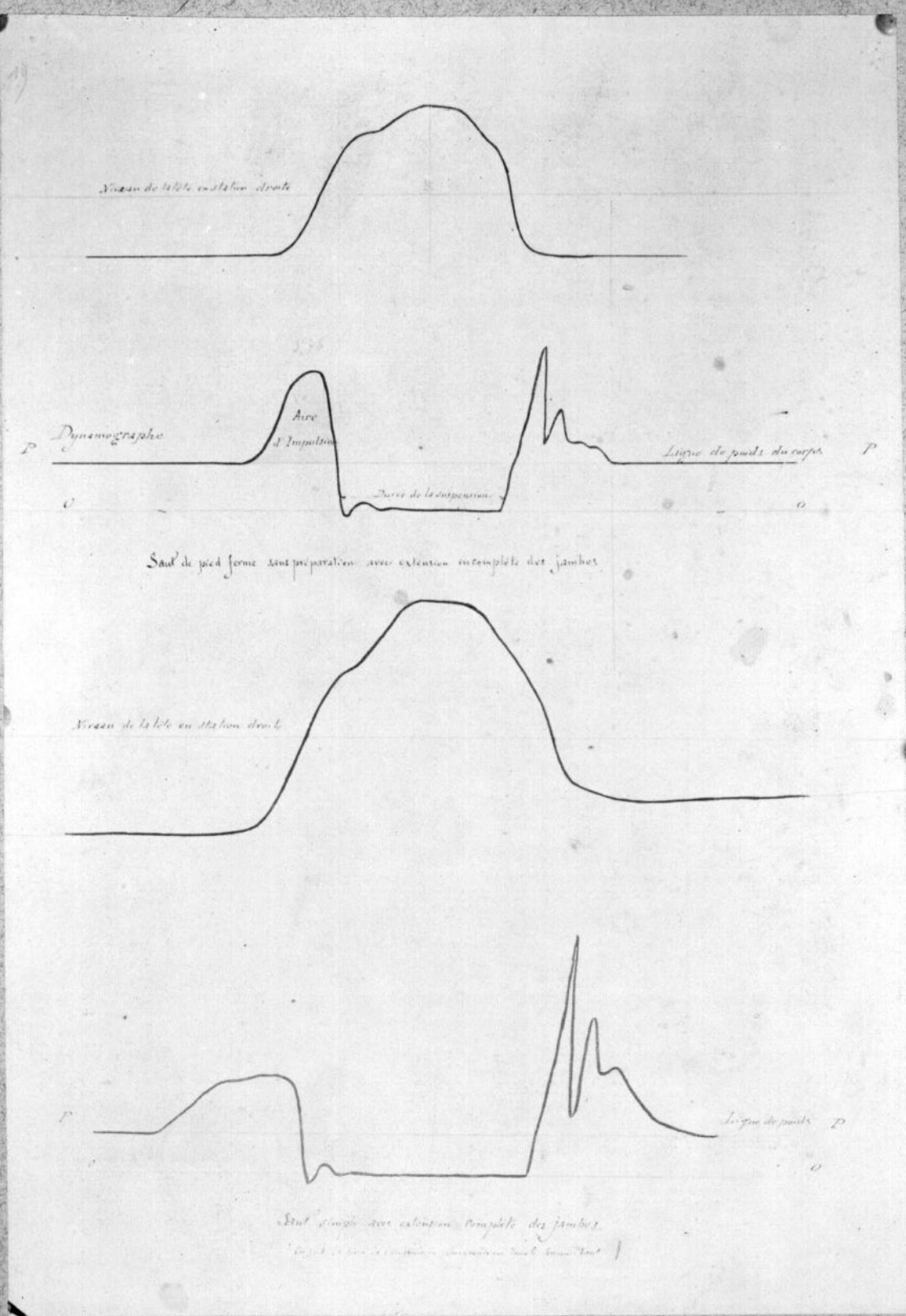
*Abaissement et relèvement immédiat du
corps*



Préparation complète du saut (Abaissement corps et bras Relèvement immédiat avec arrêt brusque des bras à l'horizontale)

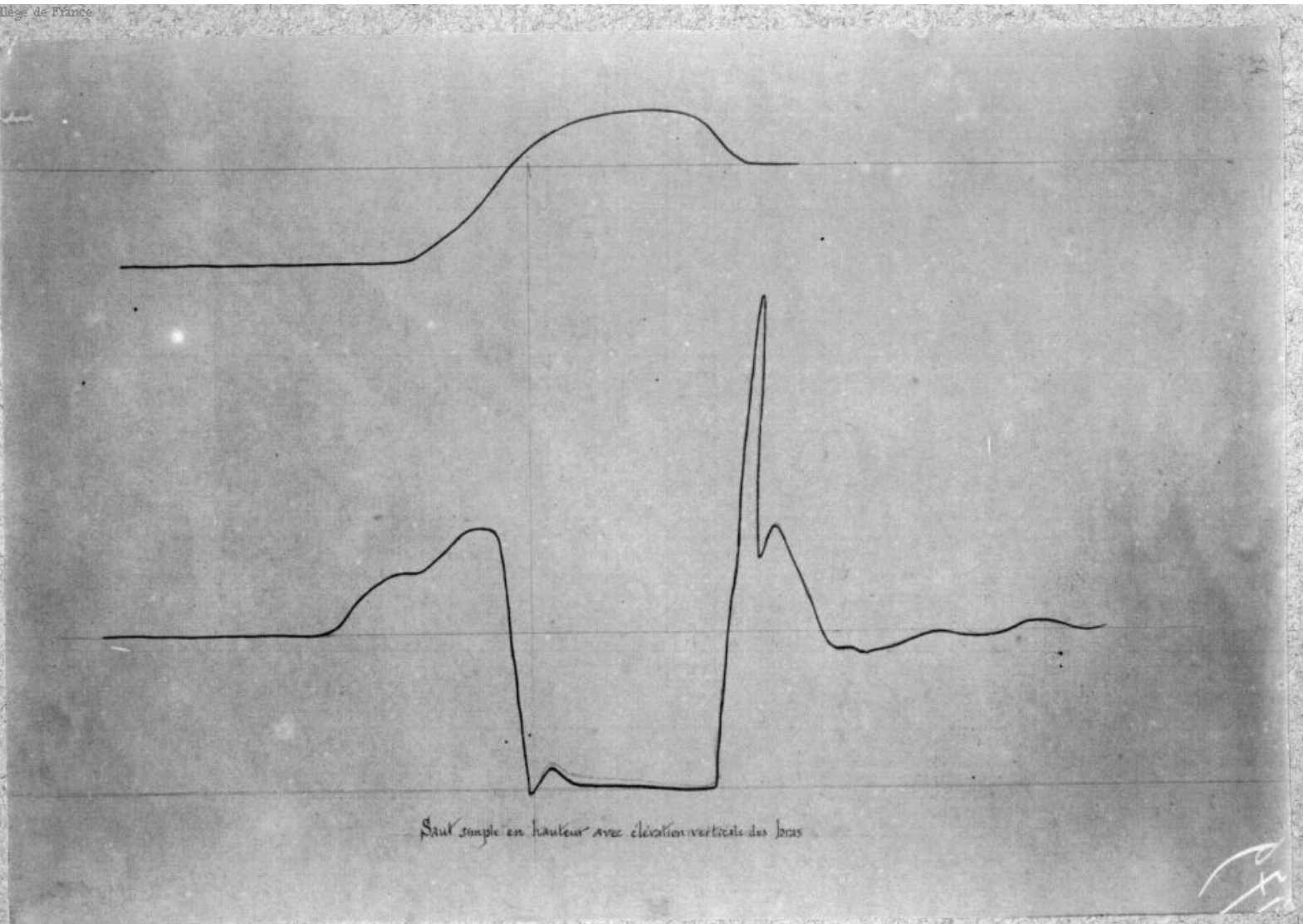
N° 171

*Préparation complète du saut (Abaissement corps et bras relèvement
immédiat avec arrêt brusque des bras à l'horizontale.)*

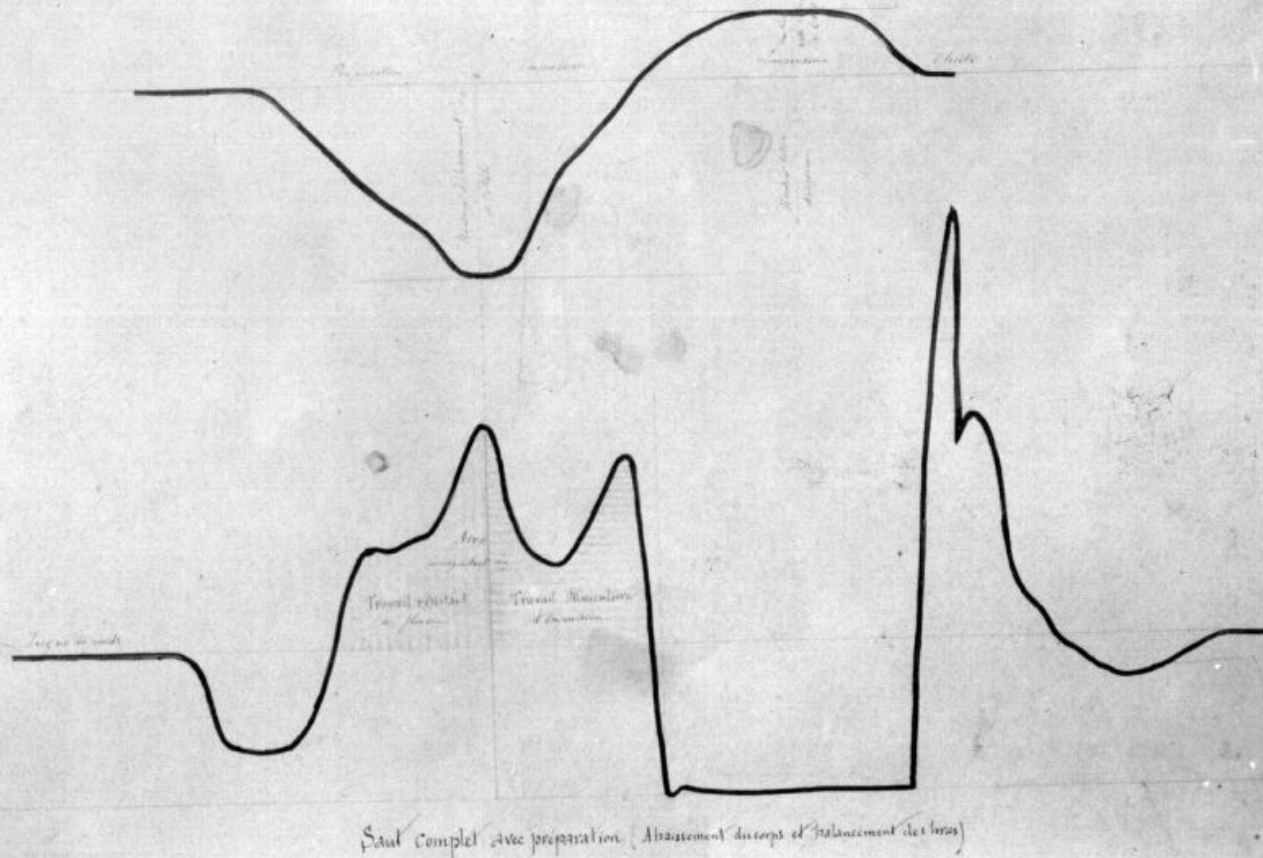


N° 35

Deux sauts simples en partant de l'accroupissement montrant deux formes différentes de l'aire d'impulsion et que les hauteurs des sauts ne dépendent pas seulement de la valeur de l'intensité de l'impulsion, mais bien de la durée de cette impulsion



*Saut simple en hauteur avec élévation
verticale des bras*

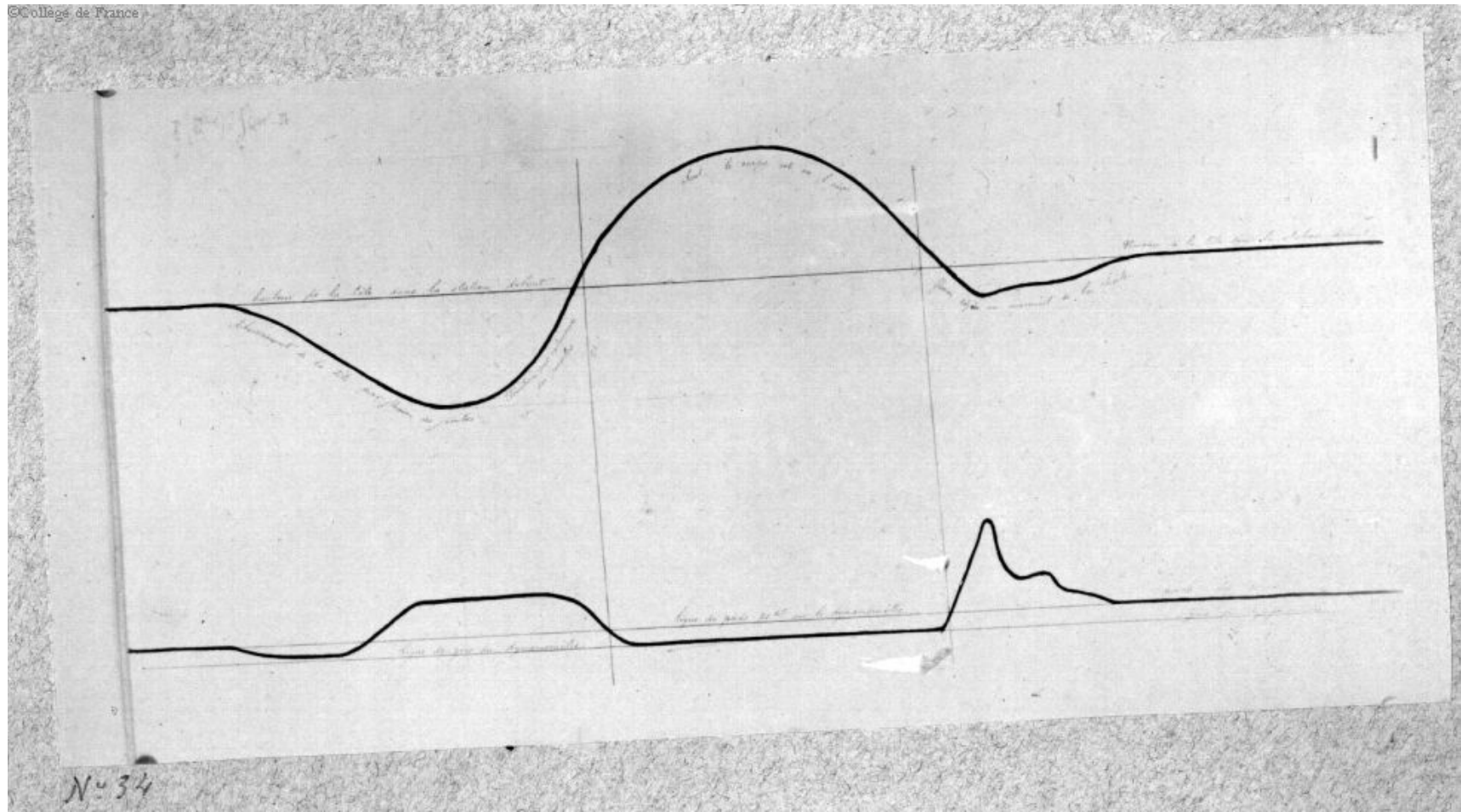


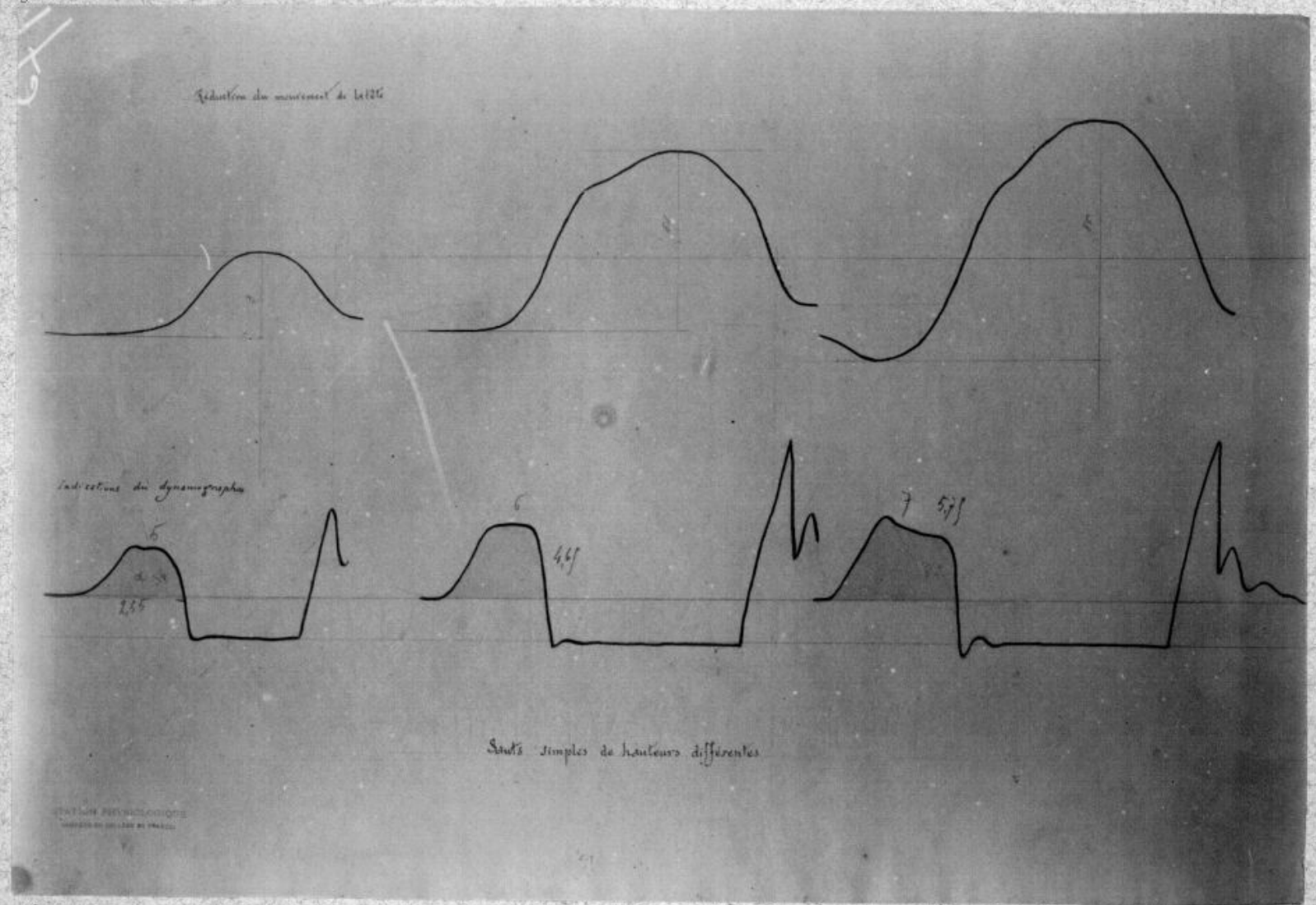
Saut Complet avec préparation (Abaissement du corps et balancement des bras)

N° 33

Analyse d'un saut vertical avec préparation c'est à dire
 Balancement des bras et flexion des extrémités inférieures.

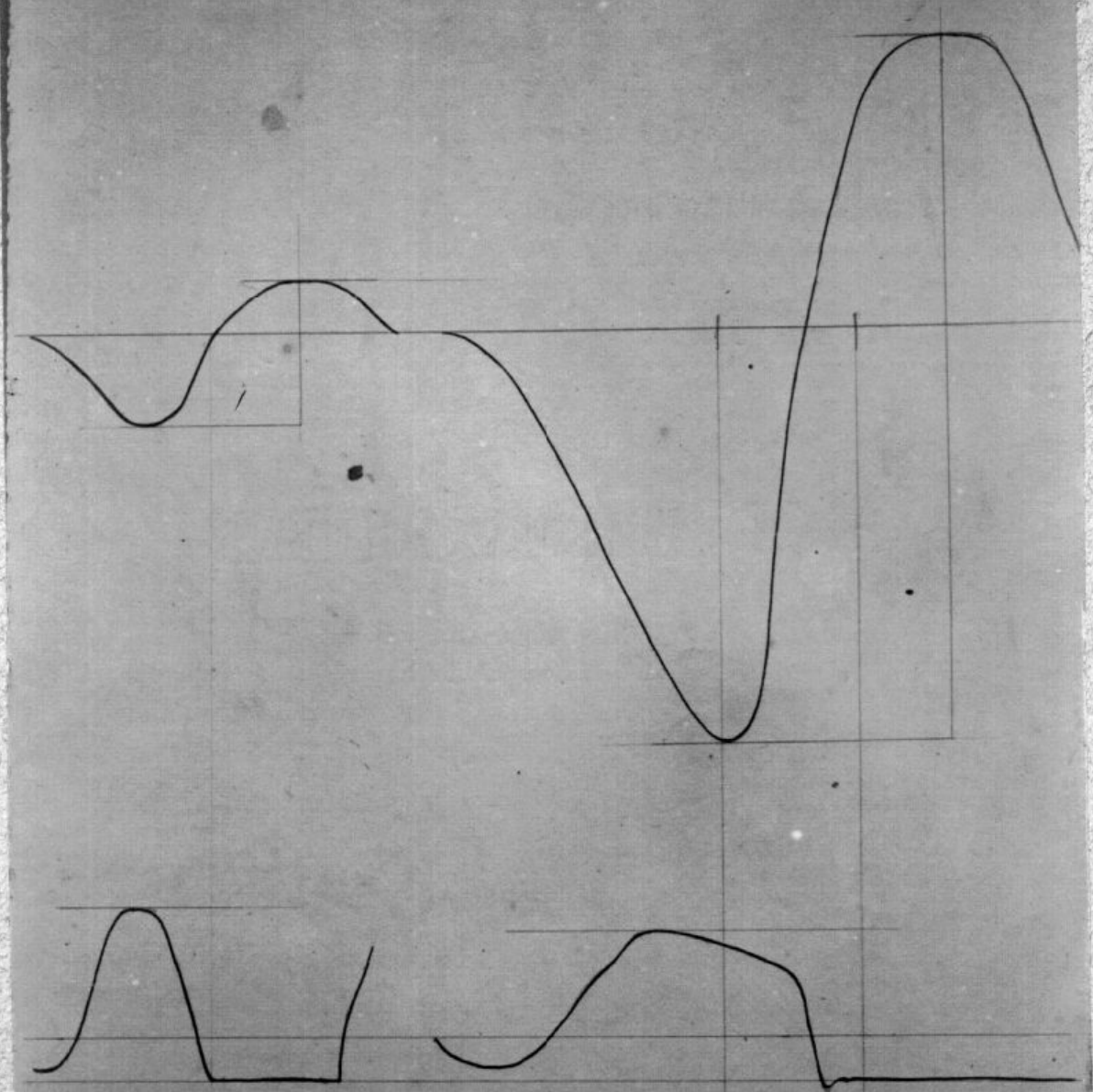
- 1 - Réduction de mouvement de la tête
- 2 - Tracé de la pression normale des pieds sur le sol





N° 175

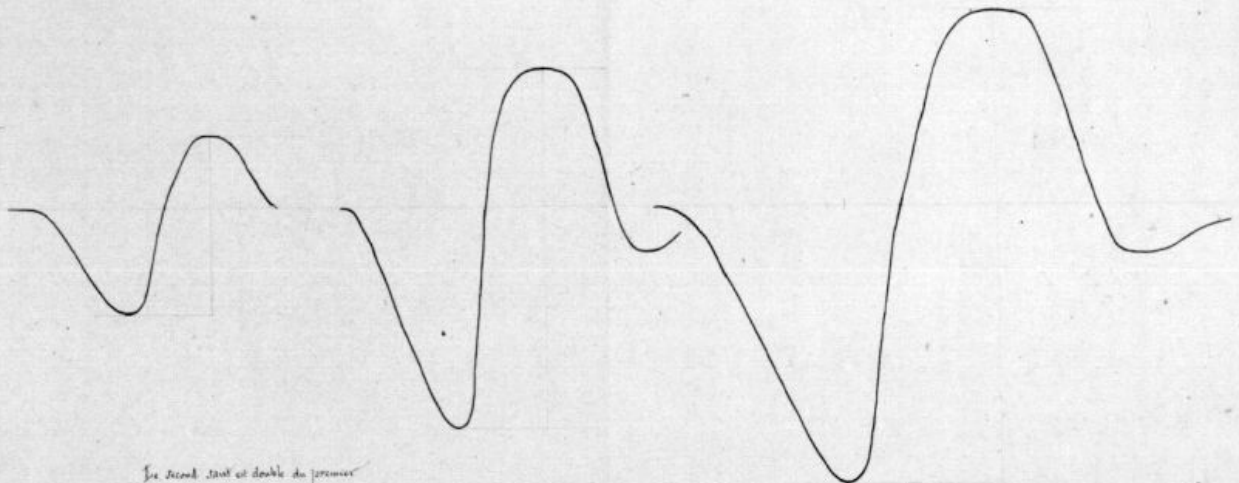
Sauts simples de hauteur différentes.



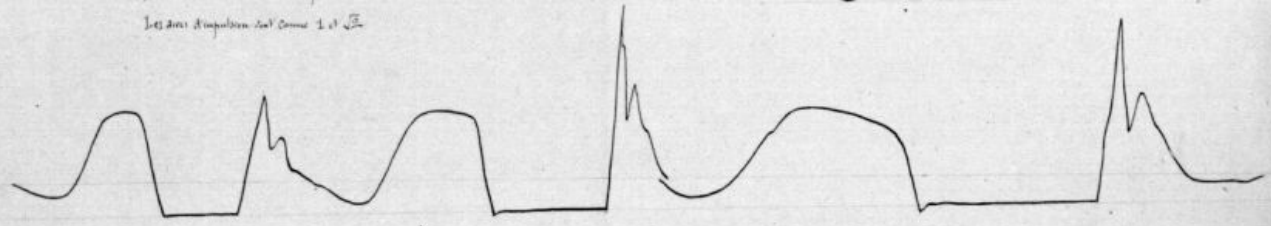
Deux Sauts de hauteurs différentes
La pression du pied atteint dans le plus petit saut un maximum plus élevé que dans le plus grand
mais la durée de la pression est beaucoup plus grande dans le second

N° 177

Deux sauts de hauteur différentes .



Le second saut est double du premier
 Les axes d'impulsion sont comme 1 et $\sqrt{2}$

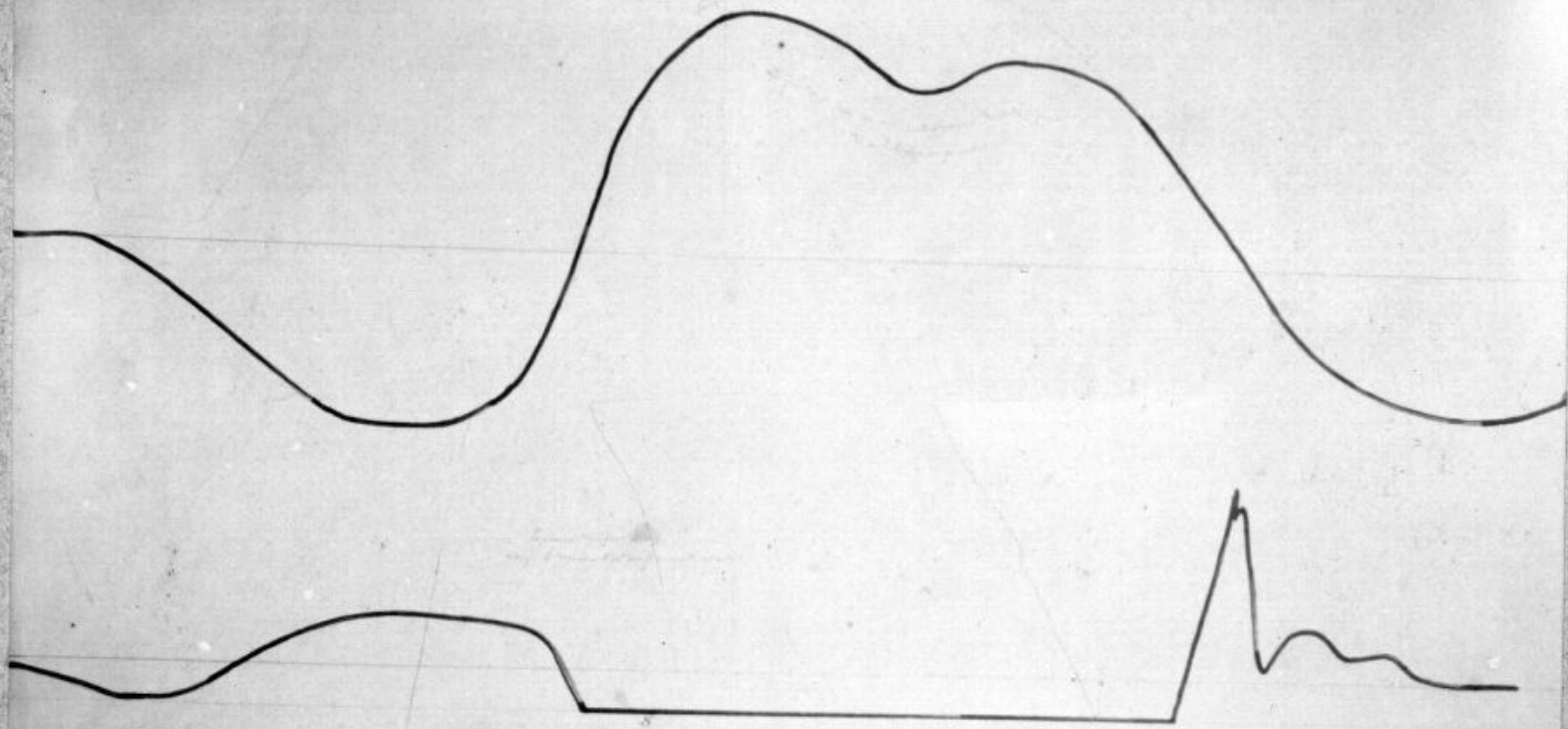


Sauts de pied ferme de hauteurs différentes

Les axes d'impulsion sont proportionnelles aux racines carrées des hauteurs d'élévation du centre de gravité.
 Plus les sauts sont élevés plus les abaissements possibles sont considérables.
 La hauteur du saut dépend de la valeur de l'axe d'impulsion quelle que soit sa forme.

N° 181

*Sauts du pied ferme de hauteur
 différentes.*

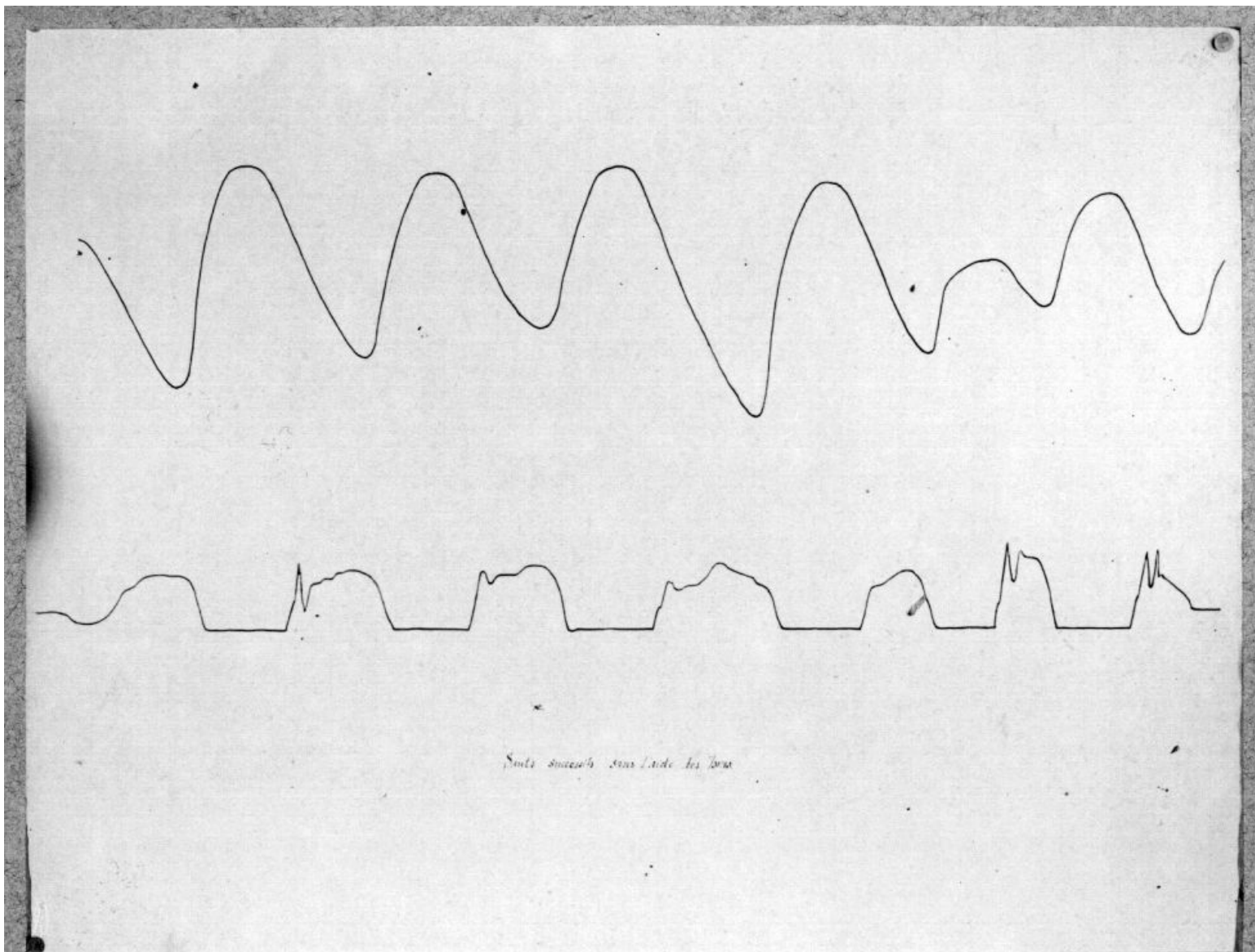


Mouvement du corps et du déplacement vertical du centre de gravité par la flexion des jambes pendant la suspension sur saut.

N° 36

Saut vertical sur place.

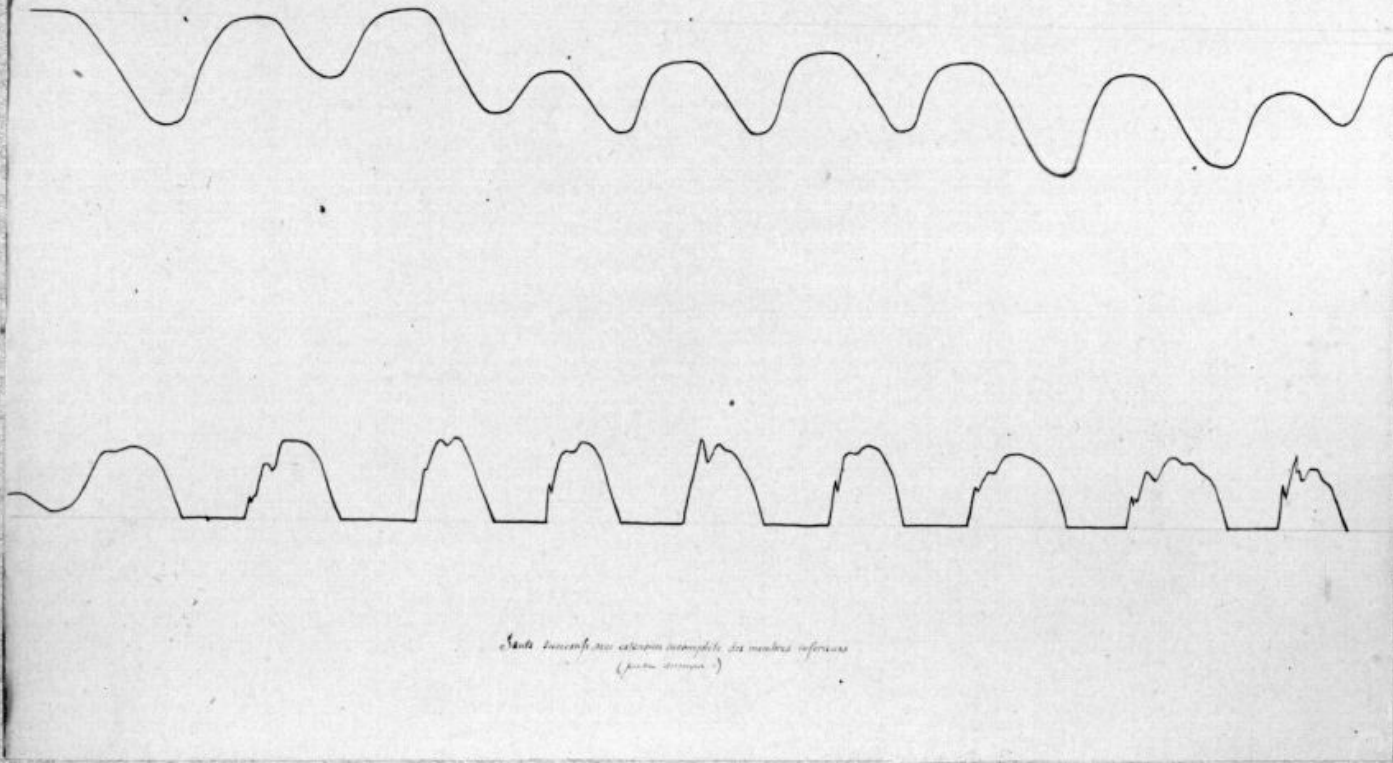
Dans le tracé du mouvement de la tête on voit une inflexion qui est produite par la flexion brusque des extrémités inférieures pendant la suspension.



Saut successifs sans l'aide des bras

N° 182

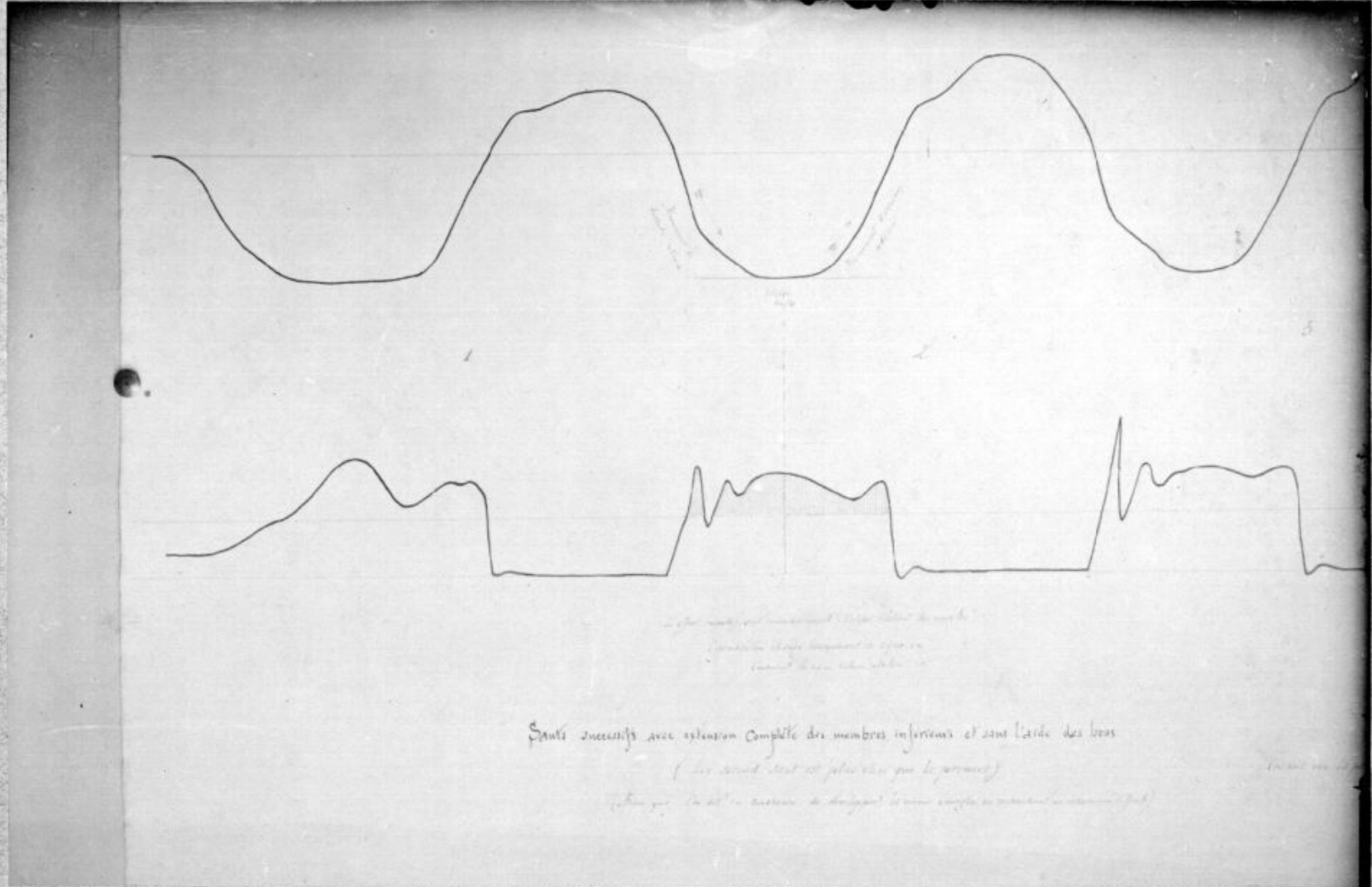
Saut successifs sans l'aide des bras.



Sauts successifs avec extension incomplète des membres inférieurs
(suite de la page 184)

N° 185

Sauts successifs avec extension incomplète des membres inférieurs

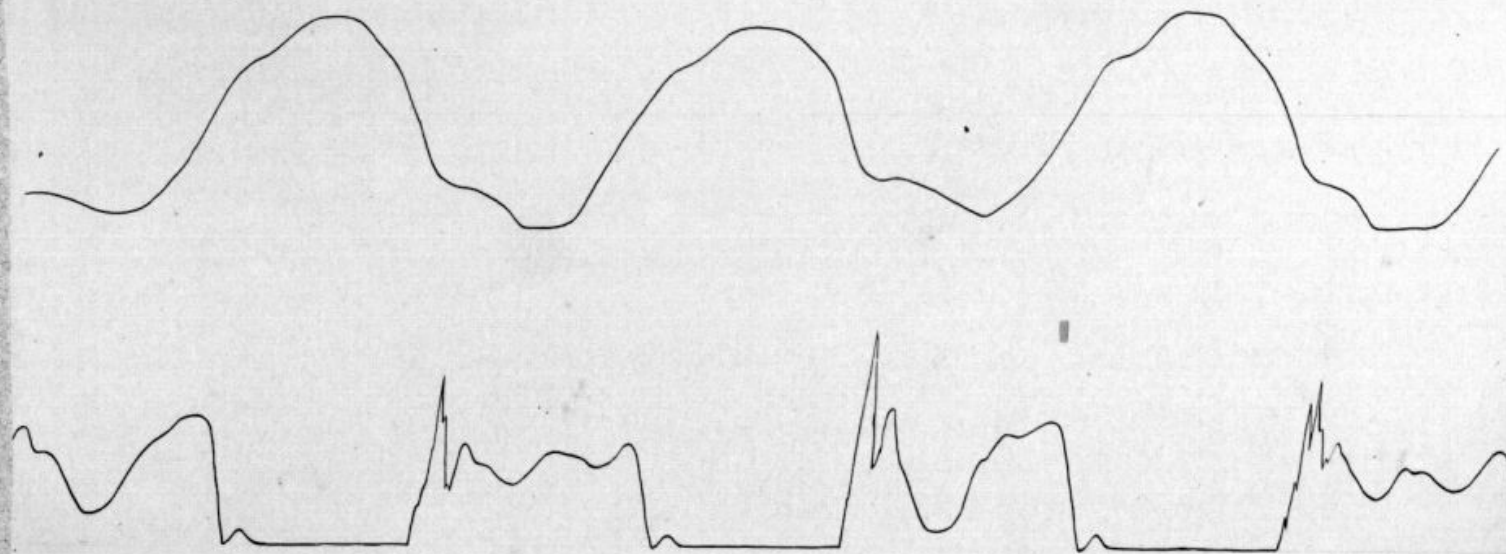


Sauts successifs avec extension complète des membres inférieurs et sans l'aide des bras

(les sauts sont en fait plus ou moins par sauts)

(les sauts sont en fait plus ou moins par sauts)

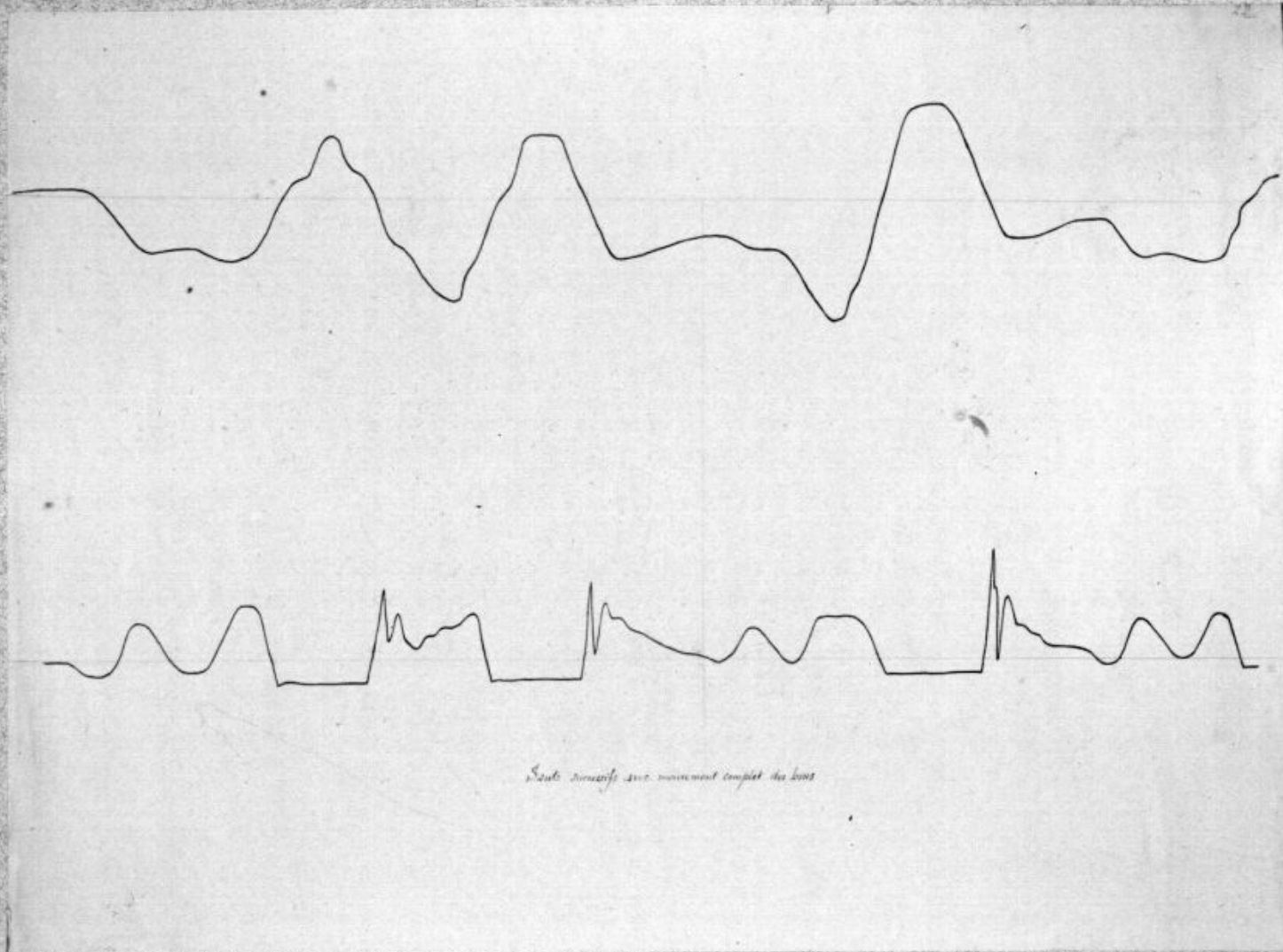
N° 52



Sauts successifs avec l'aide des bras.

N° 176

Sauts successifs avec l'aide des bras.

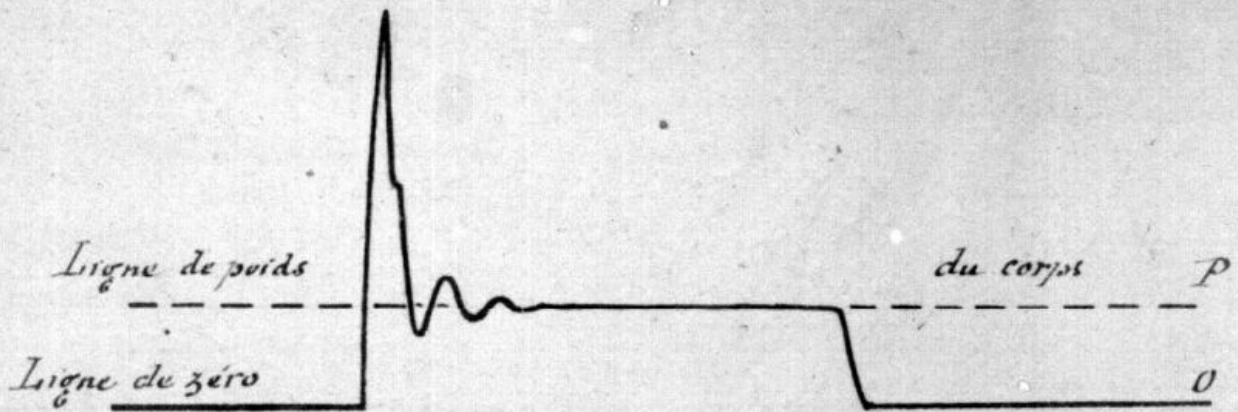


Sauts successifs avec mouvement complet des bras

N° 183

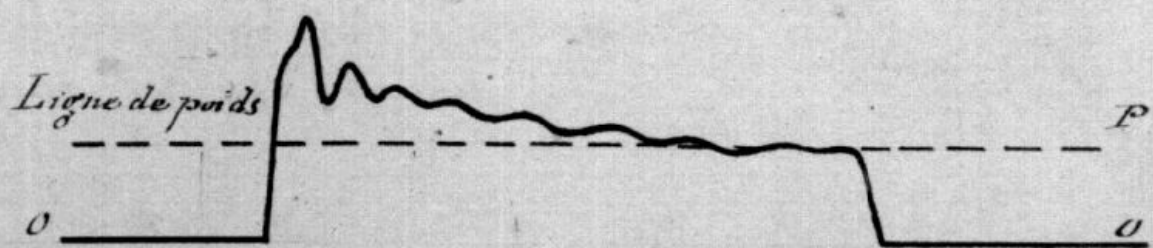
Sauts successifs avec mouvement complet des bras.

Formes différentes de la courbe de la
composante normale de la pression des pieds sur le sol



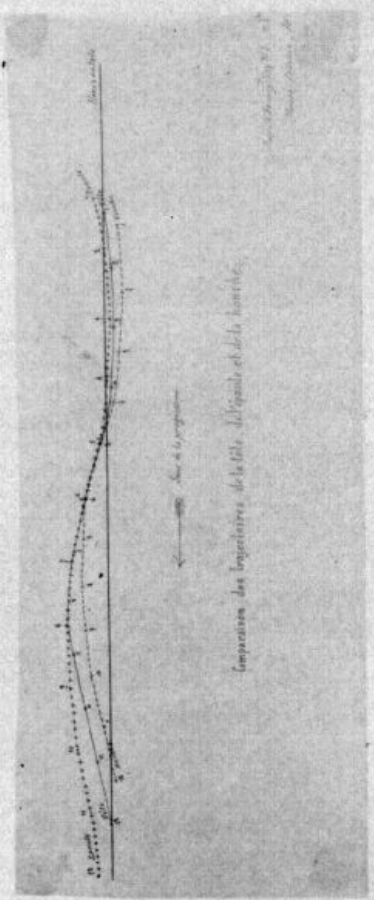
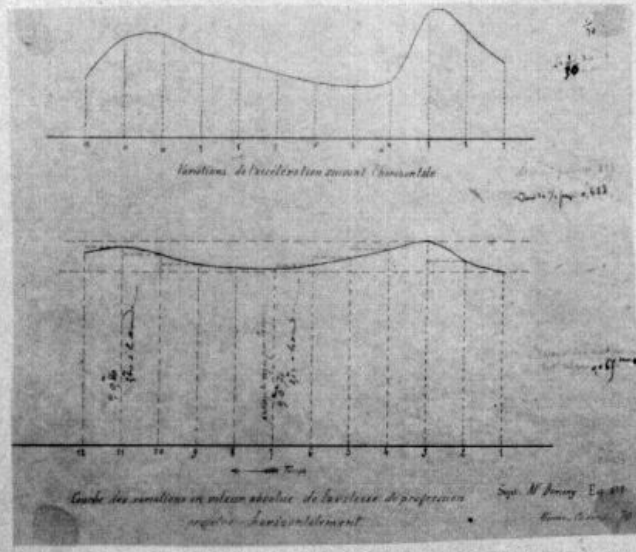
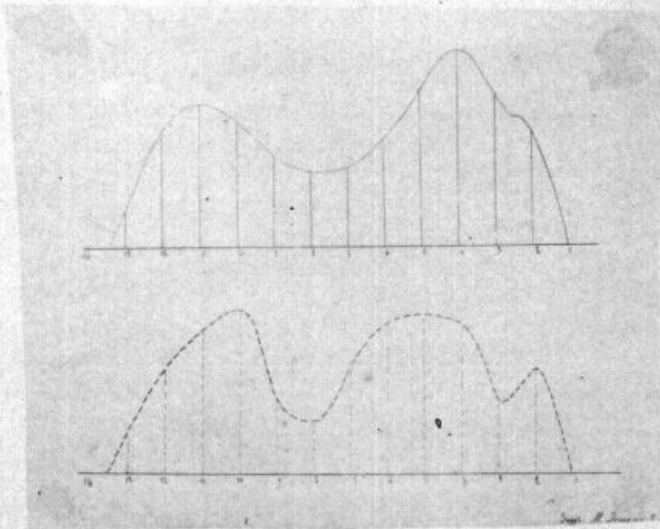
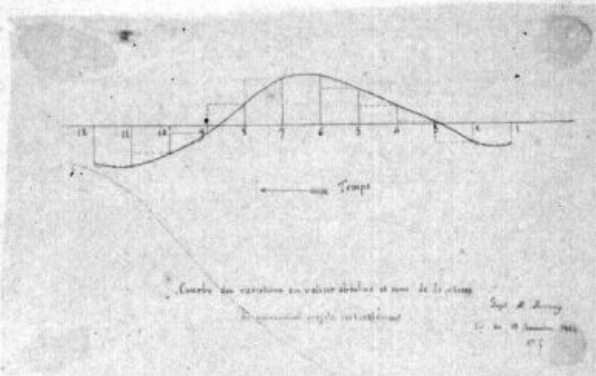
1° Dans une chute raide

On voit la pression acquies au début une valeur très grande qui ne se maintient pas, puis revient après quelques oscillations à la valeur du poids du corps.



2° Dans une chute avec flexion des jambes

On voit la pression acquies une valeur moindre que dans le cas précédent puis diminuer progressivement jusqu'à la valeur du poids du corps en restant toujours supérieure.



Handwritten notes and calculations, including a table of values and a list of names.

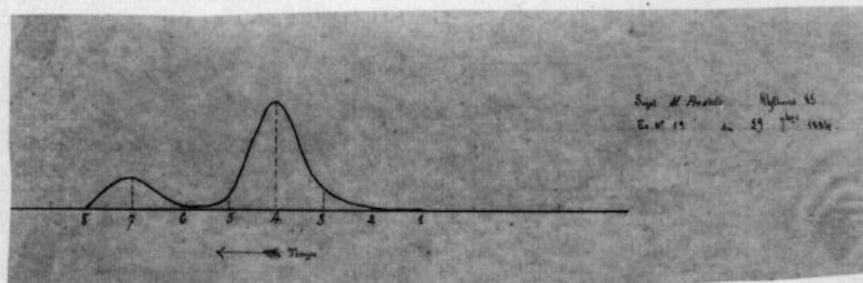
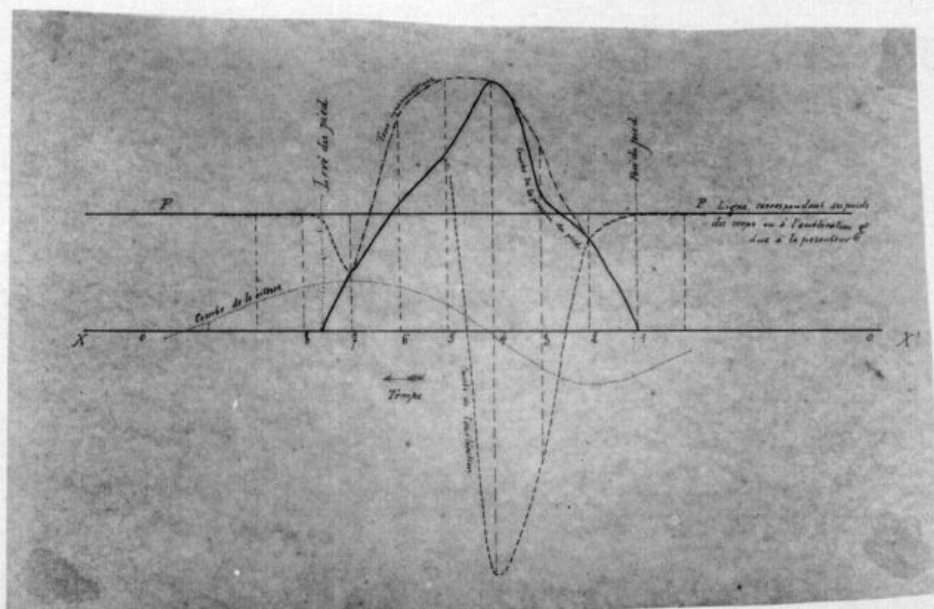
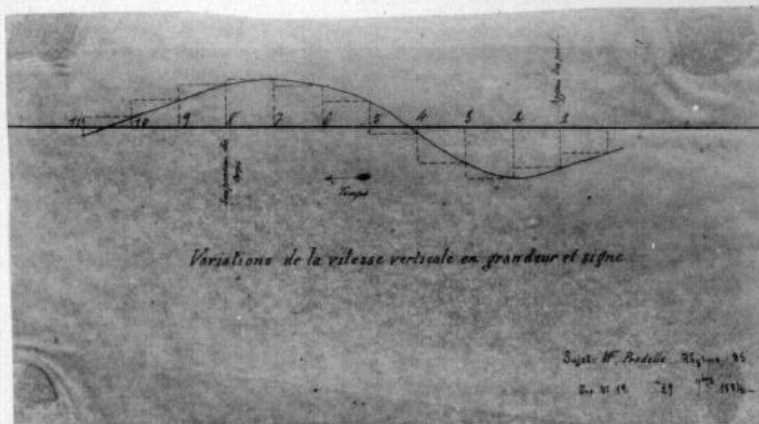
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
...

Sup. N° 1000

N° 163

Comparaison des trajectoires de la tête de l'épaule et de la hanche.

Corrélation entre les indications du dynamographe
 et les données cinématiques fournies par la photographie



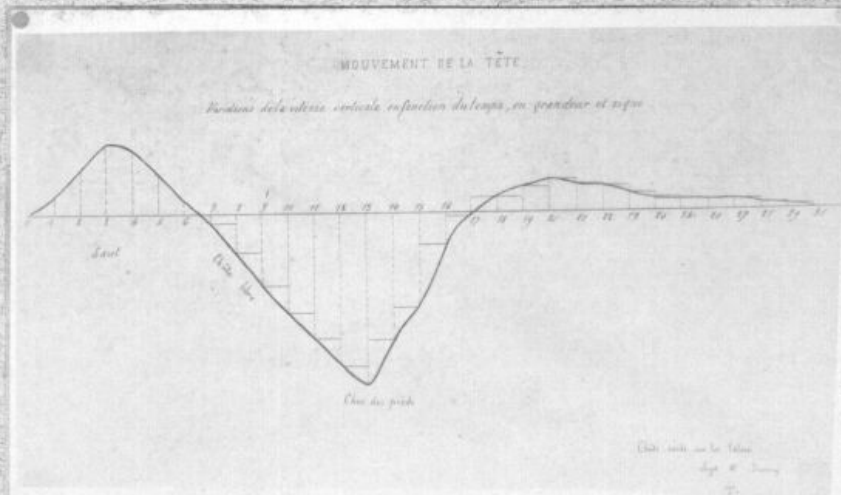
N° 104

Corrélation entre les indications du dynamographe
 et les données cinématiques fournies par la photographie

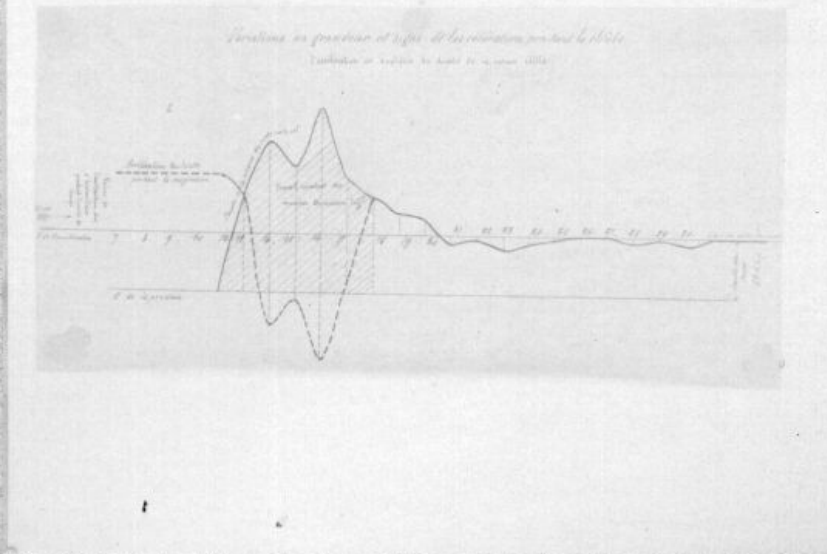
Mouvement de la tête.

1^{re} Variations de la vitesse verticale en fonction du temps, en grandeur et signe

1^{er}



2^{em}



N° 165

2^e Variations en grandeur et signe de l'accélération pendant la chute.

INSTITUT DE FRANCE.

ACADÉMIE DES SCIENCES.

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

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

PAR MM. MAREY ET DEMENY.

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

M. et D.

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

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

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

» Si l'on pouvait suivre dans l'espace les mouvements du centre de gravité du corps, on verrait qu'il exécute une série d'oscillations verticales, dont chacune correspond à l'appui d'un des pieds et qu'en même temps la translation de ce point passe par des vitesses variables, s'accélégrant et se ralentissant tour à tour pendant chaque oscillation. D'autres mouvements encore s'effectuent de droite à gauche et réciproquement, de sorte que la trajectoire du centre de gravité du corps s'infléchit en réalité suivant les trois dimensions de l'espace (1). Mais, comme les mouvements de cette dernière sorte sont peu étendus, nous les négligerons et ne considérerons que les déplacements du centre de gravité, dans un plan vertical parallèle à la direction de la marche.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

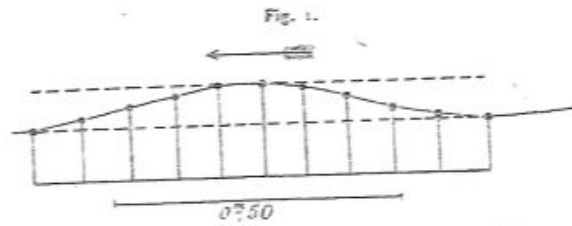
» La trajectoire chronophotographique du sommet de la tête pendant la marche est une courbe sinueuse représentée *fig. 1*, qui passe périodiquement par les mêmes maxima au milieu de l'appui du pied et les mêmes minima aux instants du posé (²). Les droites parallèles ponctuées, tangentes aux inflexions supérieures et inférieures de cette courbe, mesurent par leur écartement la hauteur des oscillations verticales du corps. Pour obtenir la valeur réelle de ces déplacements, on a projeté sur un écran l'image de la *fig. 1* en l'agrandissant au moyen d'instruments d'optique

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

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

(4)

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



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

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

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

La flèche indique le sens de la progression.

» Le travail produit à chaque élévation et à chaque abaissement du corps se mesure donc par le poids du marcheur multiplié par la hauteur verticale qui sépare les droites parallèles ponctuées dans la figure agrandie : de sorte que, si le poids du marcheur est de 75^{kg} et l'amplitude des oscillations verticales de $0^{\text{m}},04$, chaque élévation du corps représentera un travail positif de 3^{kgm} , chaque abaissement un travail négatif de semblable valeur et, comme il y a deux oscillations de ce genre dans un pas complet, le travail musculaire correspondant aux oscillations verticales sera de 12^{kgm} à chaque pas.

» Mais ce produit du poids du corps par le double de la hauteur de l'oscillation verticale est une valeur limite que n'atteint pas réellement la dépense de travail musculaire. En effet, une partie du travail résistant emmagasiné dans les muscles pendant chaque phase de descente est restituée dans la phase d'ascension qui suit. Mais il est impossible jusqu'ici d'estimer la valeur de cette restitution de travail, dont l'existence est toutefois incontestable.

» B. *Travail musculaire dépensé suivant l'horizontale dans la marche.* — La vitesse de translation du corps suivant l'horizontale est périodiquement variée, d'où résultent des variations périodiques de force vive, mesurant le travail moteur ou résistant dépensé aux différentes phases de l'appui des pieds. Ces variations de vitesse se déduisent de l'écartement des points de la trajectoire, puisque ces points sont photographiés à des intervalles de temps égaux entre eux, soit $\frac{1}{50}$ de seconde. La projection horizontale de ces

intervalles permet de construire la courbe des vitesses de la translation horizontale en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles à l'écartement des points, c'est-à-dire à la vitesse. Dans cette courbe, les ordonnées expriment, en mètres par seconde, les vitesses de la translation à des instants successifs. Des vitesses maxima et minima que prend périodiquement la masse du corps on déduit les deux valeurs correspondantes de la force vive qu'a possédée cette masse.

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

» C. *Travail musculaire dépensé pour le déplacement de chacun des membres inférieurs pendant sa suspension.* — Dans aucun cas, le transport du membre inférieur ne répond à l'oscillation d'un pendule : c'est le mouvement très complexe d'un système de deux pendules articulés bout à bout, éloignés de leur position d'équilibre et livrés à l'action de la pesanteur combinée à celle des muscles, tandis que le point de suspension lui-même se meut d'un mouvement varié sur sa trajectoire curviligne.

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

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

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

M. et D.

(6)

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

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

Translation du membre inférieur.....	$\frac{1}{2} \text{mm}$ 0,3
Oscillations verticales du corps.....	6,2
Accélérations et ralentissements de la translation horizontale du corps.....	2,5
Total.....	9,0

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

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

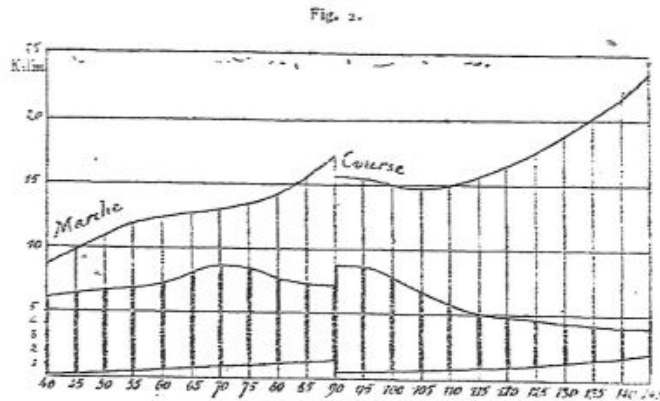
Translation du membre inférieur.....	$\frac{1}{2} \text{mm}$ 3,4
Oscillations verticales du corps.....	2,3
Accélérations et ralentissements dans le sens horizontal.....	18,4
Total.....	24,1

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

(7)

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

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



Valeurs relatives du travail dépensé dans les différents actes qui constituent un pas. Les expériences ont été faites sur un homme pesant 65^{kg}, marchant ou courant sur un terrain ferme parfaitement horizontal.

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

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

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

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

» A. *Variations du travail dépensé dans la translation du membre inférieur.*

— Le travail dépensé dans cet acte croît d'une manière sensiblement proportionnelle à l'accélération de la cadence; mais un fait qui étonne au premier abord, c'est que, pour une même cadence, la course coûte moins de travail que la marche. Ainsi, pour quatre-vingt-dix pas à la minute, la marche dépenserait 1^{ère}, 4 pour la translation du membre inférieur, tandis que la course n'en dépense que 0,5, et pourtant la vitesse absolue du membre est plus grande si l'on court que si l'on marche.

» Cette différence de travail tient à ce que la vitesse du membre par rapport au tronc doit seule être considérée dans ces évaluations; or cette vitesse est plus grande dans la marche que dans la course.

» En effet, à égale cadence du pas, la durée de l'oscillation du membre inférieur est d'autant plus grande que celle de l'appui du pied est moindre. Cet appui, dans la marche, excède la moitié de la durée du pas complet; dans la course, au contraire, la durée de l'appui est toujours inférieure à la moitié de celle du pas (¹). Or, comme le déplacement angulaire du membre inférieur est à peu près le même dans la marche et dans la course, la vitesse sera d'autant moindre que la période d'oscillation aura plus de durée.

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

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

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

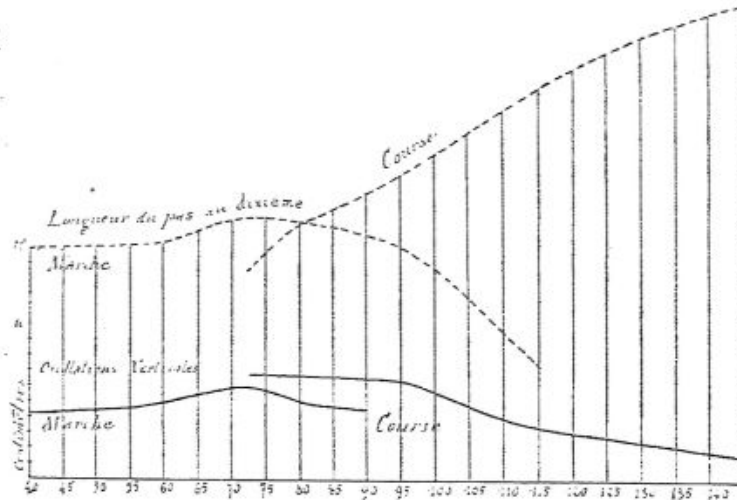
(¹) Voir à ce sujet DEMENY, *Variations de la durée du double appui des pieds dans la marche de l'homme* (séance du 15 juin 1885).

(9)

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

» La photographie et l'inscription directe des oscillations verticales du corps montrent que, dans la marche, il y a une relation entre la longueur du pas et l'amplitude des oscillations verticales du corps; et, comme nous avons établi que la longueur du pas augmente avec la rapidité de la cadence jusque vers soixante-dix pas environ, puis diminue rapidement à mesure que la cadence s'accélère (1), il est naturel que le travail correspondant à ces différentes cadences éprouve des variations semblables.

Fig. 3.



Variations des oscillations verticales du corps dans la marche et dans la course à des cadences variant de 40 à 170 pas à la minute.

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

» Dans la course, le travail est plus grand pour les cadences lentes et décroît ensuite indéfiniment. Les oscillations verticales suivent, dans cette allure, une variation semblable. Le corps, suspendu en l'air pendant une partie de la durée du pas de course, n'est plus constamment soumis aux changements de direction des membres; dès lors, c'est la durée imposée aux oscillations verticales qui en règle l'amplitude. Aux cadences lentes,

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

il faut que le corps ait été élevé très haut pour ne retomber que tardivement sur le membre et l'appui; aux cadences rapides, une faible étendue est imposée à l'oscillation par la courte durée qui lui est assignée.

» Ainsi, dans la marche, l'amplitude des oscillations verticales du corps est liée à la longueur du pas; elle en est indépendante dans la course, où l'on observe même, à cet égard, une relation inverse: on a exprimé ces rapports dans la *fig. 3*.

» C. *Variations du travail dépensé dans les accélérations et les ralentissements de la translation horizontale du corps.* — Cet élément du travail s'accroît assez régulièrement avec la vitesse de l'allure et avec la longueur du pas. Dans la course, il prend une valeur très grande, quoique les variations absolues de la vitesse soient faibles; cela tient à ce que les variations de la force vive acquise ou perdue par la masse du corps sont proportionnelles à la différence des carrés des vitesses maxima et minima de la translation.

» De ces mesures on peut tirer des applications pratiques à la meilleure utilisation des forces musculaires dans la marche ou dans la course, suivant le but qu'on se propose, et qui sera tantôt de faire le plus long parcours possible avec la moindre dépense de force, tantôt de franchir une certaine distance dans le temps le plus court possible.

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

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

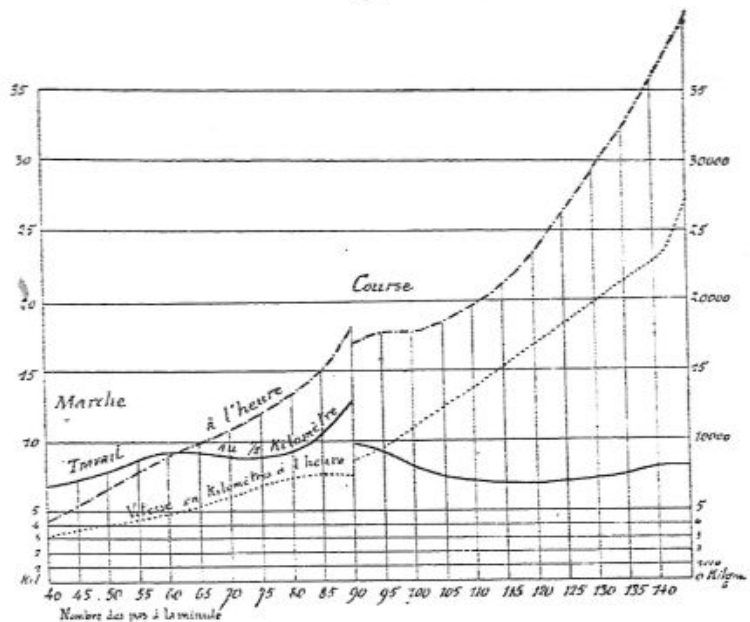
» D'autres considérations doivent intervenir encore pour motiver le choix des allures. Il ne faut pas que la dépense de travail se fasse en un temps trop court, sans quoi la réparation des forces musculaires n'arriverait plus à compenser la fatigue. On peut impunément soutenir une longue marche au bout de laquelle on aura dépensé un grand travail, tandis qu'une course rapide épuiserait en très peu de temps la force musculaire, avec une dépense totale de travail beaucoup moindre (*fig. 4*).

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

(11)

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

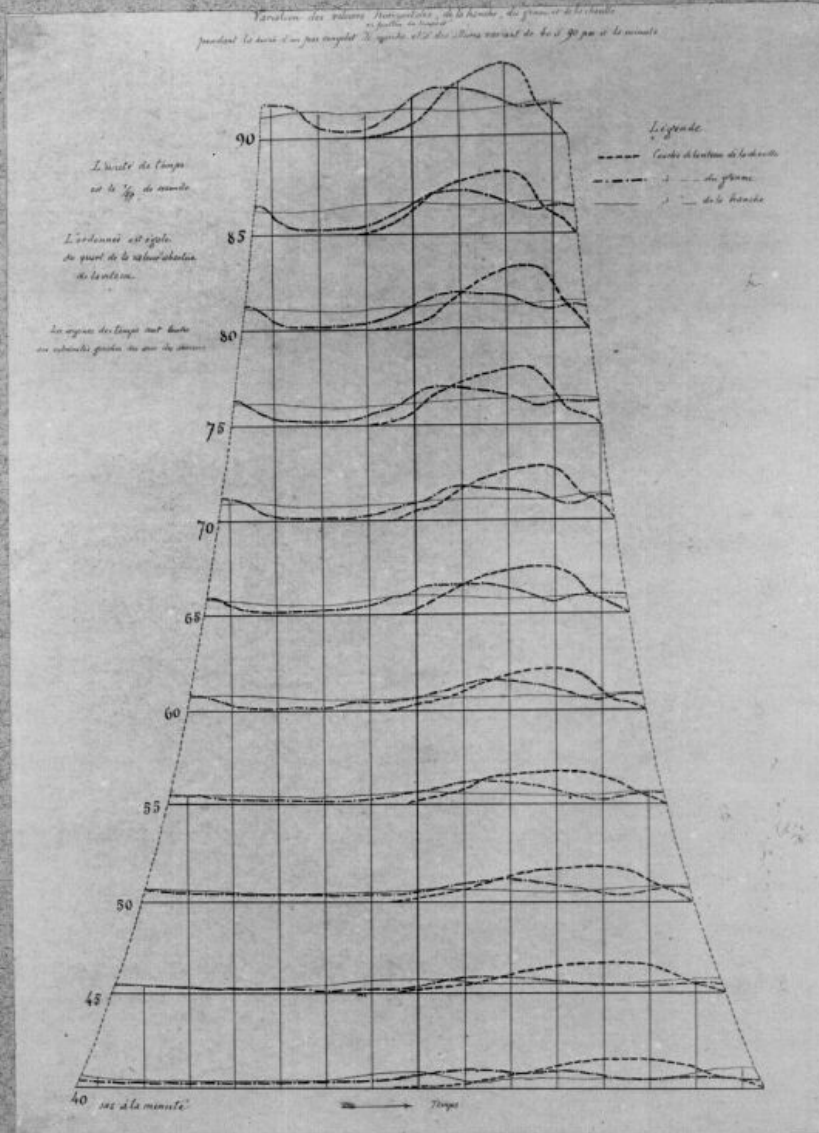
Fig. 4.



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

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

Locomotion Humaine



N° 17

Durée du pas de marche de 40 à 90 pas à la minute

La courbe en trait - - - - est la courbe des vitesses de la cheville à chaque instant

— - - - -

||

du genou

—

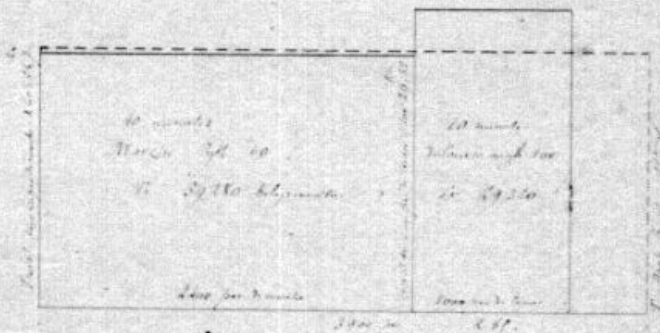
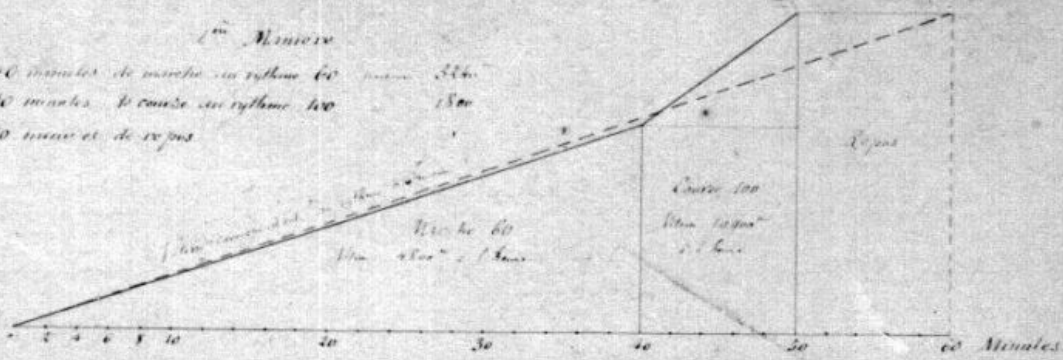
de la hanche

Économie de travail réalisée dans une étape d'une heure

au moyen d'une alternance de marches et de courses
suscéptiblement évitées.

1^{er} Modèle

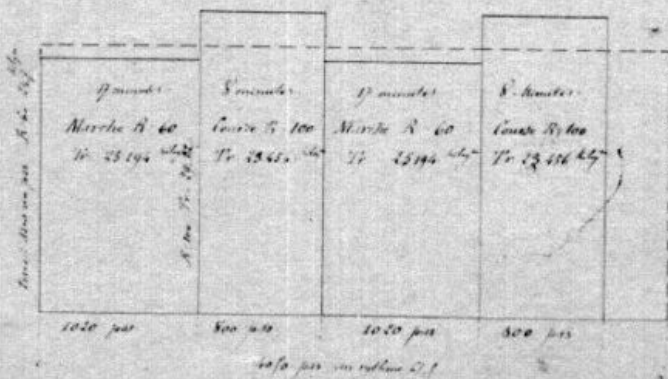
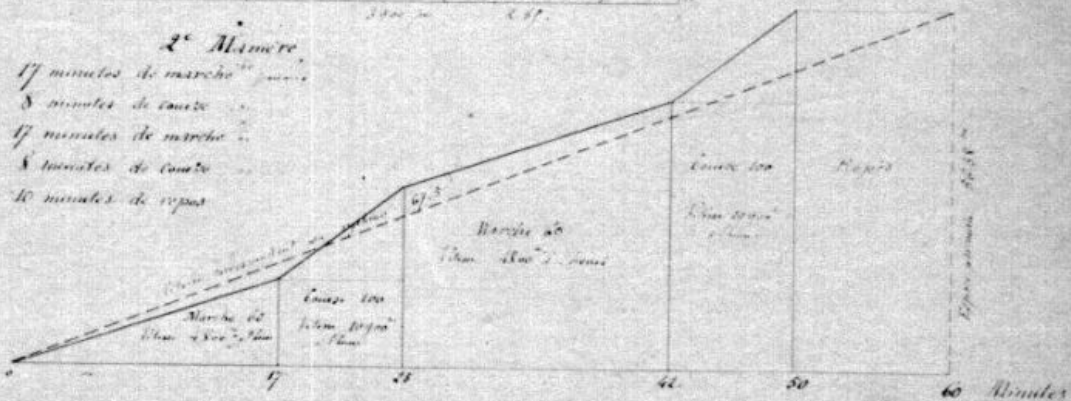
70 minutes de marche au rythme 60 336
 10 minutes de course au rythme 100 180
 10 minutes et de repos



Travail de marche au rythme 60 336
 Travail de course au rythme 100 180
 Travail de repos 0
 Total 516

2^e Modèle

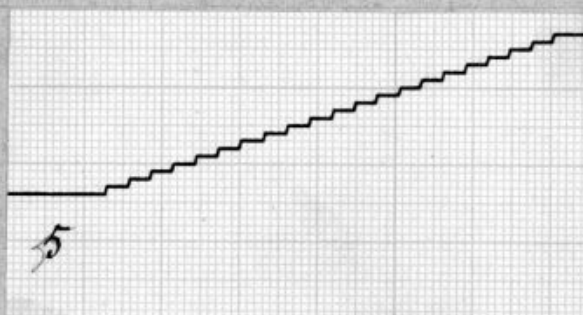
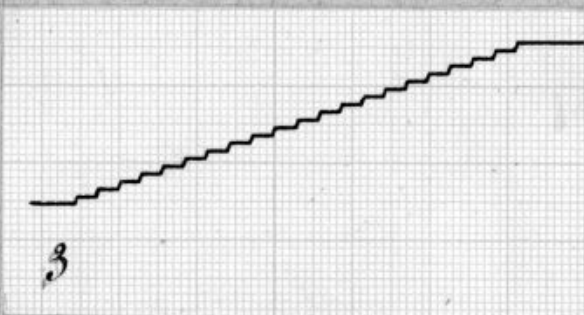
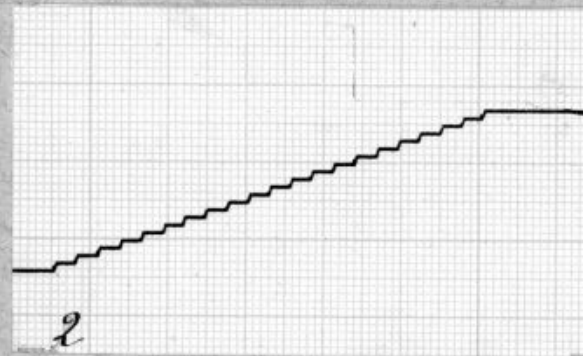
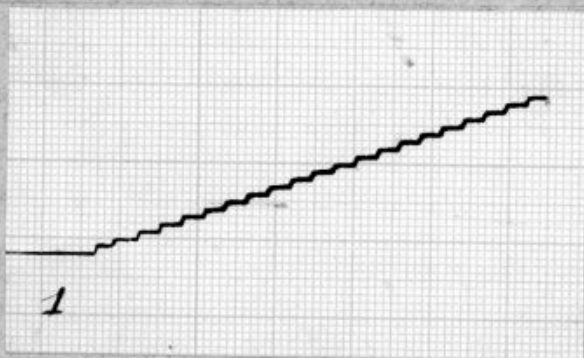
17 minutes de marche
 8 minutes de course
 17 minutes de marche
 8 minutes de course
 10 minutes de repos



Travail de marche au rythme 60 1122
 Travail de course au rythme 100 720
 Travail de repos 0
 Total 1842

Travail de marche au rythme 60 1122
 Travail de course au rythme 100 720
 Travail de repos 0
 Total 1842

Influence de la forme de la chaussure sur la longueur du pas de marche (Hauteur du talon)

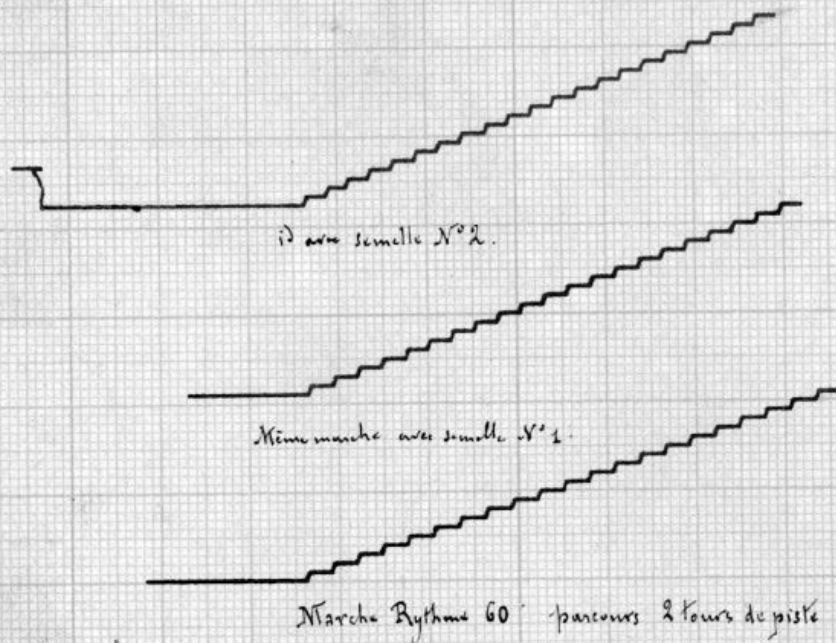


1. 2. 3. 5 Tracés odographiques correspondant à des talons dont la hauteur augmente de 0,8.

1. N° 4 mouvement utilisé la série continue de hauteur depuis 0 jusqu'à 4 centimètres

Influence de la forme de la chaussure sur la longueur du pas Longueur et raideur de la semelle

Influence de la longueur et de la raideur de la semelle sur la longueur du pas



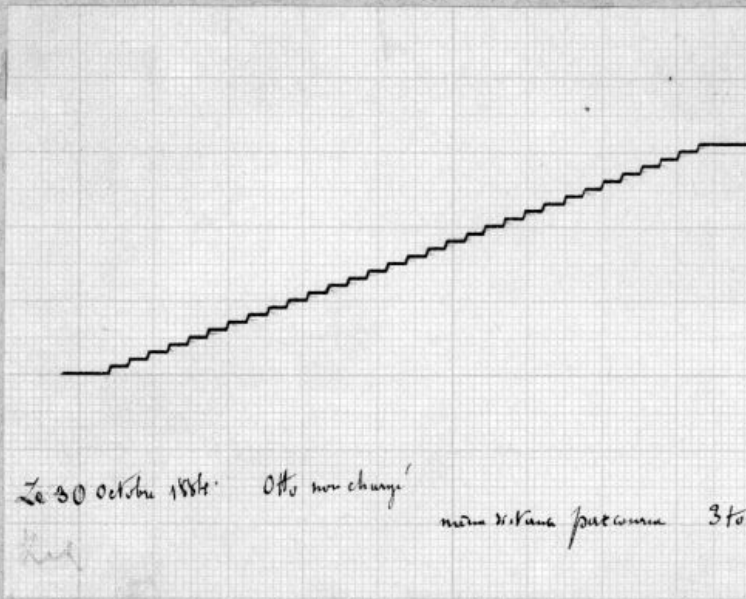
Le 8 Octobre 1884.

Sujet. M. Marey

Influence de la charge sur la vitesse de progression d'un marcheur

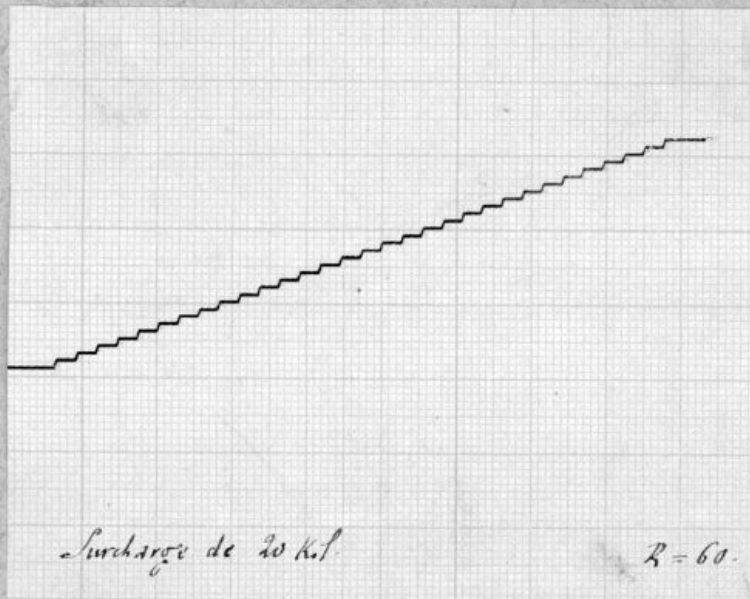
Rythme 60

Sujet Otto Lund



Distance
3 tours de piste

Surcharge 20 Kil.
sur un crochet



Deux traces odographiques montrant le ralentissement de la vitesse de progression d'un marcheur à qui l'on impose un rythme et que l'on surcharge de 20 kilogrammes