

La Société de Biomécanique présente : **PIONNIERS EN BIOMÉCANIQUE**

novembre 2018

édition N°4

EDITORIAL

Depuis quelques années, la Société de Biomécanique présente des **articles** consacrés à **de grands pionniers de notre science**. Edités tout d'abord dans la Lettre puis dans le rapport d'activités, ils sont maintenant présentés en ligne sur le site WEB de la Société de Biomécanique.

Simon Bouisset a porté cette rubrique et il a eu aussi l'idée de l'édition d'un fascicule qui rassemblerait l'ensemble des articles parus. Chantal Pérot s'est chargée de la mise en forme du livret et de son actualisation. Merci à eux.

Ce fascicule est maintenant accessible en version numérique à tous les membres de la Société de Biomécanique qui voudraient prendre le plaisir de se replonger dans l'histoire de la biomécanique ou plus précisément dans celles de biomécaniciens célèbres.

La quatrième édition du livret « pionniers en biomécanique » s'est enrichie d'un article sur **James Lighthill**. Un grand merci à Dominique Barthes-Biesel et Timothy J. Pedley pour leur contribution.

Je profite de cet édito pour remercier tout particulièrement les rédacteurs des articles et pour lancer un appel à tous les membres de la SB. **Vos contributions à la rédaction de nouveaux textes sur les pionniers de la biomécanique sont les bienvenues**. C'est de vous que dépend l'enrichissement du groupe « Histoire de la Biomécanique ». **Nous comptons sur vous tou-te-s**.

Je termine en soulignant chaleureusement, au nom du Conseil d'Administration, **l'implication essentielle de Simon Bouisset et Chantal Pérot** pour que ce fascicule ait pu voir le jour et pour qu'il soit régulièrement complété.

Valérie Deplano,

Présidente de la Société de Biomécanique



Au sommaire

(par ordre chronologique d'édition)

- **J. A. Borelli par S. Bouisset**
- **E. J. Marey par S. Bouisset**
- **N. A. Berstein par S. Bouisset**
- **G. Demeny par H. Monod**
- **Locomotion du cheval et artistes animaliers par C. Degueurce**
- **G. Duchenne de Boulogne par F. Clarac et J. Massion**
- **A. V. Hill par J. Lebacqz**
- **W. Braune et O. Fischer par L. Mannoni**
- **A. Londe par H. Monod**
- **C.S. Sherrington par J. Duchateau**
- **J. Amar par H. Monod**
- **Ewald R. Weibel par D. Isabey, B. Louis et M. Filoche**
- **J. Lighthill par D. Barthes-Biesel et T.J. Pedley**



Chapitre 1 :

**Johannes
Alphonsi
BORELLI**

**JOHANNES ALPHONSO BORELLI
(1608-1679)
«LA BIOMÉCANIQUE ANATOMIQUE
À SES DÉBUTS)**

Depuis l'Antiquité, on a toujours été tenté d'appliquer les connaissances scientifiques ou techniques du moment à l'étude des processus biologiques. Un tel attrait se trouve être particulièrement vérifié pour ce qui concerne les fonctions physiologiques. C'est notamment le cas dans le domaine du mouvement, pour lequel Borelli a défini et mis en œuvre la méthode d'étude scientifique.

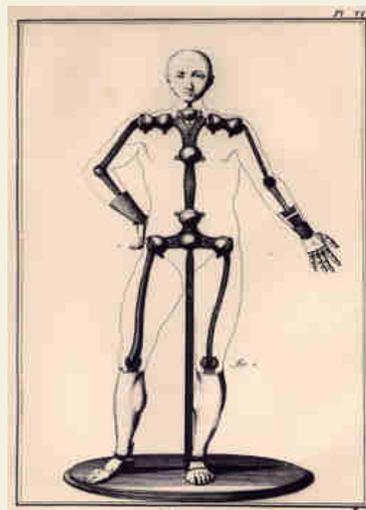
Johannes Alphonso Borelli (1608-1679) est un savant du XVIIème siècle. À l'exception de ce qui touche à l'astronomie, ses recherches sont condensées dans un ouvrage («De motu animalium»), dont la première version, publiée en deux parties (1680 et 1681), trouvera plus

tardivement sa forme définitive. Au prime abord, on ne peut qu'être intrigué par les rébus que proposent les figures et impressionné par la diversité des thèmes abordés, du mouvement « musculaire » à la fermentation.

On est surpris par les multiples facettes du mouvement, analysés tant chez l'homme que chez l'animal (oiseaux, poissons...), voire chez les plantes: muscles et leviers osseux, cœur et vaisseaux, mouvements articulaires ou circulatoires, postures et locomotion (terrestre, aérienne et aquatique)...

C'est progressivement, au cours de sa carrière de professeur de mathématiques aux Universités de Messine et de Pise, que Borelli va

s'intéresser à l'anatomie, à la physiologie et, de ce fait, aux maladies régnant en Sicile.



Modélisation du corps (Borelli J.A., 1680)

Tenant d'appliquer en physiologie l'enseignement de Galilée en mécanique et en hydraulique, il va chercher l'explication des fonctions d'un organe, tel que le muscle, ou d'un appareil, tel que l'appareil circulatoire, dans la construction, en schéma ou en maquette, d'un modèle mécanique.

La mise en œuvre systématique d'un tel modèle et le souci de sa validation à partir de données expérimentales font l'originalité de Borelli par rapport à ses prédécesseurs plus ou moins éloignés, comme Leonardo da Vinci (1452-1519) ou Giralamo Fabrici d'Acupendente (1537-1619). Et c'est à lui que revient le mérite d'avoir, probablement le premier, formulé l'objet fondamental de la Biomécanique: "*J'aborderai la difficile question de la Physiologie du Mouvement Animal... J'entreprends ce travail de manière à ce que cette partie de la Physique, adornée et enrichie de démonstrations mathématiques, puisse être considérée comme une part de la science physico-mathématique, au même titre que l'Astronomie*". Autrement dit, intégrer Physiologie et Physique.

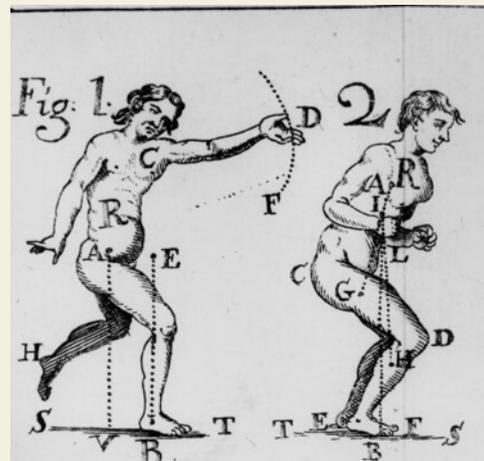
L'oeuvre de Borelli fonde l'ère de la Biomécanique anatomique sur une base scientifique.

Simon Bouisset
 Professeur émérite
 Université Paris-Sud/Orsay
 simon.bouisset@u-psud.fr

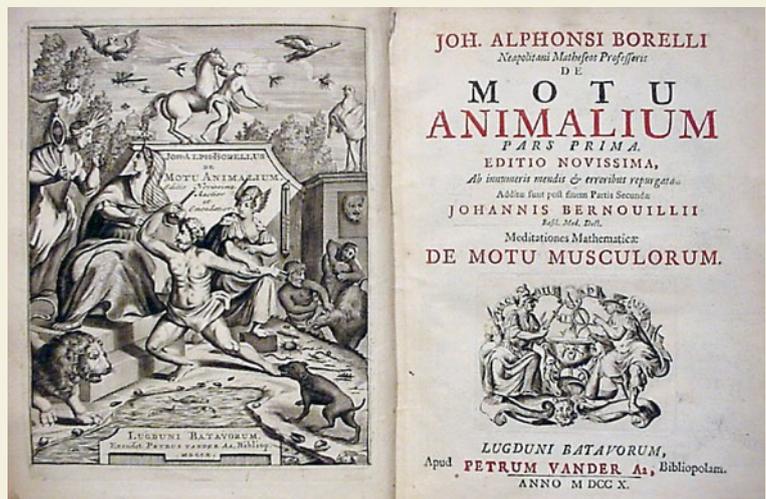
Lettre SB - juillet 2009

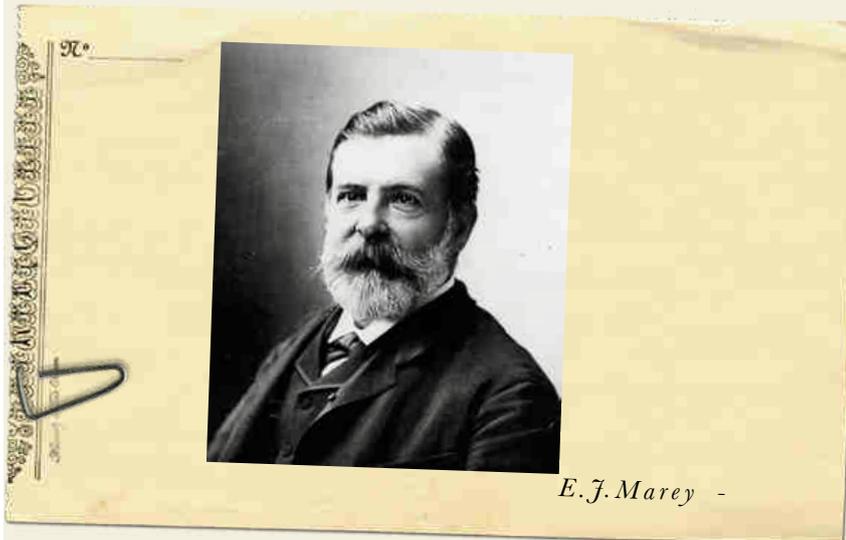
Repères bibliographiques:

- Borelli J.A. (1680) De motu animalium. Pars prima. A. Bernabò pub. Roma.
- Borelli J.A. (1681) De motu animalium. Opus posthumum. Pars altera. A. Bernabò pub. Roma.
- Cappozo A. and Marchetti M. (1992) Borelli's heritage. ISB series, Promograph pub. Roma, vol I (Cappozo A. Marchetti M. and Tosi V. ed.), 33-47.



Modélisation de la locomotion, sous l'influence du poids et de la réaction du sol (Borelli J.A., 1680)





Chapitre 2 : Etienne Jules MAREY

Etienne-Jules MAREY (1830-1904) **«QUAND L'ÉTUDE DU MOUVEMENT DEVINT UNE SCIENCE EXPÉRIMENTALE»**

Le tout premier contact avec l'oeuvre d'Etienne-Jules Marey produit une forte impression par la beauté des images, pour certaines empreintes d'un halo de mystère. Puis, on s'avise de la diversité des sujets traités, même s'il s'agit toujours de mouvement: mouvements de corps inanimés, solides ou fluides, mais, aussi et surtout, mouvements de l'homme et de nombreuses espèces animales. Si on approfondit encore, c'est l'innovation technique qui frappe. Néanmoins, ne voir en E.J. Marey (Fig. 1) qu'un inventeur, même de grand talent, constituerait une vision très incomplète. En effet, c'est dans le cadre d'un ambitieux projet scientifique qu'E.J. Marey et ses collaborateurs inventent des techniques et mettent en oeuvre une méthode scientifique d'étude expérimentale du mouvement. Cette méthode, qui se fonde sur les lois de la Mécanique, c'est-à-dire la Biomécanique, a été élevée au rang de

science par Etienne-Jules Marey, qui l'a appliquée au mouvement de l'homme et des animaux.

L'invention des techniques biomécaniques

E.J. Marey se présentait lui-même comme un « ingénieur médical », ou un « ingénieur de la vie ». Une telle désignation est particulièrement justifiée si l'on considère les techniques cinématiques et dynamiques qu'il conçoit, développe et perfectionne sans cesse, avec l'aide efficace de nombreux collaborateurs.

Par définition, la cinématique s'intéresse au mouvement, tel que le caractérisent déplacement, vitesse et accélération. La technique cinématique inventée par E.J. Marey se rapporte à la détection du déplacement: c'est la **chronophotographie**. Utilisant la transduction optique à l'instar d'un photographe réputé, Eadweard J. Muybridge (1830-1904), la technique permet de détecter et d'enregistrer le déplacement de segments corporels, c'est-à-dire de saisir les formes corporelles dans leur évolution. En quelques années seulement, entre 1882 et 1888,

E.J. Marey y apporte de nombreuses améliorations: le déplacement est d'abord rendu par des silhouettes, puis par des épures géométriques (Fig. 2), et, ce, pour la toute première fois dans l'histoire. Caractérisée par l'unicité de point de vue, la technique permet la décomposition du mouvement sur une seule et même plaque photographique (« chronophotographie à plaque fixe »), qui enregistre des clichés successifs, et rend possible d'en suivre les différentes phases d'un seul coup d'oeil. Il y aura encore une nouvelle étape technique, en 1888, celle de l'utilisation d'une bande de papier mobile, puis d'un film photosensible sans perforations et d'une caméra, qui constituent la « chronophotographie à pellicule », fondement de la prise de vue cinématographique.

L'invention de la chronophotographie suscite un retentissement considérable dans de multiples domaines (mouvements professionnels, sportifs, pathologiques). Elle est accompagnée de la mise au point de nombreux dispositifs complémentaires

permettant l'étude du mouvement de telle ou telle partie du corps (tronc, pubis, mâchoire, etc.), ou encore la mesure de la performance (trajectoire de la pointe d'une épée, hauteur d'un saut, chemin parcouru lors d'une marche, etc.).

Dans la même période, E.J. Marey s'intéresse aux techniques dynamiques, c'est-à-dire à la mesure des forces, qui, par définition, déterminent le mouvement. Il conçoit et réalise la première **plateforme de force** de l'histoire de la biomécanique, la « table dynamométrique » (E.J. Marey, 1883), encore dite « plateforme dynamographique » ou « dynamographe » (Fig. 3). Il s'agit d'un sol de mesure, permettant d'enregistrer les actions qui y sont exercées par un sujet au repos ou en mouvement. Autrement dit, ce dispositif mesure les forces de réaction au sol, et donc l'effet global des actions musculaires, pour autant que les forces extérieures appliquées au sujet se limitent à son poids, ainsi qu'à la réaction du sol. Au total, c'est avec E.J. Marey que des progrès techniques décisifs concernant la

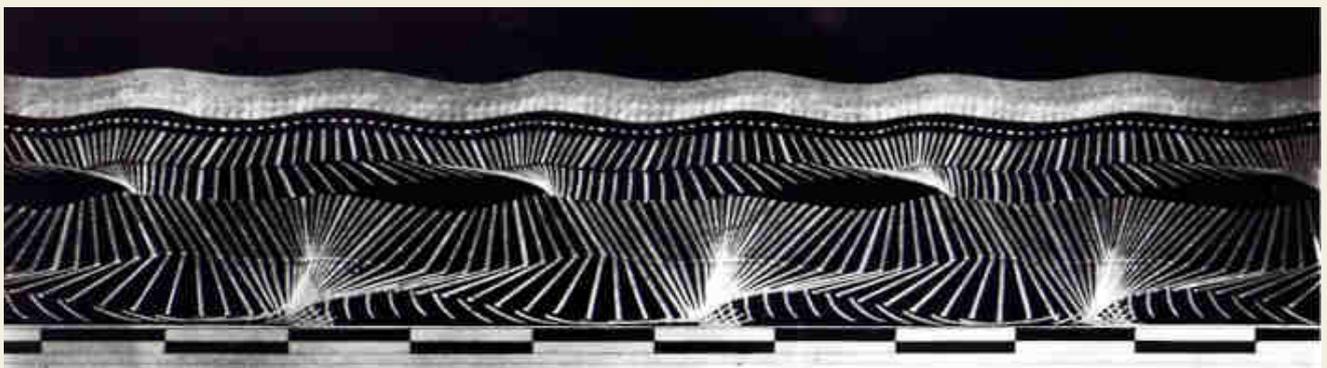


Fig. 2 - Chronophotographie de la course (Musée Marey, Beaune). Le sujet (« Homme en noir ») porte une combinaison noire, munie de bandes blanches disposées le long des principaux segments corporels, et de pastilles fixées au niveau des centres articulaires, afin de permettre d'identifier le déplacement du membre supérieur, du membre inférieur et de la tête.

La définition d'une méthode scientifique d'étude du mouvement

Contrairement à l'impression fallacieuse résultant d'un survol rapide de l'œuvre d'E.J. Marey, l'innovation technique à laquelle il s'attache, avec tant de soin et de talent, s'inscrit dans une perspective plus large, celle d'une méthode expérimentale d'analyse. Sa démarche scientifique consiste à capter, inscrire, et expliquer tous les mouvements possibles, afin d'en découvrir les lois générales.

La méthode, qu'il préconise et applique, comporte plusieurs étapes : analyse du mouvement, souvent réalisée par l'utilisation conjointe de plusieurs techniques, cinématiques et/ou dynamiques, puis tentative de quantification, et enfin interprétation. C'est, par exemple, le cas de l'évaluation du travail accompli dans le saut, ou dans la locomotion, dont l'analyse propose une interprétation en termes de propriétés musculaires. Enfin, quand cela est possible, un modèle analogique est réalisé, c'est-à-dire une synthèse, afin de tester la validité des résultats.

La méthode est clairement biomécanique, au sens moderne du terme, même si, en cette

période pionnière, certaines limitations obèrent encore son application. Ainsi, les connaissances mécaniques qui sont utilisées sont-elles modestes, et les résultats, principalement d'ordre qualitatif. Il n'empêche, une méthode scientifique d'étude du mouvement, basée pour la première fois sur l'expérimentation, est définie et mise en œuvre, dans une perspective clairement revendiquée, celle de fonder des explications objectives. Cette méthode peut être qualifiée de « globale », dans la mesure où les grandeurs mesurées

sont recueillies à la périphérie du corps, et résultent donc d'une intégration de phénomènes plus élémentaires.

Les raisons des choix scientifiques d'E.J. Marey

Les choix méthodologiques d'E.J. Marey sont loin d'être circonstanciels: ils reposent sur deux positions de principe.

La première procède de ses convictions philosophiques. En effet, E.J. Marey partage les idées positivistes

d'Auguste Comte, et s'oppose fermement à la théorie du vitalisme. Son intérêt pour la Mécanique en constitue la conséquence,

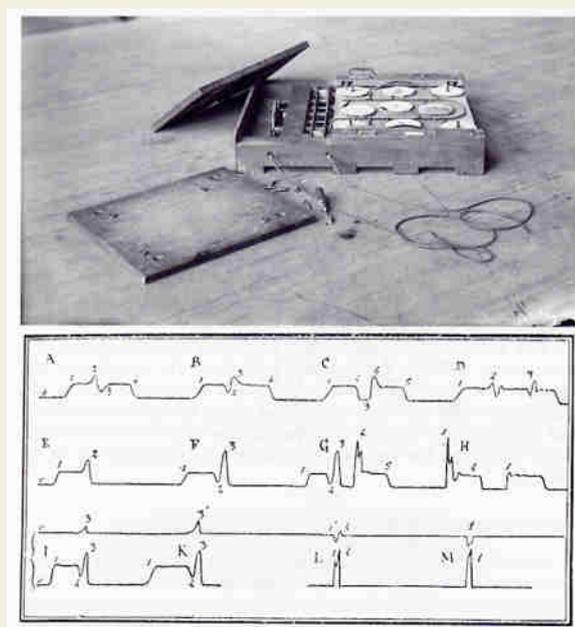


Fig. 3 - En haut : Plateforme de force (Archives Collège de France).

En bas : Premiers tracés obtenus avec une plateforme (Marey, 1883). De A à M : divers mouvements (composante verticale) sont représentés ; en D, élévation et abaissement du membre supérieur.

au service d'une ambition, celle de corréler le mouvement aux forces qui le produisent, tant chez l'homme que chez de nombreuses espèces animales. Donc, il développe une méthode scientifique d'analyse du mouvement, afin de se donner les moyens d'une explication objective.

La seconde position de principe, dont il se réclame, n'est pas moins fortement affirmée. Au motif que, selon lui, la vivisection perturberait les fonctions naturelles (et ne permettrait pas de connaître le jeu régulier de la vie), il prône une approche menée à partir des données recueillies à la périphérie du corps, c'est-à-dire une approche globale. C'est là une des originalités d'E.J. Marey, qui le place dans une opposition radicale avec l'approche réductionniste de Claude Bernard et de la plupart de ses contemporains.

La conjonction de ces deux positions de principe explique la prudence qu'inspirait à E.J. Marey l'étude de l'« acte de la volonté », comme il nommait le mouvement volontaire, et pourquoi les interprétations physiologiques qu'il a développées se limitent pour l'essentiel à l'action des muscles, notamment au rôle de l'élasticité musculaire.

En conclusion, un siècle a passé, et l'on n'a plus guère l'idée du rayonnement scientifique (et de la reconnaissance institutionnelle) d'E.J. Marey. Pourtant, aucun de ceux dont le nom marque l'étude du mouvement n'a manqué de lui rendre hommage, tels Braune und Fisher (1895) ou Bernstein (1935), Woodworth (1902), et bien d'autres. Bien sûr, un long chemin a été

parcouru depuis lors, grâce au progrès des techniques, à l'évolution des problématiques et à l'accumulation des connaissances. Il n'en est que plus remarquable de constater le caractère indélébile de son empreinte: l'étude du mouvement ne procède-t-elle pas toujours de la méthode qu'il a préconisée?

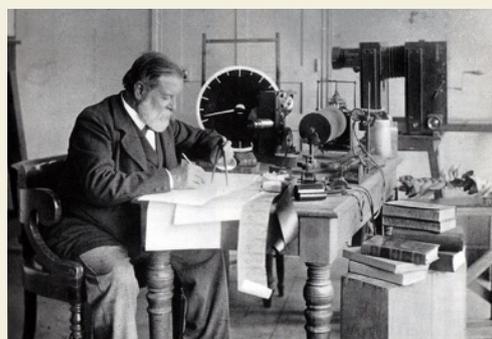
Simon Bouisset

Professeur émérite
Université Paris-Sud/Orsay
simon.bouisset@u-psud.fr

Lettre SB - décembre 2009

Quelques repères bibliographiques

- F. Dagognet : Etienne-Jules Marey, Hazan, Paris, 1987.
- L. Mannoni : Etienne-Jules Marey, la mémoire de l'œil; Milan-Paris, Mazzotta-Cinémathèque française, 1999.
- E.J. Marey : De la mesure dans les différents actes de la locomotion; C.R. Acad. Sci., Paris, 1883, 97, 820-825.
- E.J. Marey : Le Mouvement; G. Masson, Paris, 1894.
- E.J. Marey : La photographie du mouvement, Catalogue de l'exposition du Musée national d'Art Moderne (1977-78); Centre Georges Pompidou, Paris.



E.J. Marey vers 1900 - http://fr.wikipedia.org/wiki/Étienne-Jules_Marey#mediaviewer/



Bernstein vers 1930

N.A. BERNSTEIN (1896-1966):
«LA COMMANDE DU MOUVEMENT
CONJECTURÉE
À PARTIR DES TRACÉS
BIOMÉCANIQUES»

Nikolaj Alexandrovitch Bernstein est élevé dans une famille, où la musique tient une part importante et où l'on parle plusieurs langues (ce qui lui facilitera ultérieurement l'accès à la littérature scientifique et médicale européenne). Il reçoit une formation médicale, à l'instar de son père, médecin psychiatre.

C'est peu de dire que sa vie a été fortement marquée par les événements historiques qu'a connus alors la Russie. Après les années de guerre et les débuts de la Révolution, il revient à Moscou (en 1921), où il commence sa carrière professionnelle dans une clinique psychiatrique et audiolgique. Peu de temps après (en 1922), il rejoint le tout nouvel Institut Central du Travail, où se constitue un groupe de médecins et d'ingénieurs, orienté vers la Physiologie et la Biomécanique du Travail.

Chapitre 3 :

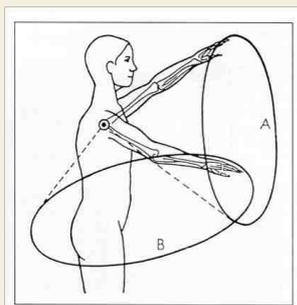
Nicolaj
Alexandrovitch
BERNSTEIN

C'est là que se révèle son intérêt pour la science.

À la suite de J.E. Marey, et à l'instar de W. Braune et O. Fisher (*Der Gang des Menschen*, 1895), N.A. Bernstein va commencer par développer de nouvelles techniques d'enregistrement du mouvement, principalement cinématiques (« cycloprogrammétrie »), avec une précision alors inégalée. Il augmente la fréquence d'échantillonnage des prises de vue, améliore la technique d'enregistrement graphique et la méthodologie des dépouillements, se soucie de la représentativité de ses échantillons de mesure. Il s'attache également, dès sa publication sur la biomécanique des mouvements de percussion (1923), à l'analyse des tracés biomécaniques sur une base mathématique, afin de dégager les principes de base qui sous-tendent l'organisation du mouvement. Travaillant simultanément dans divers laboratoires et instituts (il quittera l'Institut Central du Travail pour celui de Biomécanique du Sport, en 1934), N.A. Bernstein développe ses recherches.

Celles-ci portent sur une grande variété de mouvements (professionnels, sportifs et artistiques), simples aussi bien que complexes, et exécutés par différentes catégories de sujets (jeunes, adultes, malades pathologiques). Partir d'expériences sur des mouvements relativement simples, comme les mouvements de percussion, pour tenter d'en extraire des principes généraux constitue d'ailleurs l'une des caractéristiques de la démarche de N.A. Bernstein.

C'est ainsi qu'il formule, en 1935, quelques principes de base sur les systèmes autorégulés, et le rôle du feedback dans la régulation du mouvement. Puis, en 1947 (dans « The construction of movements »), il donne une description des niveaux de base des mouvements chez l'homme, allant du niveau élémentaire -spinal et sous-cortical- à différents niveaux corticaux, en charge de la représentation spatiale, de celle de l'objet et de celle de l'aspect symbolique de la tâche.



Mouvement circulaire du membre supérieur pour différents angles de l'épaule. Les mêmes trajectoires de la main, réalisées dans des conditions

posturales différentes (A et B), sont sustentées par des patrons musculaires différents (d'après Bernstein, 1935).

Il souligne l'impossibilité de rendre compte de la commande du mouvement par un contrôle central direct, et insiste sur le rôle du feedback prenant son origine dans les afférences périphériques.

Malheureusement, la guerre bien sûr, mais aussi, et surtout, les turbulences idéologiques du régime soviétique font qu'à partir des années 1939-40 et pratiquement jusqu'à sa mort (en 1966), N.A. Bernstein sera dans l'impossibilité de mener la moindre expérimentation significative, malgré l'obtention du prix Staline (l'équivalent du Prix Nobel) en 1947. Bien qu'à l'éclipse, sa bibliographie scientifique est pratiquement vide entre 1949 et 1960, sa production éditoriale n'en sera pas tarie pour autant. Il s'engagera alors dans une réflexion sur la « Physiologie de l'Activité », un système philosophique, où il posera les principes de base d'une approche probabiliste de l'organisation du mouvement dirigé. L'œuvre et la vie de N.A. Bernstein sont de nature à susciter de multiples commentaires. On se limitera, à titre d'exemple, à l'évolution de ses idées sous la pression de faits expérimentaux. Ainsi, l'œuvre de W. Braune et O. Fisher sur la marche par rapport à laquelle la démarche de N.A. Bernstein se structure ressort à un «mécanicisme» strict. Elle sous-entend qu'une tâche motrice donnée résulte d'une configuration de forces unique, c'est-à-dire d'un patron musculaire unique, et que ce patron procède d'une commande centrale directe. Autrement dit, l'activité de chacun des muscles serait réglée de façon prédéterminée par les centres nerveux supérieurs.

Or, quelques années après ses premiers travaux, une étude sur le piano (1929) le conduit à considérer que le même mouvement peut résulter de différentes configurations musculaires. Il se sépare alors de Braune et Fisher, et pose, en 1935, qu'il n'y a pas de relation univoque entre les influx d'origine centrale et la force périphérique. Ainsi, patrons musculaires (donc configuration des forces) et cinématique seraient des entités distinctes (figure). À partir de là, il sera amené à réfléchir au rôle réciproque de la commande centrale et des réflexes dans le contrôle du mouvement, et s'appuiera sur l'œuvre de Sir Charles Sherrington (1857-1952), prix Nobel de Médecine et Physiologie (1932) pour ses travaux sur le Système Nerveux. Il en viendra progressivement à développer le concept selon lequel les mouvements ne devraient pas être considérés comme « des chaînes de détails, mais comme des structures qui sont différenciées dans les détails ».

Pour conclure, la vie de Nikolaj Alexandrovitch Bernstein illumine l'étude du mouvement, à l'instar de celle de J.A. Borelli ou de J.E. Marey. Le rayonnement de ses idées, d'abord limité à un cercle restreint d'amis et collaborateurs, est aujourd'hui international. Avec lui s'ouvre l'ère de la Biomécanique « cognitive », consacrée particulièrement à la compréhension des processus de contrôle du mouvement. Il a œuvré en faveur d'une approche transdisciplinaire, associant Mécanique, Cybernétique, Physiologie et Sciences cognitives, contrairement à la

ségrégation entre sciences ignorantes les unes des autres. Une approche transdisciplinaire, encore plus justifiée aujourd'hui.

Simon Bouisset

Professeur émérite

Université Paris-Sud/Orsay

simon.bouisset@u-psud.fr

Lettre SB - décembre 2010

Repères bibliographiques:

- BERNSTEIN, N. - The coordination and regulation of movements (traduction d'un ouvrage de 1935). Pergamon Press, Oxford, 1967.
- JANSONS, H. (1992) Bernstein: the microscopy of movement. ISB series, Promograph pub. Roma, vol I (Cappozo A. Marchetti M. and Tosi V. ed.), 137-174.
- MEIJER, O.G., WAGENAAR R.C. Bernstein's rejection of Braune and Fisher, Motor Control, 1999, 2, 95-100.



*Bernstein dans son laboratoire vers 1925
In Biolocomotion: a century of research
using moving pictures - Cappozo,
Marchetti & Tosi - Promograph - 1992*



Georges Demeny par Nadar

Chapitre 4 :
G e o r g e s
DEMENY

Georges DEMENY (1850 -1917)
«LA BIOMÉCANIQUE DU SPORT À
SES DÉBUTS»

Une bonne compréhension de l'œuvre de Marey nécessite qu'un regard soit porté sur le rôle joué par son meilleur collaborateur, Georges Demeny (1850 -1917). Demeny reste un chercheur mal connu des physiologistes et des biomécaniciens, malgré tout le travail réalisé à la Station physiologique du Parc des Princes. Autant le parcours de Marey peut être qualifié de linéaire, autant celui de Demeny apparaît sinueux. Demeny venait d'un milieu totalement étranger à celui qui sera son maître pendant une quinzaine d'années et, passées celles-ci, il s'est dirigé vers des horizons sortant de la recherche universitaire.

Georges Demeny est né à Douai en 1850 dans une famille d'origine hongroise. Son père, professeur de musique, l'initie assez tôt à la pratique du violon. En 1870, le jeune Georges n'est qu'un simple membre d'un Cercle de gymnastique, tel qu'il en existe de nombreux dans le pays. Rien ne le prédispose à devenir physiologiste. Candidat

malheureux au concours de l'Ecole Centrale, ayant suivi quelques enseignements de mathématique et anthropologie, il débarque à Paris en 1876. Il devient progressivement un très bon gymnaste qui connaît tous les aspects de l'activité physique: course, saut (longueur, perche), travail aux agrès. Il connaît les effets de la pratique de ces activités sur la force musculaire et le perfectionnement du mouvement.

Très bon observateur des élites sportives, Demeny se pose des questions sur la biomécanique du mouvement; il critique les méthodes en cours d'enseignement de la gymnastique, considère que celle-ci devrait être obligatoire dans les écoles (vœu exaucé en 1880). La même année, il est l'un des créateurs du Cercle de Gymnastique Rationnelle, organisme qui se développera dans les années suivantes délivrera des enseignements et éditera un Bulletin.

Demeny préconise la création d'institutions privées pour le développement de l'éducation physique. Il est en phase avec les autorités civiles déjà engagées dans les programmes de gymnastique militaire. La gymnastique est

devenue un facteur de développement physique et mental de la population. Paul Bert, physiologiste et homme politique avisé, en est conscient, et incite DemenÏ à prendre contact avec son collègue Marey. Fin 1880, DemenÏ rencontre Marey, dont il a entendu parler. Marey, professeur au Collège de France, décèle en lui une personne de bonne volonté, dépourvue d'une bonne formation scientifique initiale mais très désireuse d'apprendre et connaissant bien les milieux de l'éducation physique. DemenÏ survient à point, alors que Marey, à l'étroit dans ses locaux du Collège de France, caresse le projet de créer, à l'écart de celui-ci, une « Station Physiologique » spacieuse, qui lui permettrait d'expérimenter sur l'homme. Un aide lui serait nécessaire sur le terrain. De plus, son administration n'ayant pas accepté de financer son projet, Marey pense se retourner vers le Conseil municipal de Paris, très sensible au développement des activités gymniques. C'est ce dernier qui financera la création de cette « Station ». Le profil de DemenÏ convient donc à Marey, qui le prend comme aide, sans attendre de pouvoir le rémunérer. DemenÏ sera rapidement nommé préparateur, puis chef de laboratoire (1882).

Les rapports qui vont s'établir entre Marey et DemenÏ, autodidacte non diplômé, sont ambigus. La relation entre les deux hommes est d'abord de maître à élève, mais aussi de père à fils, puis de directeur de laboratoire à homme de confiance. Les mauvaises langues diront plus tard (en raison de divergences): de tyran à esclave. Marey est absent de Paris de 4 à 5 mois dans

l'année, retiré chaque été dans la villa qu'il a achetée dans les faubourgs de Naples (où il a monté un petit laboratoire), ou dans ses vignes du Beaujolais.

Le rôle de DemenÏ va devenir de plus en plus important. Il se trouve chargé de démarches administratives, du suivi de dossiers, de la surveillance de la construction de la « Station »; il doit en permanence expédier à son maître du matériel expérimental, des documents photographiques ou des dessins pour illustrer ses cours à venir ou les ouvrages qu'il est en train de rédiger. Ainsi, DemenÏ, collaborateur fidèle, est devenu une partie de l'année celui qui fait « à la place » de l'absent, son homme à tout faire, comme en témoignent les lettres (400) reçues de Marey de 1880 à 1894. Marey apparaît comme dominateur et exigeant dans sa correspondance (« Veuillez... »). DemenÏ, vieux garçon, hostile au mariage, fait corps avec la « Station » au point de venir y loger, dans l'un des chalets qui y ont été construits. À diverses reprises pendant cette période, Marey restera attentif à ce que DemenÏ n'oublie pas de poursuivre les expérimentations menées suivant ses propres idées, et de rechercher les moyens de trouver un statut social décent.

DemenÏ avait vu dans la collaboration qui s'institue avec Marey l'occasion de mieux comprendre l'homme en mouvement et de participer à la mise au point de techniques de mesure. Dans la construction d'appareils photo, DemenÏ fait figure de technicien réalisant les idées projetées par son maître. Dans le travail d'équipe, ce qui revient à chacun est parfois difficile à estimer. Les différences d'appréciation de l'un et l'autre,

la paternité sur tel ou tel sujet, seront à partir de 1886 à l'origine de tiraillements, conduisant à une regrettable séparation (1894) qui ternira les jugements de Marey sur son collaborateur: esprit vif, inventif, entreprenant, excellent mathématicien, habile dessinateur, précis et concis dans ses exposés.

DemenÏ a pu expérimenter, avec son maître ou seul, en utilisant des appareils déjà en service, dont certains ont été améliorés par lui ou de son invention (éventuellement brevetés) : chronophotographe à plaque fixe ou mobile, phonoscope permettant prises de vues et projection d'images à partir d'un film transparent, dynamographe (plateforme de forces). La contribution de DemenÏ dans l'étude de la marche est évidente, en dehors de sa contribution à l'installation de la grande piste circulaire de la Station et de l'ensemble des dispositifs de prise de vues.

Ce qui préoccupe DemenÏ dans la locomotion, ce sont les rapports entre les caractéristiques du pas et la réaction du sol qui le détermine. La chaussure dynamométrique lui donne les temps de contact du pied avec le

sol (pointe et talon). Les vues successives de la position des membres et du corps, objectivés par des repères, sont mises en relations avec les mesures de forces de réaction, ce qui conduit à la connaissance cinétique et cinématique du mouvement. DemenÏ compare les caractéristiques de diverses modes de progression: marche normale, en flexion, pas de charge, pas cadencé. Il s'intéresse au rôle des muscles antagonistes et à l'effet de l'élasticité musculaire. Abordant le calcul du travail produit au cours de la marche, il l'estime par produit de l'élévation du centre de gravité

par la distance parcourue, c'est-à-dire par le seul travail des forces extérieures. Néanmoins, il montre qu'à partir d'une certaine vitesse la course devient moins coûteuse que la marche, ce qui sera confirmé plus tard par des mesures de la dépense énergétique. Dans les études sur le saut, il met en évidence les effets sur les forces de réaction du mouvement des bras.

Il vient un moment où Marey, agacé par les manifestations d'indépendance de son collaborateur, souhaite trouver un aide plus jeune, plus malléable.

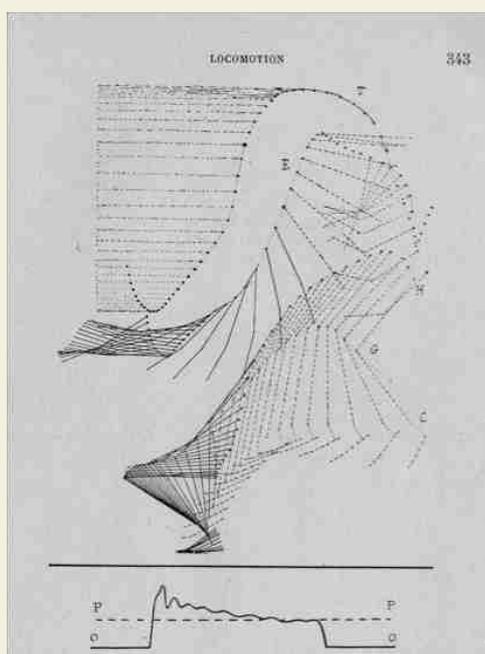


Diagramme d'une chute élastique sur la pointe des pieds. En haut : enregistrement chronophotographique. En bas : forces de réaction du sol selon l'axe vertical (plateforme de force). (Mécanismes et éducation des mouvements, 1903)

Il pense que DemenÏ, ayant acquis une certaine compétence devrait prendre son essor et poursuivre ses recherches suivant ses désirs. La séparation a lieu en 1894. DemenÏ quitte la Station (en passe de devenir l'Institut Marey) pour s'installer avec son matériel à Levallois-Perret. Son intention est d'appliquer aux sportifs, avec lesquels il garde le contact, les techniques avec lesquelles il s'est familiarisé. Les objectifs de la Gymnastique rationnelle sont toujours les mêmes : l'activité physique est bonne pour la santé, elle développe en plus la beauté du corps, elle est susceptible d'améliorer la qualité du mouvement, et par là en diminue le coût, elle développe le sens moral de l'individu.

DemenÏ a donc développé une véritable physiologie de l'effort, exposée dans Les bases scientifiques de l'éducation physique (1902) et Mécanismes et éducation des mouvements (1903), dont l'intérêt déborde l'éducation physique, pour intéresser aussi la pathologie locomotrice et la médecine du travail, et ce qui sera plus tard l'ergonomie.

Hugues MONOD

Professeur émérite de Physiologie
Université Pierre et Marie Curie

Lettre SB - 2011



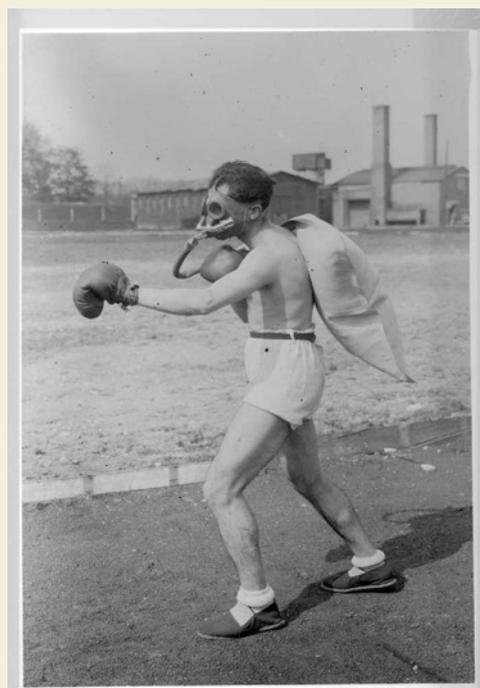
Bibliographie:

DEMENÏ, G. : Les bases Scientifiques de l'Education Physiques, Alcan, 1902.

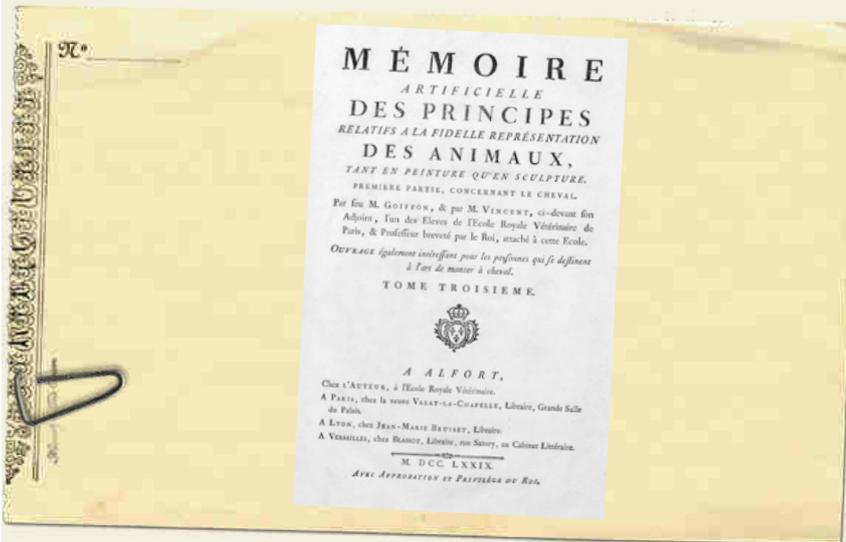
DEMENÏ, G. : Mécanisme et éducation des Mouvements, Alcan 1903 (réimpression :  dition Revue EPS, 1993).

LEFEBVRE, T., MALTHETE, J., MANNONI L. : Lettres d'Etienne-Jules Marey   Georges DemenÏ (AFRHC, Bibliothèque du film, 1999).

POCCIELO, C. : La Science en Mouvements – Etienne Marey et Georges DemenÏ (PUF, 1999).



Photos G. DemenÏ - <http://blog.artfx.fr/2014/02/24/expo-photo-le-geste-sportif-composé/>



Chapitre 5 : Etude de la locomotion du cheval à l'instigation des artistes animaliers

L'ÉTUDE DE LA LOCOMOTION DU CHEVAL, À L'INSTIGATION DES ARTISTES ANIMALIERS

Etienne-Jules Marey (1830-1904) a souvent cité dans ses travaux les noms de personnes aujourd'hui assez peu connues des biomécaniciens, des artistes qui poursuivaient une quête qui nous est devenue bien étrangère, celle de la fidèle représentation des animaux. A l'époque où la photographie n'existait pas encore (c'est-à-dire jusqu'au début de XIX^{ème} siècle), représenter un cheval sur un tableau ou dans une sculpture était un exercice aussi compliqué que fréquent, car le cheval était l'animal noble par excellence, et l'accessoire indispensable de la démonstration de la puissance princière. L'artiste du XVIII^e siècle qui devait se livrer à cet exercice devait relever trois défis : respecter les proportions de l'animal, en reproduire la conformation exacte, avec les reliefs liés aux formations anatomiques sous-jacentes, et surtout figurer le cheval dans une attitude la plus vraisemblable possible, ce qui était un casse-tête insoluble.

Une anecdote révèle l'impossibilité de représenter les chevaux en mouvement, même aux allures lentes ; un peintre de chevaux aussi avisé qu'Horace Vernet (1789-1863), grand ami de Théodore Géricault, recevait dans son atelier, en compagnie d'Émile Duhouset, officier de cavalerie lié à de nombreux artistes, la visite d'un amateur. Pour l'impressionner, il lui montre des croquis de chevaux ruant et se cabrant. Une fois le visiteur sorti, il se tourne vers Duhouset : « *J'ai fait mon métier*, lui dit-il en roulant sa cigarette, *mais je me suis bien gardé de faire rentrer d'un pas tranquille tous ces animaux que je venais de lancer à fond de train pour le satisfaire ; il aurait peut-être saisi l'hésitation que j'éprouve devant la simplicité d'une allure calme, mon œil s'y perd*¹. »

Alors les artistes usaient d'une sorte de convention dans laquelle le cheval était positionné dans quelques attitudes types : une sorte de cabrade, un galop volant ou un trot très relevé. La conformation de l'animal également était irréaliste avec des formes globuleuses ou des têtes très petites, comme les montrent les

¹ Duhouset, 1874, p. 11.

tableaux des chasses de Louis XV par Oudry. L'incapacité de représenter correctement le cheval avait conduit à définir un standard académique, faux mais accepté ; tout comme le lion devait avoir un visage rond, le cheval en mouvement devait être juché sur ses postérieurs, les antérieurs tendus vers l'avant.

Le développement de la médecine vétérinaire à partir des années 1760 allait fournir un corpus de données morphologiques et anatomiques qui allaient révolutionner le style de la peinture impliquant le cheval. Claude Bourgelat (1712-1779), écuyer, commissaire général des haras du royaume et créateur des deux premières écoles vétérinaires, Lyon en 1762 et Paris en 1765, avait bien compris l'intérêt que présentaient pour les artistes ces nouvelles institutions et il créa à Alfort, dès 1768, un cours gratuit d'anatomie artistique² qui leur était spécialement destiné. Il en chargea Georges-Claude Goiffon (1709-1776), un ingénieur, mécanicien, architecte et dessinateur, qui fut rejoint ensuite par le jeune Antoine-François Vincent (1743-1789), un peintre d'histoire et excellent graveur, dès 1768³. Leurs démonstrations de dissection eurent un grand succès ; peintres et sculpteurs se

pressèrent aux séances. En 1779, Vincent devenait professeur de dessin à Alfort et publiait leurs travaux⁴ sous le titre de *La Mémoire artificielle des principes relatifs à la fidelle représentation des animaux, tant en peinture qu'en sculpture. Première partie*

concernant le cheval. Le traité aborde, outre les proportions et la conformation du cheval, le détail des principales allures, ceci afin de donner aux artistes tous les principes d'une représentation exacte de l'animal en mouvement (Figure 1). La chose existait déjà pour l'homme mais elle était considérablement simplifiée par la



Figure 1 : Cheval au galop. Cette figure montre les muscles sous-jacents à la peau. Ceux-ci ont souvent été figurés dans les représentations de chevaux au XIXe siècle, car ils donnent à l'animal un aspect plus racé que les arrondis traditionnellement utilisés (Goiffon et Vincent, 1779).

représentation essentiellement statique que l'on en faisait alors. Cet ouvrage eut un succès retentissant et Vincent fut encouragé dans son enseignement de l'anatomie pour les artistes.

A partir de septembre 1780, son cours était dispensé le dimanche, avec un succès toujours

² Ce cours était intitulé « Ecole de principes sur la parfaite représentation des animaux, relativement à la peinture et à la sculpture ». In Railliet et Moulé, 1908, p.277.

³ Railliet et Moulé, 1908, p.278.

⁴ Goiffon était mort en 1776 mais Vincent associa son nom au sien lors de la publication.

croissant, si bien que des tentatives furent menées pour lui faire quitter Alfort et le déplacer à Paris. En 1787 était créée une *chaire de proportions*, qui disparut l'année suivante du fait de la crise budgétaire que traversait le royaume⁵.

C'est la troisième partie de *La Mémoire artificielle* qui traite du mouvement du cheval et de l'enchaînement harmonique du placement des membres aux différentes allures. Pour décomposer les allures, Goiffon et Vincent eurent l'idée d'équiper les pieds des chevaux de fers de quatre formes différentes, de relever à l'ouïe les battues des sabots puis de les confronter aux traces au sol de manière à créer une sorte de portée musicale, dite *échelle odochronométrique*, représentant la succession des « posés » de pieds et les durées d'appui. Plus spectaculaires encore, ce que nous appelons aujourd'hui des kinogrammes (Figure 2) figurait sous forme de diagrammes la succession des positions d'un membre au cours d'une foulée, annonçant les travaux d'Etienne-Jules Marey (1830-1904) au siècle suivant.

Il est d'ailleurs amusant, en étudiant le tracé du trot, de constater qu'ils avaient déjà répondu par l'observation et la logique à la grande question qui allait conduire Eadweard Muybridge à engager ses travaux photographiques, celle de l'existence d'une phase de suspension au trot. Le trot étant une allure symétrique par posés successifs de bipèdes diagonaux, le fait que la trace du sabot postérieur recouvre celle du sabot antérieur ipsilatéral implique que ce sabot antérieur avait quitté le sol alors que le postérieur était encore en l'air, et donc

l'existence de cette suspension, chose que Marey soulignait dès 1873⁶.

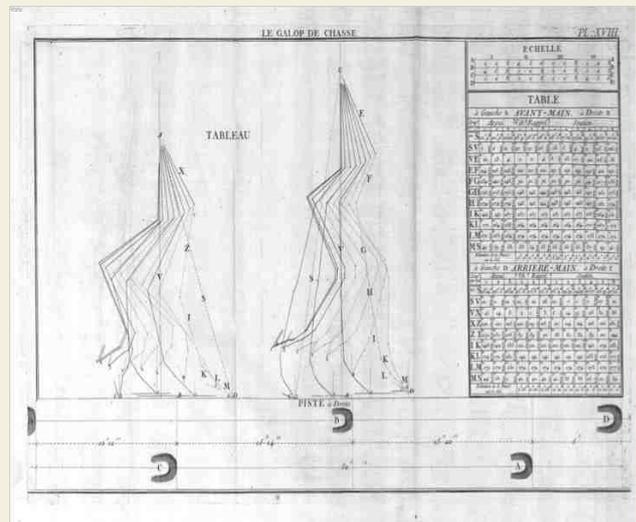


Figure 2 : Kinogramme. Cette figure, d'une étude très complexe, représente le fonctionnement du bipède latéral droit lors du galop. Cette allure étant asymétrique, une autre planche figurait le bipède latéral gauche. La figure est formée de quatre éléments : les pistes, le tableau, l'échelle et la table. En bas, sont figurées les pistes du cheval, avec la marque de chaque appui au sol. Les distances sont indiquées dans une échelle non absolue, proportionnelle à la taille même de chaque animal ; elles sont donc notées en secondes (") et en tierces ("). Au dessus, le tableau représente les positions successives des membres thoraciques et pelviens, avec comme convention que les points fixes choisis sont la hanche pour le postérieur et le sommet de l'omoplate pour l'antérieur. L'échelle figurée en haut à droite indique quant à elle les phases d'appui et de suspension de chaque membre ; le trait est plein lorsque le sabot est à l'appui. À droite, la table fournit des indications sur les angles entre les segments de membre à chacune des phases de la foulée (Goiffon et Vincent, 1779).

⁵ Railliet et Moulé, 1908, p.279.

⁶ Marey, 1873, p. 151.

Malgré toutes les imperfections liées à l'absence de moyens de mesure objective, Goiffon et Vincent furent les premiers à offrir des solutions aux problèmes qui préoccupaient les artistes du XIX^e siècle, ces peintres et sculpteurs de milliers de chevaux piaffant ou se cabrant dans les portraits équestres, les scènes de chasse et les scènes de batailles particulièrement à l'honneur sous l'Empire.

D'autres artistes firent de même par la suite. Etienne Meissonier tout particulièrement se passionna pour le sujet ; le peintre passait ainsi des heures à voir courir les chevaux au champ de manœuvres de Saint-Germain-en-Laye, et il était allé jusqu'à installer dans sa propriété de Poissy une sorte de petit chemin de fer disposé le long d'une piste de course ; monté sur un chariot, il pouvait ainsi accompagner le déplacement du cheval et en saisir tous les détails.

Paradoxalement, les artistes du XIX^e siècle auraient pu profiter de la décomposition du mouvement opérée par la photographie, mais ils peinèrent généralement à accepter des attitudes trop éloignées de l'idée qu'ils se faisaient des allures. Ainsi Meissonier, pourtant un des plus convaincus, écrivait : « Pour l'artiste, il n'y a qu'une catégorie de mouvements, ceux que son œil peut saisir. Il n'a pas plus le droit de mettre sur une toile ce qui est visible à l'aide du seul objectif que d'y peindre ce que lui montrerait le microscope.⁷ »

Rares furent ceux qui intégrèrent la chose dans leur Art ; la photographie était en fait une fausse amie : elle leur apportait une nouvelle vérité en même temps que, rendant

cet Art figuratif moins nécessaire, elle annonçait le déclin de leur profession.

Christophe DEGUEURCE

Conservateur du musée Fragonard /
Professeur d'Anatomie
École Nationale Vétérinaire d'Alfort
cdegueurce@vet-alfort.fr

Ce texte est un résumé d'un chapitre de l'ouvrage Beautés intérieures de Christophe Degueurce et Hélène Delalex, publié en 2010 par les éditions de la Réunion des Musées Nationaux.

Rapport annuel SB - 2011-2012



Modèle en plâtre de cheval, complet, réalisé par Vincent en 1780 illustrant les trois canons de la fidèle représentation du cheval: proportions, modelé des formes et mouvement harmonieux des membres.

⁷ Larroumet, op.cit, p. 214



*Guillaume Benjamin Duchenne de
Boulogne - médecin photographe*

Chapitre 6 : **G u i l l a u m e** **DUCHENNE de** **BOULOGNE**

Guillaume DUCHENNE DE BOULOGNE (1806-1875)

«DE LA STIMULATION MUSCULAIRE AU CONCEPT DE SYNERGIE»

En utilisant différents stimulateurs mis au point par le courant galvanique ou par le courant faradique, Guillaume Duchenne de Boulogne (1806-1875) a été un des premiers scientifiques au milieu du 19^e siècle à analyser aussi précisément l'organisation musculaire et nerveuse humaine. Ainsi grâce à lui, la stimulation électrique musculaire a été utilisée dans le domaine du diagnostic et de la thérapeutique. Elle a permis d'identifier scientifiquement un certain nombre d'affections neurologiques comme la maladie de Duchenne, caractérisée par une atrophie musculaire progressive d'origine génétique. Mais c'est surtout l'originalité et la rigueur de sa pensée scientifique ainsi que son association ultérieure avec Jean Martin Charcot (1825-1893) à la Salpêtrière qui lui a permis de se situer autant comme Physiologiste que comme Neurologue. Il a introduit dans le domaine physiologique le

concept de synergie musculaire ou de coordination motrice, qui montre que certaines fonctions ne peuvent être assurées que par la contraction simultanée et/ou séquentielle d'un certain nombre de muscles dans le mouvement volontaire, la posture et la locomotion. Il a aussi été parmi les premiers à proposer que ces synergies soient le résultat d'une organisation préexistante au niveau de certains centres nerveux de la moelle et du tronc cérébral. Ses idées ont été reprises par Charcot, qui a considéré Duchenne comme son maître, et par la suite par Babinski, notamment dans sa description de l'« asynergie cérébelleuse », traçant ainsi une école de pensée qui a traversé trois générations de Neurologues.

Biographie

Guillaume Duchenne est né en 1806 à Boulogne sur mer d'une famille de marins. Son père était un des corsaires qui naviguait vers les colonies, le long des côtes américaines à la fin du 18^e et au début du 19^e siècle pendant l'époque napoléonienne. Docteur en médecine en 1831, il exerce à Brest comme praticien et commence à s'intéresser à

l'«électrisation localisée», utilisant une bobine à induction pour produire un courant faradique et stimuler différents muscles chez l'Homme. En 1842, il va à Paris avec son appareil de stimulation faradique, proposer ses services à différents hôpitaux parisiens, où il procède à l'analyse de l'effet de la stimulation musculaire. Introduit à la Salpêtrière dans le service de Charcot, il sera considéré comme un Maître (Clarac et al, 2009).

Duchenne de Boulogne en réalisant avec son appareil d'induction et ses deux « rhéophores humides» (électrodes) la stimulation des muscles chez les patients va avoir une approche unique de l'anatomie fonctionnelle des muscles squelettiques in vivo. Il établit une carte des points moteurs des différents muscles, dont la stimulation provoque la contraction avec le seuil le plus bas. Il identifie ainsi et clarifie l'action de nombreux muscles individuels. L'inventaire des fonctions articulaires des muscles qu'il a ainsi dressé (Duchenne, 1867) reste encore aujourd'hui une référence.

Il s'est vite convaincu que les mouvements sont le résultat de l'action de groupes musculaires agissant en synergies. « La galvanisation musculaire est amenée à établir d'une manière exacte les usages d'un grand nombre de muscles. On sait qu'il en est très peu qui peuvent se contracter sous l'influence de la volonté. La plupart au contraire ne font que concourir à des mouvements d'ensemble. » (Duchenne de Boulogne, 1855). Il était aussi connu pour sa description d'affections neurologiques dont la plus connue est la maladie de Duchenne,

caractérisée par une dégénérescence progressive des muscles, dont on connaît actuellement l'origine génétique. Il a été le premier à recourir à des



Duchenne de Boulogne - plaque située à l'Institut de Myologie, Paris - <http://baillement.com/lettres/duchenne/duchenne.html>

prélèvements biopsiques dans le muscle vivant pour recourir à l'examen microscopique du tissu musculaire. La réputation de Duchenne de Boulogne dans le domaine de la stimulation musculaire et de la Neurologie a largement dépassé les

frontières de la France. Il a été nommé membre de Sociétés savantes étrangères, et appelé en consultation auprès de personnalités internationales de haut rang. Il est décédé en Septembre 1875, veillé jusqu'à sa fin par Charcot qui est resté plusieurs jours et nuits à ses côtés.

Conceptions de Duchenne sur les synergies musculaires

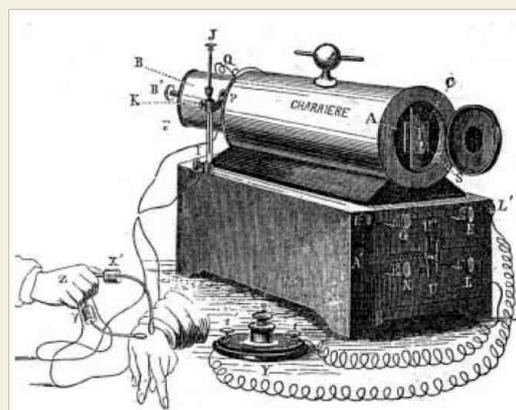
Duchenne dans son traité de 1867 reprend la classification des muscles de Jacob Winslow (1669-1760) en décrivant les muscles impulsifs ou principaux moteurs qui effectuent le mouvement, les muscles modérateurs, qui s'opposent au même mouvement, et enfin les muscles directeurs, ou collatéraux qui assurent la direction du mouvement, notamment en présence d'enarthroses, c'est-à-dire d'articulations en forme de rotule, comme celle de l'épaule. Duchenne estime que « la contraction isolée du muscle n'existe pas dans la nature (Duchenne, 1867)». Dès lors, il considère que

« tous ces mouvements des membres et du tronc résultent d'une double excitation nerveuse, en vertu de laquelle les deux ordres de muscles qui, par leur association, possèdent une action contraire...sont mis simultanément en contraction, les uns pour produire ces mouvements, les autres pour les modérer (Duchenne, 1867 p 766)». Certaines synergies sont particulièrement complexes. A titre d'exemple Duchenne cite l'extension complète de la main et des doigts. Il montre que cette extension n'est pas due seulement à l'action des muscles extenseurs des doigts, mais à une combinaison de contractions musculaires qui incluent les fléchisseurs des doigts (qui agissent sur la première phalange), les muscles interosseux (qui étendent la seconde et la troisième phalange, mais aussi fléchissent la première phalange) et les muscles palmaires qui empêchent la dorsiflexion du poignet due aux muscles extenseurs. (Duchenne, 1867 p 764). L'idée de synergies musculaires associant les muscles agonistes et antagonistes a eu du mal à être acceptée de son temps. Aujourd'hui, la plupart des neurophysiologistes moteurs acceptent l'idée que les deux formes de relations musculaires (innervation réciproque, co-contraction) peuvent être observées également en fonction du mouvement (voir Bouisset et Maton, 1995).

Transposant sa réflexion du mouvement simple aux mouvements pluri-articulaires, comme la station debout, Duchenne propose un mécanisme semblable. « Il existe une grande analogie entre les synergies musculaires mises en action lors de la station verticale et celles qui produisent les

mouvements volontaires des membres. En effet, dans la coordination des mouvements de la colonne vertébro-cranienne, qui préside à la station verticale, on doit considérer deux ordres de phénomènes principaux : 1° l'association musculaire qui produit son extension. 2° l'harmonie des muscles antagonistes, qui modère et assure cette extension et l'attitude normale du rachis» (Duchenne, 1867, p768).

C'est au mécanisme de la locomotion



Appareil de Duchenne de Boulogne, construit par Charrière. Deux réophores (électrodes), humidifiés et reliés à un appareil d'induction, et placés au contact du corps, permettent de stimuler les nerfs ou les muscles directement sur la peau. Musée d'histoire de la médecine, Paris

qu'il s'intéresse ensuite, avec ses deux phases d'appui et d'oscillation. Pour lui, une fonction aussi complexe et précise doit émerger avec la coopération d'une « faculté de coordination ». Dans la locomotion cette coordination était pour lui le meilleur exemple de l'organisation centrale qui met en action... «L'association des muscles agonistes et antagonistes » (Duchenne, 1867, p759). Il s'intéresse surtout à la phase d'oscillation de la marche, et maintient sur la base de ses observations cliniques, que cette

phase est due à la synergie des muscles fléchisseurs de la hanche, du genou et de la cheville. Il ne retient pas la vue exprimée par les frères Weber (1838) selon lesquels cette phase serait due au mouvement pendulaire passif de la jambe: « ce membre ne pourrait osciller dans la cavité cotyloïde s'il était dans l'extension ; c'est pourquoi ses trois segments (cuisse, jambe et pied) sont infléchis les uns sur les autres par la contraction des muscles qui opèrent chacun de ces mouvements et non par la seule action du membre oscillant considéré par la théorie de Mrs Weber comme un pendule composé de segments de longueur différente» (Duchenne, 1867, p 761).

Il croit à une organisation centrale du mouvement en songeant au cervelet dans la coordination motrice, puis au tronc cérébral : « On conçoit donc parfaitement que la lésion des cordons et des racines postérieures puisse troubler le fonctionnement de la coordination locomotrice; mais c'est plus haut qu'il faut aller rechercher la source de la force nerveuse locomotrice, le point du myélocéphale doué de la virtualité appelée faculté coordinatrice de la locomotion» (Duchenne 1867, p.791).

Conclusions

A partir d'une instrumentation très simple à stimulation faradique, et d'une observation attentive de l'organisation musculaire normale et pathologique, il a su construire une théorie des synergies et des coordinations musculaires, organisées centralement, qui a été bien trop oubliée et qu'il nous a paru nécessaire de rappeler. Les travaux de Bernstein (1967) ont fait apparaître ultérieurement une autre conception des synergies, de nature flexible, liées à

l'apprentissage et aux rétroactions sensorielles, pour tenir compte des contraintes biomécaniques et des forces extérieures.

François CLARAC

Directeur de Recherche émérite CNRS,
(francois.clarac@univ-amu.fr)

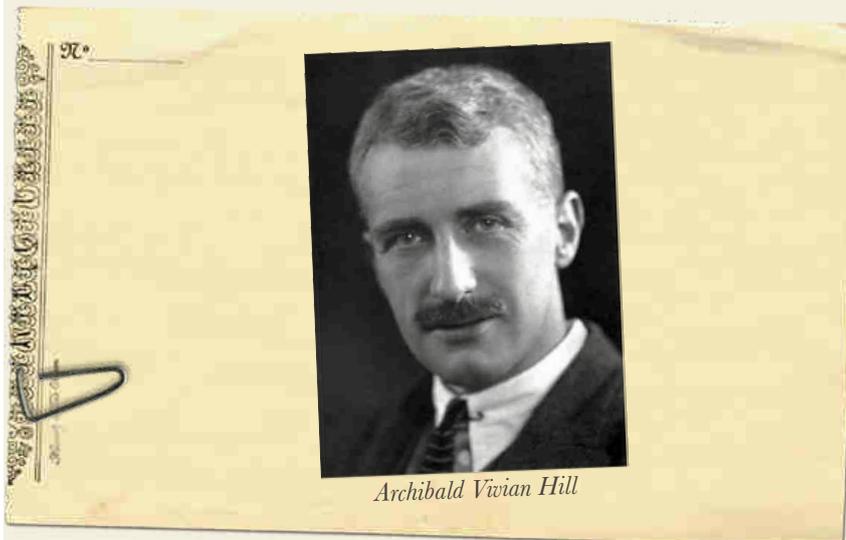
Jean MASSION

Directeur de Recherche émérite CNRS,
(jean.massion@wanadoo.fr)

Rapport annuel SB - 2012-2013

Références

- Bernstein, N.A., 1967 The Coordination and Regulation of Movements. Pergamon Press, N. Y.
- Bouisset, S. et Maton, B. 1995 Muscles, posture et mouvement. Hermann, Paris
- Clarac, F., Massion, J. and Smith, A.M. 2009 - Duchenne, Charcot and Babinski, three neurologists of La Salpêtrière Hospital, and their contribution of the central organization of motor synergy. Journal of Physiology, Paris, 103 : 361-376
- Duchenne de Boulogne, G., 1855. De l'électrisation localisée et de son application à la physiologie à la pathologie et à la thérapeutique. Baillière Paris. (2nd ed. 1861, 3rd ed. 1872)
- Duchenne de Boulogne, G., 1867. Physiologie des mouvements démontrée à l'aide de l'expérimentation électrique et de l'observation clinique et applicable à l'étude des paralysies et des déformations. Paris. Baillière. Républié en 1967 à Lille par la Société française de médecine physique.
- Weber, G., Weber, C., 1838. Mécanique de la locomotion chez l'homme. Encyclopédie Anatomique., traduction de l'Allemand par AJL Jourdan T II, livre III.



Archibald Vivian Hill

Chapitre 7 : **Archibald** **Vivian HILL**

Archibald Vivian HILL (1886-1977) **«ET LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES** **DU MUSCLE»**

Éléments de biographie

Né à Bristol, Archibald Vivian Hill y reçut une très solide formation secondaire scientifique et littéraire. Admis en mathématiques au Trinity College à Cambridge, il sortit premier de promotion. Il pratiquait aussi assidûment la course à pied dont il étudia la physiologie plus tard. Toute sa vie, il a appliqué des outils mathématiques à l'étude de systèmes physiologiques. Un exemple bien connu: dès 1910, il formula les équations dans lesquelles il définit le "coefficient de coopérativité", appelé maintenant "coefficient de Hill". L'autre exemple est l'équation caractéristique, ou "relation force-vitesse", proposée en 1938 et dont on parlera ci-dessous.

Au terme de ses études de mathématiques, il se tourna vers la Physiologie dans le laboratoire de John N. Langley à Cambridge, où il commença ses propres travaux expérimentaux sur la contraction musculaire.

En Allemagne durant l'hiver 1910-1911,

Hill s'initia à de nombreux aspects de l'étude expérimentale du muscle, ainsi qu'à l'utilisation du galvanomètre d'Arsonval qu'il allait mettre au service de la myothermie. En 1919, W. Hartree le rejoignit, et ensemble, ils portèrent la méthode myothermique à un niveau inégalé de performance.

Dès 1933, Hill participa à la création du Council for Assisting Refugee Scientists (CARS), dont la mission était d'aider les scientifiques allemands opposés au nazisme, dont de nombreux juifs, à échapper aux persécutions. Plus de 900 scientifiques purent ainsi être aidés, enrichissant le monde scientifique britannique et américain. Sept prix Nobel furent l'Allemagne et vingt réfugiés furent ultérieurement honorés du prix, dont Bernard Katz en 1969. Après l'interruption de la première guerre mondiale, Hill entama sa carrière parallèle d'enseignant en Physiologie. Après un intermède de trois ans comme professeur de Physiologie à Manchester, il fut nommé en 1924 à University College London à la succession prestigieuse d'Ernest H. Starling. Il y restera jusqu'à la fin de sa carrière.

Après les hostilités, Hill reçut de nombreuses distinctions honorifiques britanniques et américaines, dont la célèbre médaille Copley, la plus haute distinction attribuée par la Royal Society, pour des contributions remarquables à la science.

Théorie lactique, collaboration avec Otto Meyerhof et prix Nobel 1922

Au début du XXe siècle, le muscle était conçu comme un système protéique visco-élastique dont le brusque changement des propriétés physiques produisait la contraction. Il était admis que la première réaction chimique associée à la fourniture d'énergie pour la contraction était la production d'acide lactique; des protons mobilisés par la réaction neutraliseraient des charges négatives de surface des protéines, permettant leur repliement et le raccourcissement. En mesurant la cinétique de la production de chaleur par le muscle pendant et après la contraction, Hill renversa la théorie

lactique. La controverse à ce sujet lui avait donné l'occasion de confronter ses idées et d'allier ses travaux à ceux d'Otto Meyerhof, le célèbre biochimiste allemand.



A.V. HILL et O.F. Meyerhof (photo Pr N. Humphrey - <http://www.pdn.cam.ac.uk/centenary/100ah.shtml>)

Le prix Nobel leur fut attribué en 1922.

Relation force-vitesse et équation caractéristique

En 1938, Hill publia l'article devenu le plus célèbre avant 1960 en matière de physiologie musculaire et dont le retentissement dure toujours. Il y décrit, suite à des mesures simultanées de force et vitesse de raccourcissement de muscles, la relation considérée comme caractéristique du moteur musculaire activé: la "relation force-vitesse" :

$$(P + a) \cdot (V + b) = b (P_0 + a)$$

Elle décrit la relation entre P, la force mesurée, et V, la vitesse de raccourcissement entre les extrémités du muscle en contraction tétanique. Hill montra que les résultats des mesures étaient correctement décrits par une hyperbole rectangulaire tendant vers les asymptotes - a, une constante qui a la dimension d'une force, et -b, qui a la dimension d'une vitesse.

P_0 est la force isométrique maximale quand V est nul; déterminée par le nombre de cellules musculaires en parallèle (donc par la surface de section du muscle), P_0 est une mesure de l'épaisseur du muscle et donc de sa masse. La courbure de la relation dépend des paramètres a et b qui sont caractéristiques du muscle, plus ou moins lent ou rapide. L'équation permet de prédire correctement la puissance mécanique maximale du muscle.

Modèle à deux et à trois composants

En 1938, continuant son analyse du muscle en mouvement, A.V. Hill proposa un modèle qui eut une profonde influence sur la conception et l'interprétation de très nombreux résultats expérimentaux. Bien qu'on ait montré depuis qu'il devait être modifié, d'une part pour décrire le comportement de la fibre musculaire isolée, d'autre part pour le cas du muscle in situ rattaché à ses tendons, son influence persiste toujours et il n'est pas possible d'en faire abstraction.

L'essence du modèle peut être perçue en considérant l'évolution de la force dans un muscle en tétanos isométrique auquel on applique une brusque diminution très rapide de la longueur, appelée "quick release" par les auteurs anglais : la force chute très rapidement pendant le raccourcissement et retourne plus lentement à sa valeur d'origine après la fin du mouvement.

La figure 1 illustre en A l'enregistrement de la force dans le cas de deux raccourcissements instantanés de deux étendues différentes. Pour rendre compte de ce phénomène, Hill proposa qu'on pût concevoir le muscle activé comme fait de deux composants logiquement distincts, représentés en B dans la même figure : d'une part un ressort, appelé "composant élastique en série" (SEC), dont la longueur ne dépend

que de la force dans le muscle ; sans amortissement, ce ressort peut changer de longueur très rapidement et suivre le raccourcissement rapide ; d'autre part un composant contractile (CC), élément moteur proprement dit dans lequel se passe la transformation d'énergie chimique en travail mécanique ; il se raccourcit plus lentement et rattrape le mou dû à la décharge rapide du ressort ; la vitesse de raccourcissement du CC ne dépend que de la force selon la relation force-vitesse décrite plus haut. Pendant un raccourcissement suffisamment rapide, la longueur du CC ne change pas appréciablement et tout le changement de longueur se passe dans le SEC ; la force descend donc suivant la relation

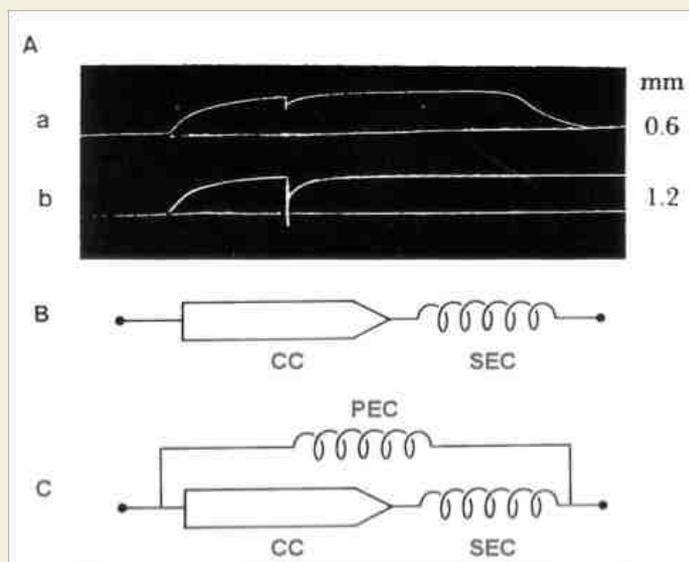


Figure 1

déformation-contrainte du ressort. Après la fin du raccourcissement, le CC se raccourcit, le SEC est ré-étendu et la force remonte à une vitesse qui dépend de celle du CC et de la raideur du SEC qu'il étire selon sa relation déformation-contrainte.

Le modèle est renforcé par de nombreuses observations dont la plus démonstrative est illustrée ci-contre : un muscle isolé est stimulé tétaniquement et la force apparaît progressivement (Figure 2 courbe a) ; cependant, si, juste après le début de la stimulation, le muscle est étiré très rapidement d'une petite longueur, la force atteint immédiatement sa valeur maximale (Figure 2 courbe b).

Au repos, le muscle entier oppose

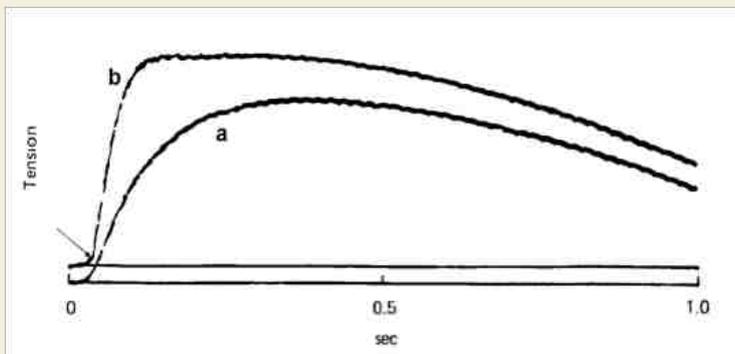


Figure 2

évidemment une force à l'étirement: il possède sa propre relation déformation-contrainte, dite passive. Tout indique qu'elle persiste, pour la plus grosse part, pendant la contraction. On la trouve, par exemple, dans le muscle rendu inexcitable par diverses méthodes. Elle joue un rôle majeur dans les mouvements in situ, en supportant une partie de la charge à déplacer. Pour en rendre compte, il y a donc lieu d'enrichir le modèle d'un autre "élément élastique en parallèle" avec le moteur et ses attaches (PEC), comme illustré en C dans la figure ci-dessus. Les deux éléments élastiques jouent un rôle essentiel dans les gestes de la vie courante : ils emmagasinent de l'énergie

potentielle élastique et peuvent la restituer intégralement pour effectuer du travail.

Il n'est pas superflu de noter que les modèles à deux et trois composants sont des représentations logiques de propriétés mécaniques. Ils ne font pas de supposition sur l'identité physique des composants. Deux points méritent d'être soulignés : en premier, le SEC et le CC peuvent très bien faire partie de la même structure physique, comme il a été confirmé après 1980 : la force est produite par des ponts entre actine et myosine, et dans la fibre musculaire isolée in vitro, la plus grande partie du SEC se trouve dans les ponts eux-mêmes ; en second, si les propriétés du PEC font typiquement penser à des structures comme la matrice extracellulaire, abondante dans les muscles, il est clair aujourd'hui qu'une partie est également présente dans des structures intra-cellulaires telles que la titine, l'actinine et

d'autres protéines.

Physiologie de l'exercice musculaire

De 1922 à 1924, Hill publia une série d'articles qui contribuèrent à introduire le concept de production anaérobie d'énergie pendant l'exercice, de restauration aérobie subséquente et de dette d'oxygène. Ces travaux démontrèrent également le concept de consommation maximale d'oxygène ($V.O_2max$). Les études de Hill portèrent aussi sur les facteurs déterminants la performance chez les athlètes. En application de la notion de dette d'oxygène, ces travaux conduisirent à la distinction entre puissance aérobie maximale, puissance anaérobie lactacide et puissance anaérobie

alactacide et leurs répercussions sur la performance dans diverses disciplines athlétiques.

En guise de conclusion

La liste des réalisations scientifiques A.V. Hill est longue. Elle inclut la spectaculaire amélioration de la méthode de mesure de la production de chaleur des organes isolés, qui donna naissance à la connaissance de la cinétique précise de la contraction musculaire, de la production de chaleur associée à l'influx nerveux, mais aussi à la mesure de la tension de vapeur en équilibre avec de minuscules volumes de liquide. Il faut citer l'analyse physique et chimique de l'influx nerveux, les lois de l'excitabilité des tissus animaux, les déterminants de la performance musculaire in vitro et chez les athlètes.

Son dynamisme et sa créativité ont fortement marqué ses élèves, dont une centaine ont rempli par la suite des fonctions importantes dans le monde entier. On en trouve la marque profonde dans son testament scientifique: "Trails and Trials in Physiology". Il y passe en revue, sans aucune concession, l'ensemble de sa production scientifique. L'homme tout entier est dans la dédicace: *"To my pupils, colleagues and teachers, with grateful and affectionate memories of what I have learned from them."*

Jean Lebacq

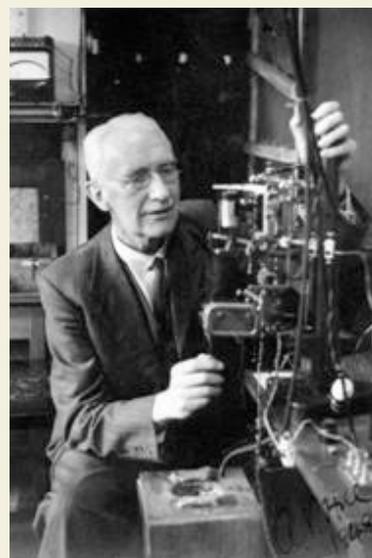
Professeur émérite à l'Université catholique de Louvain

jean.lebacq@uclouvain.be

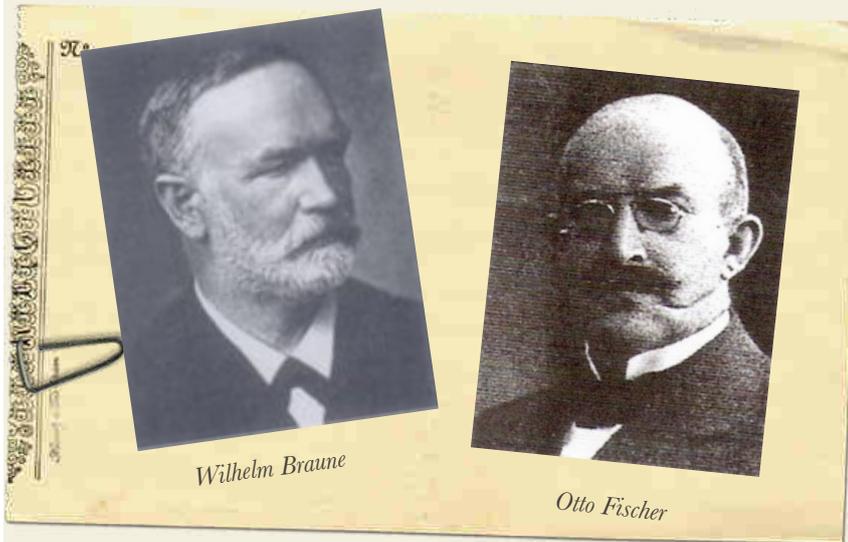
Rapport annuel SB - 2012-2013

Références emblématiques

- Hill, A.V. (1965). Trails and Trials in Physiology: A Bibliography, 1909–1964; with reviews of certain topics and methods and a reconnaissance for further research. London: Edward Arnold (Publishers) LTD.
- Hill, A.V. (1970). First and Last Experiments in Muscle Mechanics. Cambridge Univ. Press, London and New York.
- Katz, B. (1978). Archibald Vivian Hill. 26 September 1886–3 June 1977. Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society : 24: 71–149. Nobel biography: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1922/hillbio.html)
- Woledge, R.C., Curtin, N.A., and Homsher, E. (1985). Energetic Aspects of Muscle Contraction. Monographs of the Physiological Society. Academic Press.



A.V. HILL (photo Pr N.Humphrey-
<http://www.pdn.cam.ac.uk/centenary/100ah.shtml>)



Wilhelm Braune

Otto Fischer

Chapitre 8 :
Wilhelm BRAUNE
&
Otto FISCHER

Wilhelm BRAUNE (1830-1892) et
Otto FISCHER (1861-1917)
«LA MARCHÉ DE L'HOMME»

L'étude allemande *Der Gang des Menschen* (La marche de l'homme)² de l'anatomiste Wilhelm Braune (1830-1892) et du physicien Otto Fischer (1861-1917), dont la première partie est éditée en 1895, constitue un point culminant dans l'histoire des techniques de méthode graphique et de chronophotographie. En effet, à cette époque, personne n'est allé aussi loin que les deux Allemands dans l'étude tridimensionnelle de la marche humaine et des deux systèmes graphiques (graphe/photographie) rassemblés pour l'occasion.

En 1895, la méthode expérimentale de Braune et Fischer comporte cinq étapes :

1) La prise de vues est réalisée par quatre appareils photographiques qui se déclenchent synchroniquement et dont l'obturateur reste ouvert durant le temps du mouvement que l'on veut enregistrer. Deux appareils sont disposés perpendiculairement à la gauche et à la droite du sujet. Deux

autres appareils sont placés en face de lui, les lignes de visée de ces derniers étant décalées d'un angle de 30° de part et d'autre de l'axe de la marche du sujet, cela afin d'accéder aux trois dimensions de l'espace.

2) Le sujet – un homme qui marche à l'état normal, ou alourdi d'une charge – porte sur son corps onze signaux lumineux (des tubes électriques de Geissler) (Fig1.). Ces signaux clignotent, à la façon du moderne stroboscope, et s'inscrivent sur les plaques sensibles au fur et mesure que l'homme bouge. Le corps de celui-ci n'est pas enregistré photographiquement, étant donné qu'il est habillé de noir et qu'il évolue dans une pièce obscure.

3) Les clichés obtenus sont analysés au microscope et permettent d'établir des coordonnées spatiales qui indiquent notamment les « points milieux » des articulations. Les mesures et calculs effectués d'après les clichés donnent la position et la trajectoire des mouvements du tronc, des oscillations des hanches, des épaules, du torse, de la tête et les relations qui existent entre ces divers mouvements.

4) Des graphiques extrêmement détaillés, représentant la marche de l'homme, sont obtenus d'après les mesures, les calculs et les photographies (en relevant uniquement la trace des points et lignes lumineux laissés sur la plaque sensible par l'homme en marche).

5) Enfin, des figures schématiques (dits « modèles spatiaux ») sont construites en trois dimensions pour réaliser la synthèse de toutes les mesures effectuées.

Il s'agit, grâce à cette méthode, de vérifier certaines théories déjà existantes sur la marche de l'homme. Par exemple celle des frères Weber, qui affirmaient en 1836 que durant la marche les jambes oscillent sur le tronc comme un pendule, sans presque aucune participation des muscles. Braune et Fischer sont également à la recherche du centre de gravité du corps, sujet traité par Borelli dans son *De Motu Animalium* au XVII^e siècle, de même que le moment d'inertie du corps dans ses différentes parties. Il s'agit enfin, en étudiant la marche de l'homme, chargé ou non d'un sac à dos, de rendre service à l'armée allemande, comme E.-J. Marey l'avait fait précédemment pour l'armée française, en vain d'ailleurs, puisque le gouvernement n'avait guère suivi ses conseils.

Précisons en quelques mots la technique originale déployée par Braune et Fischer à Leipzig pour photographier la marche de l'homme. Le sujet, habillé d'un maillot noir, est couvert des pieds à la tête de onze fins et longs tubes Geissler en verre remplis d'azote sous faible pression, reliés entre eux et alimentés par le courant électrique

provenant d'une bobine de Ruhmkorff : un tube pour la tête, un pour chaque cuisses, les jambes, les pieds, le haut du bras et les avant-bras. Lorsque l'électricité parvient aux contacts des tubes, ceux-ci s'allument, comme les néons d'aujourd'hui. Un dispositif interrupteur permet d'allumer et d'éteindre les tubes à la fréquence et vitesse que l'on désire.

Braune et Fischer appliquent sur leurs tubes Geissler des marques au vernis noir, représentant le centre des articulations et le centre de gravité supposé des différentes parties du corps. Cette détermination du centre de gravité du corps a été effectuée précédemment par Braune et Fischer sur des cadavres humains congelés, puis pendus sur trois axes et dans différentes positions.

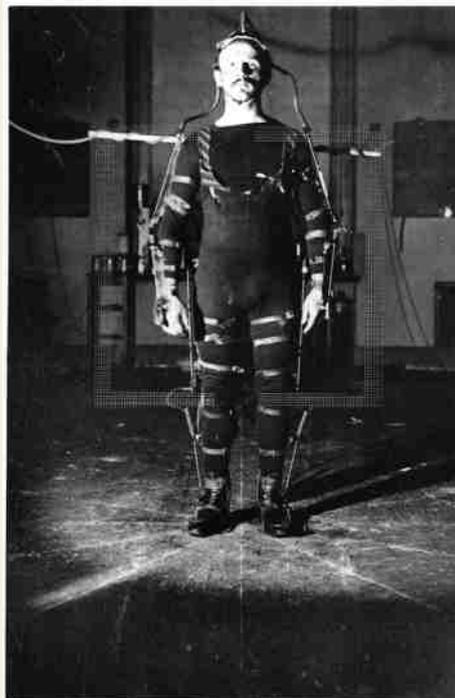


Fig.1 Sujet équipé avec les tubes de Geissler (*Der Gang des Menschen*, 1895)

Braune et Fischer utilisent quatre appareils photographiques à plaques de verre disposés autour de l'homme en marche, à une hauteur de 0,90 m du sol. Si l'on suppose que le sujet évolue en ligne droite, deux appareils sont disposés perpendiculairement à sa gauche et à sa droite, et deux autres en face de lui, mais décalés à la gauche et à la droite du sujet. Les deux appareils de gauche donnent ainsi deux projections centrales pour les points du côté gauche du corps, et les appareils de droite ceux du côté droit. Les axes optiques des quatre appareils convergent vers un même point placé au milieu de l'axe de la marche.

Après chaque prise de vues, on installe au point milieu de l'axe de marche, en face de l'un des quatre appareils photographiques, une « table de coordonnées » verticale de 1m², tableau de verre sur lequel se trouve un réseau quadrillé. L'un des quatre appareils photographiques concernés est de nouveau ouvert, et l'on superpose sur la plaque sensible déjà impressionnée par l'image de l'homme en marche, l'image de la table des coordonnées, celle-ci ayant été éclairée par une lampe au magnésium. Ce procédé est répété jusqu'à ce que ce réseau de coordonnées ait été inscrit sur chaque plaque des quatre appareils. Ce réseau ligné superposé sur la plaque de verre reste apparent sur chaque photographie, servant donc de mire et d'échelle de mesure.

Le sujet doit passer devant les quatre caméras avec un pas normal, à une vitesse de 5,6 km/heure. Il parcourt un chemin de 9 mètres de long. Pour être sûr qu'il effectue

un pas normal situé dans la moyenne, Fischer prendra le soin de mesurer la marche d'un grand nombre de soldats et d'étudiants de Leipzig.

Espérant contrer toute critique, Braune et Fischer prennent encore le soin d'examiner ensuite, au microscope, chaque négatif impressionné. Le grossissement du microscope utilisé leur permet d'obtenir une résolution de l'ordre du micromètre. A l'aide de ce microscope, les deux Allemands ont relevé 6696 mesures. En les rassemblant toutes, en dessinant ensuite un « squelette » graphique complet de l'homme en marche, ou en isolant des détails afin d'amplifier les courbes des « points milieux » des articulations, du sommet de la tête, du genou et de la pointe du pied, Braune et Fischer réalisent les graphiques les plus complexes et les plus détaillés de leur époque.

Enfin, Braune et Fischer proposent de magnifiques « modèles spatiaux » pour illustrer leur synthèse (Fig. 2).

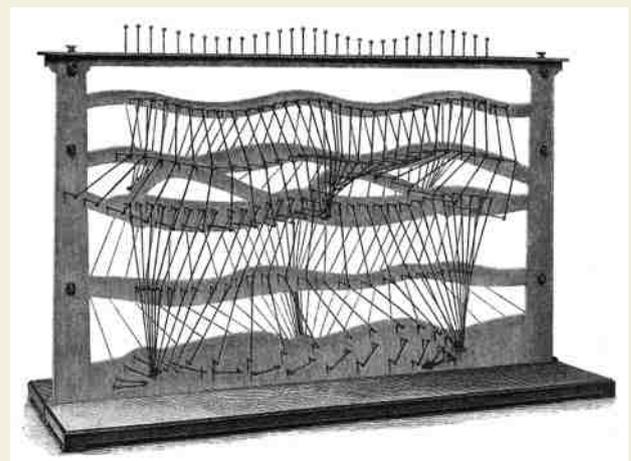


Fig.2 Modèle « spatial » de la marche (*Der Gang des Menschen*, 1895).

Ce sont en fait des sculptures géométriques tridimensionnelles, en métal, destinées à restituer en volume le schéma de la marche de l'homme. Ils en ont produit au moins quatre versions – deux en fils de soie servant de maquettes de préfiguration, puis deux en tiges métalliques. Ces sculptures étonnantes ont-elles influencé Marcel Duchamp, le célèbre peintre du Nu descendant un escalier (1912)? L'une des très rares sculptures conservées (un petit modèle en fil de soie provenant du musée des sciences de Turin) est en tout cas exposée au Centre Pompidou, à l'occasion de la grande exposition consacrée à Marcel Duchamp de septembre 2014 à janvier 2015.

Laurent Mannoni

Directeur scientifique du Patrimoine et du Conservatoire des techniques
Cinémathèque française
40 avenue des Terroirs de France
75611 Paris cedex 12
l.mannoni@cinematheque.fr

Rapport annuel SB - 2013-2014

Références de W. Braune et O. Fischer

“ Der Gang des Menschen, I. Theil : Versuche am unbelasteten und belasteten Menschen ”, angestellt von Wilhelm Braune † und Otto Fischer, Des XXI. Bandes der Abhandlungen der mathematisch-physichen Classe der Königl. Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften, n° IV, mit 14 Talfen und 26 Textfiguren, Leipzig, Bei S. Hirzel, 1895, p. 153-322.

L'étude, continuée par Fischer après la mort de Braune, comprendra cinq autres livraisons jusqu'en 1904 :

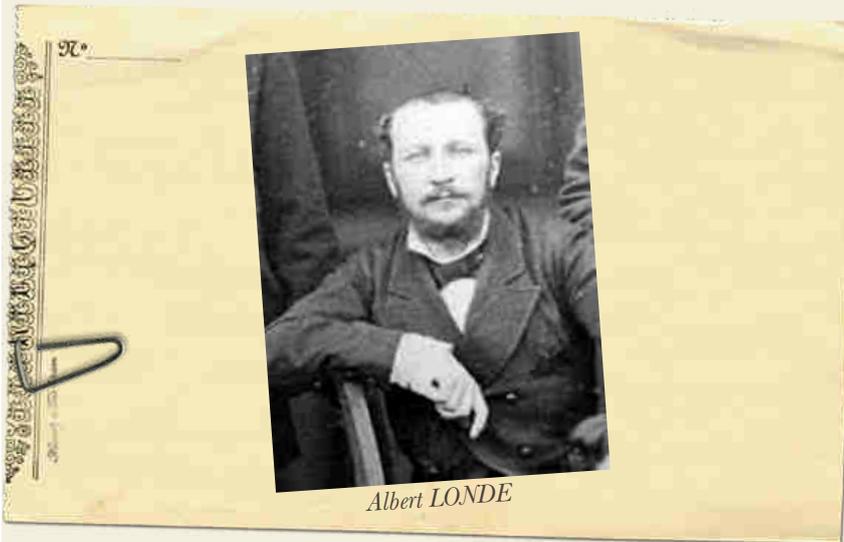
- “ Der Gang des Menschen, II. Theil : Die Bewegung des Gesamtschwerpunktes und die äusseren Kräfte ”, Ibid., XXV, 1899, p. 1-163 ;
- “ Der Gang des Menschen, III. Theil : Betrachtungen über die weiteren Ziele der Untersuchung und überblick über die Bewegungen der unteren Extremitäten ”, Ibid., XXVI, 1900, p. 87-185 ;
- “ Der Gang des Menschen, IV. Theil : Ueber die Bewegung des Fusses und die auf denselben einwirkenden Kräfte ”, Ibid., XXVI, 1901, p. 471-569 ;
- “ Der Gang des Menschen, V. Theil : Die Kinematic des Beinschwingens ”, Ibid., XXVIII, 1899, p. 321-428 ;
- “ Der Gang des Menschen, VI. Theil : Über den Einfluss der Schwere und der Muskeln auf die Schwingungsbewegung des Beins ”, Ibid., XXVIII, 1904, p. 533-623.



Recherche du centre de gravité du corps dans différentes positions.

In Biolocomotion: a century of research using moving pictures.

Cappozzo, Marchetti & Tosi - Promograph - 1992



Albert LONDE (1858 – 1917)

LA CHRONOPHOTOGRAPHIE DES MOUVEMENTS ANORMAUX À SES DÉBUTS

Albert Londe, dont le nom reste peu connu des biomécaniciens et des physiologistes, a bâti sa réputation sur la photographie, dont il a été un grand spécialiste dans les deux dernières décennies du 19^e siècle.

Albert Londe est né à La Ciota le 26 novembre 1858. On le retrouve à Paris, autodidacte et bon photographe, inscrit comme élève du laboratoire de chimie du Muséum d'histoire naturelle. À cette époque, les recherches se poursuivent sur la nature des émulsions à utiliser et sur la qualité des images. Albert Londe adhère en 1879 à la *Société française de photographie* (SFP), créée en 1854 par un groupe d'amateurs. Il entrera dans son conseil d'administration en 1880 et en sera secrétaire général-adjoint deux ans plus tard. La liste de ses publications techniques est impressionnante, pas moins d'une vingtaine de titres de 1884 à 1914. Parmi ceux-ci, des travaux qui

Chapitre 9 : Albert LONDE

concernent les applications de la photographie à la médecine et à la biologie.

Il en décrit lui-même l'intérêt (Londe, 1903): c'est un moyen de reproduction rigoureux et rapide, conservant l'aspect d'un modèle fixe, ou de phénomènes mobiles qui échappent à l'œil humain, et permettant la reconstitution du mouvement. En médecine, l'apport de la photographie est très supérieur à ce que peut donner le dessin. La photographie précise et complète l'observation clinique, fixe l'image des déformations constatées au niveau des segments corporels, des attitudes corporelles pathologiques, du faciès. La photographie est utile pour garder les traces successives des maladies cutanées. C'est de plus un moyen excellent pour la diffusion des connaissances scientifiques.

Au Laboratoire de La Salpêtrière

Le professeur Jean-Martin Charcot (1825-1893), chef du service de neurologie à l'Hôpital de la Salpêtrière à Paris, voit en consultation de nombreux patients atteints de maladies du système nerveux central: épilepsie, hystérie, catalepsie, ataxie locomotrice, attitudes passionnelles, tabès, etc.

Il tente d'associer, à la description clinique habituelle, des images plus évocatrices pouvant être "immortalisées" par le dessin. Il bénéficie pour cela du concours d'un artiste dessinateur, le docteur Paul Richer (1849-1933), qui deviendra en 1903 professeur d'anatomie artistique à l'École nationale des beaux-arts de Paris.

Charcot souhaite obtenir mieux, des images directes, non interprétées par le dessinateur et davantage séquencées. Il constitue dans son Service, en 1878, un *Laboratoire de photographie* permettant de garder, pour mieux les observer, des images fixes de ce qu'il observe au cours de ses consultations. Deux médecins lui prêtent main forte, Bourneville et Regnard. Albert Londe y est engagé comme assistant. Il propose rapidement de mettre à la disposition du service un appareil de sa conception appelé "Chronophotographe".

Ce dispositif est inspiré de ceux de Jansen (1874) et de Muybridge (1878) destinés à l'observation d'objet ou d'animal en mouvement. Il comporte une série de neuf objectifs, disposés en trois rangées de trois (plus tard portée à douze), comportant chacun leur mécanisme d'ouverture et fermeture télécommandable, avec un système de mise en route des prises de vues, à des instants régulièrement programmés, ou à la demande en fonction du moment. Ainsi, le médecin pouvait-il décider de l'épisode qu'il voulait enregistrer. L'appareil peut être transporté au lit du patient. Toutes les

attitudes et postures, tous les mouvements rencontrés en neurologie ont fait l'objet d'un enregistrement. Ainsi ont pu être décrits, aussi, grâce à de nombreux clichés les faciès type de la sclérodémie, du myxœdème, de l'acromégalie. Les images d'une crise d'hystérie sont célèbres (Fig. 1).

Albert Londe prendra en 1884 la direction



Figure 1 : Différents états d'une crise d'hystérie

de ce service, devenu le *Service municipal de photographie et radiographie de La Salpêtrière*. Ce service comportait un grand espace auquel peut accéder un malade couché, mais aussi un dispositif général de prises de vue pour l'étude du mouvement (Fig. 2), analogue à celui que E.J. Marey a installé avec l'aide de G. Demeny à la station physiologique du Parc des Princes. L'emplacement de celui-ci, qui comportait comme toile de fond un panneau de 6 x 5m placé contre les grilles situées à gauche de l'entrée de La Salpêtrière en bordure du boulevard de l'hôpital.

De la collaboration “dessins-photos” avec P. Richer sortiront plus tard l'*Atlas de Physiologie artistique* et la *Nouvelle iconographie de la Salpêtrière* (de 1888 à 1918 - . Lecrosnier et Bâb).

A la Salpêtrière, Albert Londe a continué à utiliser son chronophotographe pour l'examen des malades. Il l'utilise aussi parfois pour des enregistrements à son domicile. Directeur du service depuis 1884, il y introduit, à partir de 1897, la radiologie, et démontre l'intérêt de cette exploration pour la chirurgie. Dans les dernières années de son activité, A. Londe délaisse un peu les applications médicales de la photographie et se tourne vers les applications des rayons X en plein développement.

A la Station physiologique du Parc des Princes

Au début des années 1880, Etienne-Jules Marey était en train d'installer la Station physiologique du Parc des Princes, dépendance de son laboratoire du Collège de France, avec l'aide de son assistant, George Demeny (1850-1917). Le moyen d'obtenir un grand nombre d'images, en un temps très court et à des intervalles déterminés, l'intéresse. Il était en contact avec Albert Londe par la Société de photographie, et suivait de près les travaux

de ce dernier qui avait alors entamé la construction d'un dispositif très complexe (dont il donne une description détaillée dans *La Nature*, en janvier 1890).

A. Londe et E.J. Marey, au-delà de la SFP, ont entrepris une collaboration étroite. Le chronophotographe de Londe peut être adapté à l'étude de mouvements extrêmement rapides, ce qui intéresse

directement E.J. Marey. Le nouvel appareil a été doté de 12 objectifs disposés en 3 rangées de 4. A. Londe enregistre tout ce qui bouge: les mouvements segmentaires, ceux du torse, de la face, le saut. Il s'intéresse aussi à divers types de

marche, normale ou pathologique, de l'homme ou des animaux (cheval vache, chien, chat). Il pratique des enregistrements de gestes professionnels (Fig. 3): bucheron, terrassier, forgeron, dans toutes les situations où un travail musculaire est réalisé (pousser de brouette, port de charge à dos, et, même, jeu du violon). Ses enregistrements de la frappe au marteau ont été réalisés avec Charles Frémont (1855-1930), élève de E.J. Marey. Pendant plusieurs années, A. Londe aura été pour E.J. Marey un opérateur photo dévoué, sans que son nom apparaisse dans les nombreuses publications issues de la Station physiologique.

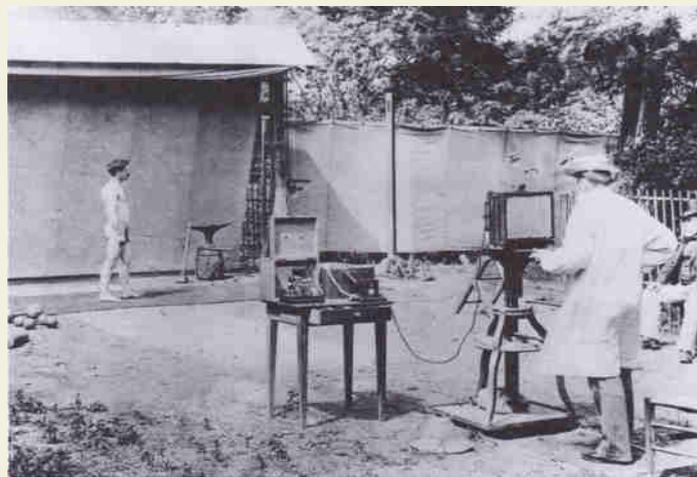


Fig.2: Albert LONDE derrière son chronophotographe (à droite, E.J. Marey)

**Consécration du terme
"Chronophotographe"**

En 1889, se tient le premier Congrès international de photographie, sous la présidence de E.J. Marey. C'est à cette occasion que le terme "chronophotographe" est officiellement établi. L'année suivante, se tient à Paris la grande Exposition Universelle, au cours de laquelle l'appareil d'Albert Londe est exposé dans une vitrine consacrée à la photographie.

Albert Londe n'a pas été seulement un homme de laboratoire. Il a été un très bon chroniqueur et pédagogue, publiant souvent dans la revue "La Nature" des textes se rapportant à l'histoire de la photographie. Il est resté durant toute sa vie un passionné de photos. Il aimait se promener, en observant quelques scènes de la vie publique et en saisir la trace avec ses appareils, notamment à l'Hippodrome de Paris. Il comparait ses enregistrements suivant sa technique avec ceux qu'il faisait parallèlement avec un cinématographe Demenÿ-Gaumont, récemment acquis. Albert Londe est mort le 11 septembre 1917 à Rueil-en-Brie, où il s'était retiré en 1908.

Hugues MONOD

Professeur émérite de Physiologie
Université Pierre et Marie Curie

Rapport annuel SB - 2013-2014

Références

- DEMENÿ, G. : Les bases Scientifiques de l'Education Physiques, Alcan, 1902.
LONDE, A : La Chronophotographie, La Nature, 97-99 et 151-154, 1897
LONDE, A : Le nouveau laboratoire de la

Salpêtrière, La Nature, 570-574

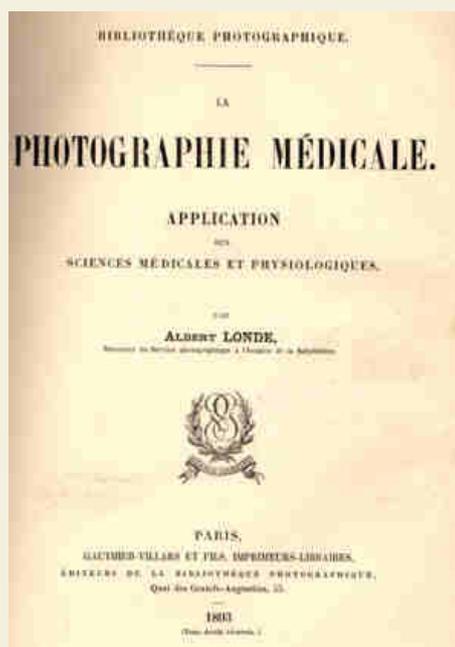
LONDE, A - Notice sur les travaux scientifiques, 1911

LONDE, A - Photographie, in M. Weiss, *Traité de Physique biologique*, Tome II, 141-186

MANNONI, L - Etienne-Jules Marey, la mémoire de l'œil, Milan-Paris, Mazzotta - Cinémathèque française, 1999.



Service photographique de la Salpêtrière
(<http://baillement.com/lettres/londe.html>)





Chapitre 10 : **Sherrington**

Sir Charles Scott Sherrington (1857-1952)

LES FONDEMENTS DE L'ORGANISATION DU MOUVEMENT

Après de brillantes études de médecine au St Thomas' Hospital Medical School de Londres qu'il termine en 1876, Charles Scott Sherrington poursuit sa formation en étudiant la physiologie à l'Université de Cambridge sous la supervision de deux scientifiques de renom, Sir M. Foester et J. Langley. C'est avec ce dernier qu'il publie ses premiers travaux de recherche sur le cerveau chez le chien. Après avoir occupé divers postes de "démonstrateur" en anatomie et de chargé de cours, il devient professeur de physiologie à l'Université de Liverpool en 1895. En 1914, il est nommé à la chaire de physiologie à l'Université d'Oxford, où il restera jusqu'à sa retraite, à l'âge de 79 ans. En 1906, il publie un ouvrage intitulé "**The integrative action of the nervous system**" qui fera référence dans le domaine pendant de très nombreuses années. En compagnie de Sir Edgar D. Adrian, il reçoit, en 1932, le prix Nobel de physiologie et de médecine pour ses travaux sur les neurones médullaires et plus particulièrement pour la mise en évidence de l'intégration sensori-motrice au sein même de la moelle épinière.

Le système médullaire et l'intégration sensori-motrice

La contribution de Sherrington dans le domaine des neurosciences est riche et variée. L'apport que l'on retient habituellement de son œuvre est lié à ses études sur les réflexes médullaires et l'organisation périphérique de la motricité. Pour son accessibilité et sa simplicité d'interprétation, il choisit le modèle du chat décérébré pour étudier l'interaction entre les systèmes sensoriel et moteur (intégration sensori-motrice) et plus particulièrement les phénomènes excitateurs et inhibiteurs. Les concepts développés, comme par exemple la proprioception, font partie, encore aujourd'hui, de la majorité des ouvrages de base de physiologie. Ainsi, il documente les travaux princeps de H. Erb (1875) sur le réflexe d'étirement. Ce réflexe, appelé **réflexe myotatique** par Sherrington, est obtenu lors de l'allongement rapide du muscle et se caractérise par une contraction brusque de ce dernier après une latence de courte durée. Sur base de travaux effectués en collaboration avec E. Liddell, il arrive à la conclusion que ce réflexe est déclenché à partir des fuseaux neuromusculaires (détecteurs de longueur du muscle). Ils constatent que si les fibres nerveuses en provenance du muscle sont sectionnées, le réflexe est aboli, ce qui démontre son origine musculaire (Fig. 1).

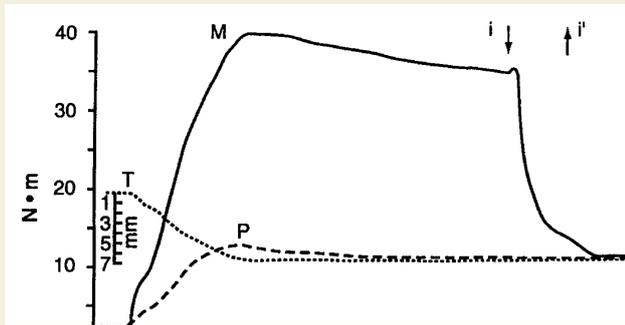


Figure 1: Illustration de la contribution mécanique du réflexe myotatique chez le chat décérébré. Le muscle quadriceps est allongé progressivement (7 mm pendant ~1.5s) et maintenu ensuite à la même longueur (tracé T, pointillés). Les tracés M (continu) et P (interrompu) correspondent à la force produite par l'allongement, respectivement, lorsque l'innervation est préservée (M) ou supprimée après section du nerf correspondant (P). La force produite en P est due à l'allongement passif de la composante élastique parallèle du muscle tandis que la différence entre les tracés M et P correspond à la contribution mécanique du réflexe. A noter que le réflexe est inhibé lors de la stimulation du nerf innervant la musculature antagoniste (ii'). D'après Liddell et Sherrington (1925).

Sherrington décrit également le rôle joué par d'autres fibres sensorielles en provenance du muscle, des articulations et de la peau et met en évidence que les neurones de la moelle épinière sont des lieux d'intégration et de sommation spatio-temporelle des diverses informations sensorielles qui y arrivent. Il rapporte aussi qu'environ 1/3 des fibres dans les nerfs sont constituées de fibres sensorielles et décrit la distribution des champs cutanés couverts par les fibres sensorielles issues de chaque racine nerveuse dorsale. Enfin, il montre que, contrairement à ce qui était admis à l'époque, une racine ventrale issue de la moelle épinière pouvait innover de nombreux muscles, certains étant parfois antagonistes.

Sur base de ses données expérimentales, Sherrington développe le concept d'**inhibition active**. A cette époque, l'inhibition était connue

mais considérée comme passive. Par exemple, il observe qu'une stimulation cutanée, simultanée du membre opposé provoque une inhibition du réflexe en cours du membre ipsilatéral (innervation croisée). Il découvre et appellera "**innervation réciproque**" la coordination entre muscles antagonistes d'un même membre. Il constate par ailleurs, qu'en parallèle au réflexe myotatique, les muscles antagonistes sont transitoirement relâchés. Il démontre que ce relâchement est bien en lien avec l'activation du muscle agoniste et introduit le terme d'inhibition réciproque pour définir ce phénomène. Sous le contrôle du système nerveux central, ce mécanisme est en réalité le fondement même de la majorité de nos mouvements au cours desquels les muscles agonistes et antagonistes sont alternativement activés et inhibés. En outre, il s'intéresse aux activités locomotrices rythmiques mais, dans ce domaine, son apport apparaît cependant comme étant plus restreint (cf Stuart et coll., 2001).

Même si ces études ont été principalement réalisées sur l'animal décérébré, limitant ainsi son intégration dans un contexte plus global de la motricité volontaire, les notions apportées par Sherrington constituent la base même de notre compréhension du système sensori-moteur.

Les concepts de synapse, de voie finale commune et d'unité motrice

De nombreux concepts de base ont émergé des expérimentations menées par Sherrington sur les réflexes médullaires. Parmi ceux qui n'ont pas encore été développés, il convient de citer:

Le concept de synapse. Dans la continuité des travaux de S. Ramon Y Cajal et de C. Golgi sur la structure du système nerveux, Sherrington relie, à partir de ses propres expérimentations, la structure à la physiologie ainsi qu'au comportement. Suite à l'observation de A. Waller (1850) que la dégénération de la partie périphérique d'un nerf consécutive à sa section

s'arrête avant le neurone suivant, il introduit avec M. Foster (1897), le terme de "synapse" pour définir la connexion entre deux neurones. Il faudra néanmoins attendre les travaux de G. Palade et S. Palay en 1954 pour avoir la confirmation de l'existence réelle de la synapse. Cette notion est fondamentale car elle explique le sens de la conduction nerveuse, le délai de cette conduction dû au franchissement de la (des) synapse(s) ainsi que la continuation de l'influx nerveux même après l'arrêt du stimulus.

Le concept de la voie finale commune. La production de force et par conséquent nos actions motrices sont le résultat d'une commande nerveuse transmise à nos muscles, conduisant *in fine* à sa contraction. Si la commande centrale est le résultat d'une organisation complexe mettant en jeu différentes parties de notre cerveau, au niveau médullaire, le signal de sortie est le neurone moteur (motoneurone). Il constitue la "voie finale commune" de tous mouvements, qu'ils soient d'origine volontaire, automatique ou réflexe (Figure 2). Au-delà du motoneurone, la modulation du message nerveux envoyée au muscle n'est plus possible.

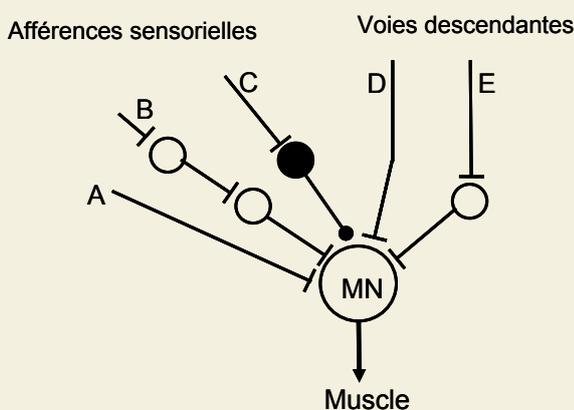


Figure 2 : Schéma illustrant la voie finale commune proposée par Sherrington. Le motoneurone (MN) est

le lieu d'intégration, au niveau médullaire, des différentes afférences sensorielles facilitatrices (A & B) et inhibitrices (C) en provenance de nos capteurs périphériques (musculaires, articulaires, cutanés) et des voies descendantes directe (D) ou indirecte (E) d'origine supramédullaire. De nos jours, s'il est bien admis que le signal de sortie vers l'effecteur (Muscle) reste le motoneurone, on sait depuis les travaux de Lundberg dans les années 70 que l'intégration sensori-motrice se fait au sein d'interneurones situés en amont des motoneurones.

Le concept d'unité motrice. Une autre question majeure pour l'époque était de savoir si un motoneurone innervait une seule fibre musculaire ou un ensemble de plusieurs fibres. Même si la réponse à la question pouvait être implicitement déduite à partir d'expérimentations antérieures, le terme d'unité motrice est introduit pour la première fois par Liddell et Sherrington en 1925 sur base de leurs travaux. Ils définissent l'unité motrice comme étant constituée par : "le motoneurone, son axone et les fibres musculaires innervées par ce dernier". Ce concept, toujours d'actualité, a servi de base par la suite au développement du principe de grandeur de Henneman (1957), à savoir que lorsque la commande nerveuse centrale s'intensifie, les unités motrices sont progressivement recrutées selon la taille de leur motoneurone.

Le contrôle supramédullaire de la motricité

Si les travaux menés par Sherrington sur le système nerveux central chez le singe étaient novateurs pour l'époque, ceux-ci n'ont pas eu le même retentissement historique que ceux effectués sur la moelle épinière. On retiendra pourtant ses études sur le cervelet et la fonction de la voie spino-cérébelleuse, ses investigations utilisant la lésion de racines nerveuses ou l'ablation de zones corticales afin de mieux comprendre l'organisation des voies sensorielles et motrices, ainsi que celles utilisant la

stimulation électrique pour délimiter la zone correspondant à l'aire motrice corticale. Cette dernière approche a d'ailleurs jeté les bases des cartes corticales établies chez l'Homme (homonculus) quelques années plus tard (1950) par l'un de ses élèves, W. Penfield. Bien que la qualité des travaux de Sherrington dans ces domaines soit remarquable, c'est surtout leur interprétation qui en a limité leur portée.

En effet, la principale fonction qu'il accorde au cerveau est de contrôler les activités réflexes sous-jacentes par l'intermédiaire d'extérocepteurs comme la vision et l'audition. Il oppose ceux-ci aux propriocepteurs qui modulent l'activité musculaire au niveau médullaire. Même si Sherrington ne s'est pas aventuré dans l'interprétation de l'organisation centrale du mouvement volontaire, il souligne néanmoins avec force, lors de la conférence qu'il donne à l'occasion de la remise de son prix Nobel en 1932, le rôle joué par l'inhibition active comme mécanisme global de coordination du système nerveux central. A l'époque beaucoup de chercheurs pensaient que l'élaboration et la modulation de la commande volontaire résultaient d'une simple variation d'intensité de l'excitation. On sait aujourd'hui que ce n'est pas le cas et que la modulation de nos actions est l'expression d'une constante intégration entre excitation et inhibition. Ici aussi, Sherrington est, avec d'autres scientifiques de son époque, à l'origine de ce concept.

Outre son apport scientifique personnel et celui de ses collaborateurs, Sherrington a formé des scientifiques de renom dont certains ont contribué de manière remarquable à l'évolution des connaissances dans le domaine des neurosciences. Parmi ceux-ci, on retiendra les noms de R. Granit, J. Eccles et H. Florey, tous trois lauréats du prix Nobel.

Jacques DUCHATEAU

Professeur à l'Université Libre de Bruxelles
(jduchat@ulb.ac.be)

Quelques références

Sherrington C.S. (1906). The integrative action of the nervous system. New Haven, Yale University press.

Sherrington C.S. (1910). Flexion-reflex of the limb, crossed extension-reflex, and reflex stepping and standing. *J. Physiol.* 40:28-121.

Sherrington C.S. (1913). Further observations on the production of reflex stepping by combination of reflex excitation with reflex inhibition. *J. Physiol.* 47:196-214.

Sherrington C.S. (1925). Remarks on some aspects of reflex inhibition. *Proc. R. Soc. Lond.* B97: 519-545.

Liddell E.G.T. and Sherrington C.S. (1925). Recruitment and some other features of reflex inhibition. *Proc. R. Soc. Lond.* B97:488-518.

Pour en savoir plus sur l'oeuvre de Sherrington:

Stuart D. G., Pierce P.A., Callister R.J., Brichta A.M. and McDonagh J.C. (2001). Sir Charles S. Sherrington: Humanist, Mentor, and Movement Neuroscientist. In: "Classics in Movement Science" (Latash M.L. and Zatsiorsky V. eds). Champaign, IL: Human Kinetics, pp. 317-374.

Clarac F. and Barbara J.-G. (2011). The emergence of the "motoneuron concept": From the early 19th C to the beginning of the 20th C. *Brain Res.* 1409: 23-41.



Chapitre 11 : **Jules Amar**

Jules AMAR (1879-1935)

Pionnier de la Physiologie du travail et concepteur de Prothèses

Le renom de Jules Amar est dû à ses travaux sur la bioénergétique humaine et sur la biomécanique de la marche, inspirés par ses deux illustres prédécesseurs, J.E. Marey (1830-1904) et J.B Chauveau (1817-1927). Amar est né à Tunis en 1879 d'une mère tunisienne et d'un père algérien. Il obtient son baccalauréat à Alger à l'âge de 19 ans et vient à Paris pour y suivre des études supérieures. Il s'inscrit en licence à la Sorbonne et suit les enseignements d'Albert Dastre, physiologiste de la nutrition.

Une entrée de plain-pied en physiologie du travail.

Chargé d'abord de quelques missions scientifiques en Algérie, il entreprend rapidement une recherche sur le rendement musculaire de sujets exerçant diverses activités physiques, marche et transport de charges. Pour ce faire, il effectue parallèlement une évaluation du travail mécanique et une mesure de l'énergie dépensée à partir des échanges respiratoires, utilisant aussi le cyclo-ergomètre mis au point par Elisée Bouny en 1897 dans le Laboratoire de Marey. Le même protocole est repris dans les locaux du Conservatoire National des Arts et Métiers

(CNAM), rue Saint-Martin. Il poursuit le même type d'investigation dans le Laboratoire de physique médicale de Georges Weiss à la Faculté de médecine. Les données expérimentales qu'il a obtenues au cours de ces quelques années font l'objet de sa thèse d'Etat, consacrée au *Rendement de la machine humaine*. Ce titre signe l'intérêt qu'Amar a porté aux leçons de Paul Bert (*La machine humaine*, 1867-68) et à l'ouvrage de Marey (*La Machine animale*, 1873).

L'attention d'Amar se porte aussi à cette époque sur l'étude de gestes professionnels. Le travail du limeur à l'étau, activité très répandue dans les ateliers, est livré à la bioénergétique : le poids de la limaille obtenue est un indice du travail musculaire fourni, tant par les membres supérieurs que par les membres inférieurs assurant la stabilité du tronc. La consommation d'oxygène est mesurée en parallèle. Les rapports entre les deux grandeurs sont tributaires des modalités d'exécution des mouvements et permettent de définir les conditions dans lesquelles le travail est le moins coûteux, c'est-à-dire le plus économique, susceptible d'être le moins fatigant pour l'opérateur. La posture de travail redressée, la position respective des pieds et de la main qui travaille requièrent toute son attention.

Amar s'interroge sur la transmission de la force musculaire sur l'outil de travail. Pour cela il imagine de placer des capteurs de force, mécaniques ou pneumatiques, au niveau de la main

qui tient l'outil ou dans le corps même de celui-ci : manche lime (**Fig.1**), manche de pelle, manche de brouette. Il met en évidence des coûts différentiels en fonction de la nature du métal travaillé, ou du type d'outil utilisé.

Dès 1910, les problèmes d'organisation scientifique du travail ouvrier préoccupaient les milieux politiques et gouvernementaux, de longues discussions s'engagent auxquelles fait suite la création au CNAM en mai 1913 d'un « *Laboratoire d'étude du travail musculaire professionnel* ». Amar en a reçu la direction en juillet 1914 et s'installe rue Saint-Martin dans deux grandes pièces, disposant de deux aides et d'un petit crédit de fonctionnement.

La conception des prothèses pour blessés de guerre

En raison des hostilités, le Laboratoire de Jules Amar est fermé en juillet 1914 et transformé

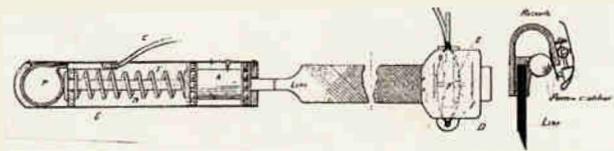


Figure 1 : Montage d'une lime dynamométrique. Les forces exercées sont enregistrées à partir de capsules placées aux deux extrémités de la lime.

en « *Laboratoire des prothèses militaires* ». Amar en devient sous-directeur, au sein du Magasin central du Service de Santé des Armées. Ce changement détourne Amar de ses intentions initiales, c'est-à-dire l'observation de l'homme au travail avec une approche physiologique. Quoiqu'il en soit, l'urgence est de mettre la biomécanique au service de la réhabilitation des blessés de guerre et de leur remise au travail. Jules Amar subit une réorientation forcée vers une recherche appliquée qu'il n'a pas choisie. Il s'y active en plusieurs étapes : analyse scientifique du déficit moteur, conception d'un appareillage spécifique, rééducation motrice, réadaptation au travail professionnel.

Il s'attaque en premier à l'évaluation objective des handicaps moteurs, et en premier

lieu aux blessés qui ont subi une amputation. Il crée pour cela un dispositif permettant d'établir, en mobilité et en force, le bilan segmentaire du reste de musculature au membre atteint. Il construit un appareil, l'*Arthro-dynamomètre*, qui précise les niveaux de force en fonction de la position articulaire, en condition statique, comme en condition dynamique. Ces données sont celles qui permettraient l'établissement du diagramme tension/longueur, concept bien ultérieur. L'appareil est également utilisé pour suivre les étapes successives de la rééducation du blessé.

La suite logique des préoccupations d'Amar réside dans le choix d'une prothèse apte à restituer aux blessés ou amputés un minimum de force utile. Une des difficultés qu'il rencontre vient du fait qu'il n'est pas lui-même médecin et qu'il doit tenir compte de l'existence des prothèses créées dans différents services médicaux spécialisés. Il a cependant ses idées personnelles sur les matériaux les plus aptes à réaliser une prothèse aussi légère que possible, tout en étant suffisamment rigide pour transmettre les forces musculaires (bois, métal léger, acier, cuir bouilli). Il définit les conditions optimales d'utilisation des prothèses : la parfaite cicatrisation du moignon qui ne doit pas être le siège de douleurs, l'appareillage qui ne doit pas être agressif aux points de contact avec la peau et ne doit pas faire obstacle à l'élimination de la sueur accompagnant tout travail musculaire.

Amar conçoit d'abord un bras de travail pour les sujets amputés au-dessus du coude. La prothèse comporte un manchon fixé sur le moignon par des sangles, l'ensemble étant plaqué sur l'épaule et le thorax et maintenu par une ceinture passée sous l'aisselle du côté opposé. La prothèse est terminée à son extrémité par un bras métallique orientable, qui peut recevoir une main de parade (**fig.2**) ou une pince universelle, susceptible de tenir fortement un outil de travail. L'avant-bras d'Amar est plus simple ; la prothèse est fixée directement sur le

manchon enserrant le bras et l'avant bras porte à son extrémité une pince pouvant être orientée dans toutes les directions en fonction du travail à réaliser. Pour l'exécution de mouvements fins, il est amené à concevoir des mains artificielles avec mobilisation individuelle des doigts, fixées sur des prothèses plus légères (écriture, frappe à la machine), avec conservation de l'opposition du pouce. Les améliorations de ses prothèses sont à l'origine du dépôt par Amar de nombreux brevets d'invention.

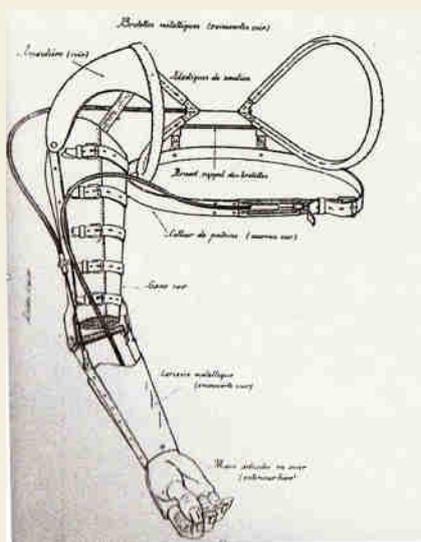


Figure 2 : Prothèse de bras de Amar
La prothèse placée sur l'épaule est maintenue par des sangles élastiques et des ressorts.

Dans le prolongement de ses études sur l'énergétique du travail musculaire, Amar s'était intéressé à différentes modalités de déplacement : marche en montée, marche sur escalier, sur plan incliné, marche avec charge, marche en poussant une brouette ou tirant une charrette. Il se penche donc tout naturellement sur la marche chez les blessés des membres inférieurs. Il imagine des prothèses fixées suivant les mêmes principes que pour les membres supérieurs, mais d'installation plus simple puisqu'une fois en place elles sont en partie maintenues par le poids du corps.

Des essais de prothèses de marche sont réalisés sur trottoir dynamométrique. Les amputés du membre inférieur se déplacent sur

un pilon adapté ou en utilisant des béquilles. La pression qui s'exerce au niveau des aisselles induit qu'une pratique prolongée comporte une compression douloureuse du plexus brachial. Il conçoit donc une *béquille physiologique* bien adaptée à la taille du sujet, qui réduit la pression au niveau des aisselles grâce à des ressorts, plus ou moins tendus en fonction du poids du sujet. Ils amortissent les chocs survenant à chaque pas. De plus la détente des ressorts, lorsqu'un pas est effectué, imprime au corps un mouvement de propulsion vers l'avant, tout en diminuant la pression au niveau de l'aisselle. Le travail des jambes s'en trouve facilité. Dans ce processus d'auto-réhabilitation, le sujet et ses béquilles fonctionnent comme un tout.

Le réapprentissage de la force musculaire

Vient ensuite la rééducation fonctionnelle. Le mutilé, chirurgicalement traité et correctement appareillé, doit s'entraîner à utiliser au maximum ses muscles restants. Il s'agit d'obtenir des gains de force, comme chez le sujet normal. Amar utilise pour cela tout dispositif permettant la réalisation de contractions isométriques par le moignon. Pour la rééducation du mouvement, dont le but est de rétablir la mobilisation des articulations et la synergie musculaire, Amar utilise son cycloergomètre dont il modifie la position du pédalier en fonction de l'articulation en cause. Pour le membre supérieur, les mouvements de flexion/extension du coude sont réalisés avec une varlope dynamométrique (**fig.3**).

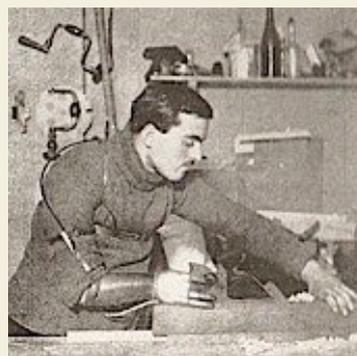


Figure 3 : Varlope dynamométrique
La force et la vitesse des mouvements du coude sont enregistrées au cours de l'entraînement.

Pour les muscles de la main, il a recours à un *chirographe* et à une poire dynamométrique. Les progrès sont suivis sur des enregistrements de pression aux points de contact, enregistrés sur le noir de fumée d'un cylindre de Marey, et comparés au côté sain. Le contrôle de la rééducation de la marche avec prothèse se fait sur un trottoir dynamométrique qui enregistre les pressions aux points de contact avec le sol (fig.4). Le coût énergétique de la marche est apprécié classiquement à partir des échanges respiratoires.

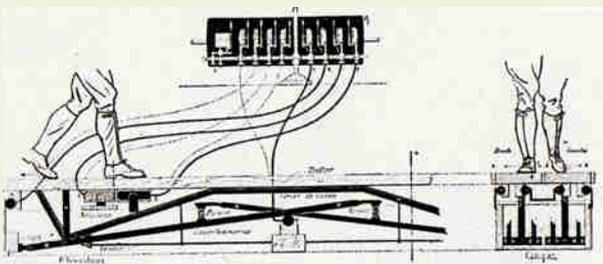


Figure 4 : Trottoir dynamométrique
La pression du pied sur le sol est enregistrée par une batterie de capsules.

La dernière étape pour Amar, et la principale, réside dans le retour du blessé au travail, ce qui suppose une rééducation professionnelle. Il organise pour cela des ateliers fictifs, dans lesquels un mutilé est muni d'un bras artificiel, maintenant à son extrémité une lame de métal sur une enclume qui doit être martelée par le bras valide (fig.5) ; il en va de même pour un travail à la lime.

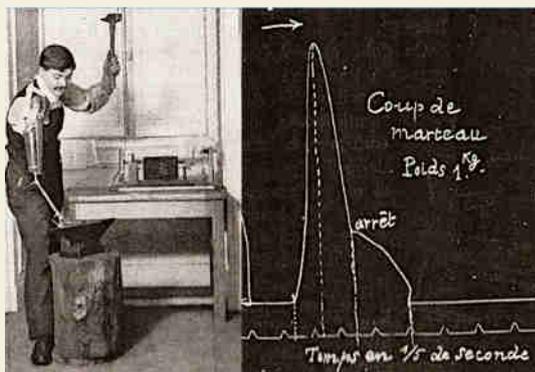


Figure 5 : Frappe au marteau
Le marteau est relié à un stylet inscripteur par un filin qui fait réflexion sur une poulie située en hauteur. L'amplitude du mouvement et le temps de frappe permettent le calcul du travail réalisé.

Ce bras artificiel permet à un sujet appareillé de jouer du violon ou de taper à la machine. Amar va jusqu'à vérifier la capacité de travail d'ouvriers ayant repris le travail à l'extérieur (marbrier, sculpteur). La somme de son travail en faveur des blessés de guerre est exposée dans *l'Organisation physiologique du travail* (1917), ouvrage traduit en anglais et réédité aux USA en 1922.

Conclusion

On ne sait pas combien d'individus Amar a remis à un travail professionnel ni avec quel succès. Aucune statistique n'a été établie après la fin des hostilités, et, en 1920, les préoccupations de ce physiologiste du travail sont devenues d'un autre ordre. Une chose est certaine : la capacité de Jules Amar à développer une recherche appliquée pour répondre à une situation imprévue et urgente tient aux connaissances physiologiques de base qu'il a accumulées et à sa maîtrise des impératifs de l'expérimentation scientifique.

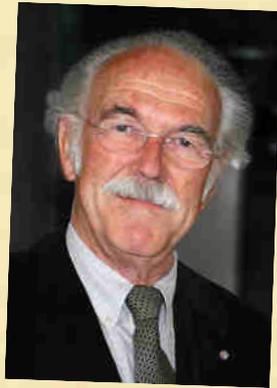
Jules Amar représente le lien intellectuel hors du temps entre Jules Marey et Henri Laugier et plus tard Camille Soula.

Références

- AMAR, J. - Rééducation professionnelle des blessés et mutilés de guerre (1915) -Revue de métallurgie, 855-887
- AMAR, J. - Organisation physiologique du Travail (1917) - Dunod et Pinat, Paris, 1 vol. 374 p.
- BERT, P. - La machine humaine (1867), Paris, Hachette et Cie, 1 vol. in-16, 53p.
- COLAS DES FRANCS, G. - L'œuvre de Jules Amar entre 1914 et 1918 (1984) Thèse doct. méd.. Caen, 73p.dact.
- MAREY, J.-E. - La machine animale (1873), - Paris, Germer-Baillière, 1 vol in-8, 288p., 117 fig.
- MONOD, H.- (1994), « Amar, Jules (1879-1935) », In C. Fontanon et A. Grelon (dir.), *Les professeurs du Conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955, A-K* (p. 97-107). Paris : INRP/CNAM. Collection Histoire

Hugues MONOD

Professeur émérite de Physiologie
Université Pierre et Marie Curie



Ewald. R Weibel

Chapitre 12 : Ewald R. Weibel

Ewald R. Weibel (1929)

Préambule: *Le Professeur Ewald Weibel a joué un rôle déterminant dans la compréhension actuelle de l'appareil respiratoire. Ses domaines de recherche sont la physiologie du système respiratoire, la morphométrie, la relation structure-fonction du poumon, la physiologie et l'anatomie comparées, la biologie cellulaire, la microscopie électronique. Les faits historiques sont extraits d'un chapitre d'ouvrage écrit par Ewald Weibel (1).*

Au printemps 1966, Ewald Weibel, alors âgé de 37 ans, s'installe en Suisse pour prendre en charge la chaire du département d'anatomie de l'Université de Berne. Il y découvre une impressionnante collection de squelettes d'oiseaux et de mammifères de toutes tailles, ainsi qu'une vitrine où sont exposés d'anciens moulages d'arbres bronchiques réalisés par son prédécesseur Christoph Theodor Aeby, auteur en 1880 d'un premier traité en allemand sur l'arbre bronchique des mammifères et de l'homme (2), traité qui lui avait servi de base pour publier en 1963 un ouvrage fondateur de la Physiologie Respiratoire moderne intitulé : « *Morphometry of the Human Lung* » (3).

Dans ses travaux fondateurs sur la structure pulmonaire, Ewald Weibel a poursuivi deux objectifs majeurs : (i) décrire finement la structure de l'**échangeur gazeux** que constitue le poumon profond, et (ii) élaborer des représentations modèles de l'**arbre aérien** qui

conduit l'air vers les zones d'échanges. À la différence des approches antérieures, essentiellement qualitatives, la démarche d'Ewald Weibel a été quantitative, apportant pour la première fois une représentation précise de l'architecture pulmonaire fondée sur des données *morphométriques*. Elle lui a permis de réaliser à partir de 1959 les premières mesures systématiques de la morphométrie complète de l'arbre aérien sur des bases théoriques fiables (4).

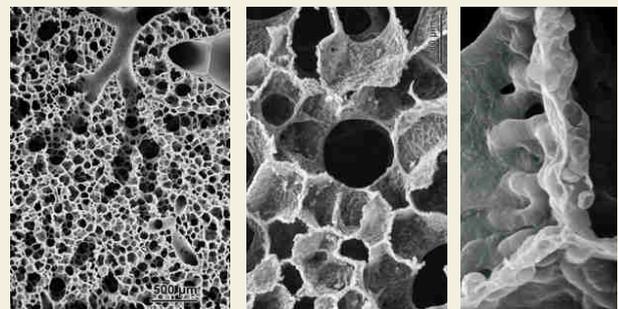


Figure 1: (gauche) *Vue en coupe d'un acinus humain, réalisée en microscopie électronique par Ewald Weibel ; (centre) zoom sur un conduit acinaire entouré d'alvéoles ; (droite) zoom sur un septum séparant deux alvéoles. On aperçoit les globules rouges dans les capillaires qui serpentent entre les deux minces parois alvéolo-capillaires.*

Les recherches sur la physiologie de la respiration avaient connu une avancée notable aux Etats-Unis dès 1940, à l'Hôpital Bellevue dans la ville de New York, à l'instigation d'André Cournand (médecin et physiologiste français, naturalisé américain en 1941) et de Dickinson W. Richards, tous deux

lauréats du prix Nobel de Physiologie ou Médecine en 1956 pour leur travail sur le cathétérisme cardiaque. Les progrès permis par cette découverte ont engendré des études – conduites en collaboration avec Richard L. Riley – qui se sont révélées fondamentales pour comprendre la « relation perfusion/ventilation alvéolaire » et son rôle essentiel dans les échanges gazeux pulmonaires. Ce résultat a véritablement révolutionné la physiologie respiratoire, rendant possible l'estimation du débit cardiaque par la méthode de Fick, ainsi que la mesure des pressions artérielles pulmonaires chez les sujets normaux et les patients. C'est cette équipe prestigieuse, qui nourrissait un intérêt tout particulier pour les études de la relation entre **structure** et **fonction**, que le jeune anatomiste Ewald Weibel rejoint dès 1959 à la suite de la proposition d'André Cournand « d'étudier quoi que ce soit sur la structure du poumon qui intéresserait la physiologie ». L'approche structurale et morphologique restait à cette époque peu explorée pour le système respiratoire, et l'on ne savait pas précisément quel angle d'attaque serait le plus profitable pour faire avancer les connaissances en physiologie respiratoire.

La rencontre à New York d'une troisième personnalité hors du commun, Domingo M. Gomez, va jouer un rôle essentiel dans la démarche d'Ewald Weibel. D'origine Cubaine, Domingo Gomez a étudié la médecine à Paris grâce au soutien d'un éminent chercheur français en sciences médicales venu visiter Cuba, Henri Vasquez. En parallèle, il est également devenu un mathématicien talentueux. Fuyant le nazisme puis le castrisme, il s'installe finalement à New York où il trouve dans la démarche d'Ewald Weibel – qui vise une approche quantitative de la structure pulmonaire normale et pathologique – la possibilité de mettre en application ses connaissances mathématiques.

Conscients tous deux que la compréhension des phénomènes physiologiques doit passer par une analyse mathématique précise, ils élaborent une méthodologie théorique sophistiquée afin de décrire la structure pulmonaire. Ewald Weibel était tout prêt à assumer l'incompréhension que

cette démarche pourrait susciter car c'était selon lui le prix à payer pour être en accord avec lui-même. Cependant, pour caractériser la relation entre la morphométrie pulmonaire et les échanges gazeux, il leur fallait collecter des données quantitatives sur la géométrie acinaire. C'est ce à quoi Ewald Weibel s'est attaché, en n'hésitant pas à importer des méthodes stéréologiques fiables issues des sciences des matériaux sous l'impulsion notamment de mathématiciens allemands, afin de les adapter au contexte biologique et en particulier à celui du poumon.

L'une des questions posées consistait notamment à déduire les paramètres d'une structure tridimensionnelle à partir de coupes bidimensionnelles (sections) de cette même structure étudiées au microscope. Or la résolution de ce problème nécessite d'intégrer des notions statistiques et probabilistes héritières d'une longue histoire. Les premières approches théoriques de cette question remontent en effet à 1777, lorsque Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon (1707-1788), résolut un problème célèbre en calculant la probabilité qu'une aiguille de longueur L jetée au hasard rencontre un réseau de lignes parallèles séparées d'une distance D (cette probabilité vaut en fait $(L/D)(2/)$, ce qui permet donc une détermination expérimentale probabiliste du nombre !).

Se fondant sur des méthodes analogues, le nombre d'alvéoles pulmonaires a pu être évalué à partir du comptage des contours alvéolaires dans un échantillon de coupes histologiques, puis validé sur des modèles physiques composites. Le nombre ainsi obtenu par la méthode de Weibel et Gomez (5) est d'environ 300 millions pour un poumon humain adulte. Cette estimation repose néanmoins sur certaines hypothèses, notamment sur des distributions de taille et de volume des alvéoles faisant intervenir le facteur de forme qui relie le volume à la surface alvéolaire. En exploitant de nouvelles méthodes stéréologiques non soumis à ces limitations, cette estimation a été par la suite améliorée pour être portée à 400 millions (6).

Pour décrire le caractère exceptionnel de l'échangeur gazeux pulmonaire et appréhender l'apport déterminant d'Ewald Weibel dans la connaissance de ce système, il faut prendre conscience de la complexité du système respiratoire. Le travail de Weibel et Gomez a permis d'obtenir, par des méthodes stéréologiques (7), des données fondamentales sur la structure de l'échangeur pulmonaire : non seulement les surfaces alvéolaire et capillaire, mais aussi le volume des capillaires ainsi que l'épaisseur de la membrane qui sépare l'air et le sang (4). Ainsi la surface alvéolaire, d'abord mesurée par microscopie optique, a été évaluée à 75 m² puis, par microscopie électronique, à 130 m². Cette forte influence de la résolution de l'appareil sur la mesure géométrique est caractéristique de la structure « fractale » du poumon, notion que nous allons retrouver plus loin (8). Sur la moitié de la surface alvéolaire, l'épaisseur de cette paroi ne dépasse 0,5 µm tandis que l'épaisseur fonctionnelle, qui correspond à sa moyenne harmonique, est estimée à 1 µm. L'échangeur air-sang est constitué quant à lui par les parois inter-alvéolaires (*septa*), ces dernières étant elles-mêmes parcourues par un réseau dense de capillaires sanguins. Sachant que les meilleurs microscopes optiques ont une résolution supérieure à 0,2 µm, il a fallu attendre l'invention du microscope électronique (1939), puis ses applications aux tissus biologiques dans les années 1950-1952 (rendue possible par l'introduction de molécules de métaux lourds dans les tissus) pour acquérir des données sur la structure fine de cet échangeur. C'est ainsi que l'existence d'une paroi alvéolaire continue, composée de cellules épithéliales (à noyau) à la morphologie très particulière (notamment un cytoplasme très aplati constituant l'un des caractères spécifiques de la **barrière alvéolo-capillaire**), a pu être démontrée chez tous les mammifères, homme inclus, mettant un terme à un long débat sur la nature cellulaire ou acellulaire de cette paroi alvéolaire (9).

Kurt von Neergaard (10) avait été le premier à considérer le rôle critique joué par la **tension de surface** au niveau alvéolaire, en raison de la structure très particulière de la région

acinaire (7). La découverte, dans les années 1960, du surfactant et de son rôle comme élément stabilisateur de la surface alvéolaire a eu un impact considérable dans le domaine de la physiologie respiratoire. En 1967, Ewald Weibel et Joan Gil ont mis en évidence pour la première fois, par microscopie électronique et sur des poumons de rat fixés par perfusion vasculaire, la présence d'un système de double couche au niveau de la surface alvéolaire : une couche aqueuse (siège des macrophages alvéolaires) surmontée d'un film phospholipidique, le surfactant (11). Les travaux d'Ewald Weibel, réalisés avec Hans Bachofen (12), ont par la suite montré que la surface alvéolaire était stabilisée grâce à l'équilibre mécanique entre la structure du tissu pulmonaire, la pression de distension capillaire et la tension de surface régulée par le surfactant.

Sur la base de ces données morphométriques, la capacité de diffusion d'un poumon humain a ainsi pu être estimée théoriquement à 200 ml O₂min⁻¹mmHg⁻¹, une valeur 10 fois supérieure à celle mesurée au repos (13). L'explication la plus vraisemblable pour un tel écart était l'existence d'une réserve respiratoire importante qui n'est mobilisée que dans les conditions extrêmes comme l'exercice musculaire (14) ou l'hypoxie d'altitude (15). Les travaux ultérieurs d'Ewald Weibel, en collaboration avec des équipes françaises, ont de fait démontré que les dimensions géométriques de l'acinus autorise l'existence d'une réserve qui se caractérise au repos par une moindre absorption de l'oxygène par la paroi des dernières bronches (16).

Mais les études morphométriques de Weibel ne se sont pas limitées à la partie acinaire ; elles ont porté également sur l'arbre trachéobronchique. Avant les travaux fondateurs de Weibel et Gomez, les données quantitatives sur l'architecture et les dimensions de l'arbre trachéobronchique étaient très rares. Un précurseur prestigieux s'était pourtant déjà penché sur la question : Léonard de Vinci (1510), qui avait dessiné de magnifiques modèles d'arbres bronchiques et vasculaires et même élaboré l'ébauche d'une théorie sur les effets de la structure sur l'écoulement dans le poumon (17).

Mais dans la littérature scientifique moderne, Weibel et Gomez ne trouvèrent que deux études traitant du sujet, publiées respectivement en 1871 et 1915 par Christoph Theodor Aeby (né en 1835) et Fritz Rohrer (né en 1888). Par un clin d'œil du destin, tous deux étaient originaires de Berne, ville où Ewald Weibel allait être nommé titulaire de la chaire d'anatomie un siècle après qu'Aeby ait occupé la même position, et 50 ans après que Rohrer y avait été *privatdocent* en physiologie. Par ailleurs, les deux études, séparées de plus de 30 années, étaient très différentes en termes de perspectives et de méthodes.

L'approche scientifique d'Aeby pour décrire le poumon du mammifère, qui a fortement inspiré Weibel par la suite, était nettement tournée vers l'anatomie comparée, à une époque où anatomie et physiologie étaient des sciences clairement distinctes, tandis que les travaux de Rohrer se concentraient sur le poumon humain dans une perspective physique estimant la résistance aérodynamique dans un arbre aux branchements dichotomiques. L'approche d'Aeby, à l'instar de celle de Weibel, était quantitative et axée sur la recherche d'un principe général de construction. Mais si l'on examine en détail la loi précise qui gouverne la génération des branches, on s'aperçoit de la grande différence qui existe entre Aeby et Weibel. Le premier, inspiré par l'arborescence végétale, concevait l'arbre bronchique de façon monopodiale : un tronc unique d'où partent des branches adjacentes. Cette conception l'a conduit à simplifier exagérément la réalité anatomo-physiologique comme il l'a reconnu plus tard. À l'inverse, la vision dichotomique (un arbre qui se divise en deux à chaque branche, inspiré des travaux de Léonard de Vinci), assortie ou non de quelques irrégularités, est apparue, grâce aux travaux d'Ewald Weibel, comme la plus pertinente. Elle est surtout en accord avec les processus de branchement successif des tubes bronchiques par dichotomie au cours du développement pulmonaire, résultats de travaux amorcés par les embryologistes dont Kölliker fut un pionnier (1861).

Quant à l'approche de l'arbre bronchique développée par Fritz Rohrer, elle fut la première

réellement fondée sur une question physiologique. Dès sa thèse publiée en 1915, ce médecin-chercheur s'est intéressé à la résistance des voies aériennes, à son origine physique, cherchant à mettre en évidence les paramètres morphométriques pertinents et l'effet des irrégularités d'embranchement de l'arbre bronchique sur la respiration dans les différentes régions pulmonaires. Optant pour une dichotomie irrégulière, comme Weibel et Gomez quelques 50 ans plus tard, il proposa pour décrire la relation pression-débit dans l'ensemble de l'arbre aérien (dont la pente représente la résistance aérodynamique) une formule très générale de type parabolique qui intègre les propriétés physiques du gaz respiré et les effets non linéaires associés aux changements de régime de l'écoulement (laminaire turbulent) (7). La nature de cette relation a été âprement discutée dans la littérature et des modèles aérodynamiques (développement de couche limite à chaque embranchement) ont été ultérieurement proposés (18, 19). Initiateur d'une approche fondamentale, Rohrer a également cherché à intégrer l'élasticité pulmonaire dans sa modélisation.

Ainsi, les travaux d'Ewald Weibel sur la physique de l'arbre aérien se situent à l'évidence dans le prolongement de l'œuvre de Rohrer. Le calcul des vitesses tout au long de l'arbre a permis de valider les hypothèses de Gomez, à savoir qu'à partir d'un certain niveau critique de l'arbre (environ la 16^{ème} génération en partant de la trachée), les vitesses d'écoulement du gaz sont si basses que le transport par diffusion domine (20). De cette observation et d'autres conclusions issues des mesures morphométriques découle la partition des voies aériennes en 3 zones proposée par Ewald Weibel, un concept qui fait toujours autorité en physiologie respiratoire : zones de conduction, de transition, et respiratoire (3).

Quant à l'architecture de l'arbre aérien, nous avons vu que l'analyse systématique de la géométrie par Ewald Weibel a démontré le caractère dichotomique de l'arbre bronchique humain. Ce caractère se retrouve également dans les zones périphériques des poumons de la

plupart des animaux, différant en cela nettement de la vision d'Aeby. Un décompte précis du nombre total de canaux alvéolaires dans 5 poumons humains a permis à Ewald Weibel de déterminer une gamme, $12-16 \cdot 10^6$, à partir de laquelle a pu être estimé un nombre total de générations dichotomiques : 23 en moyenne (4). L'évolution des diamètres et longueurs en fonction de la génération, estimée sur un moulage en plastique de l'arbre aérien comportant plus de 1000 bronches, a abouti à plusieurs découvertes : l'irrégularité de la dichotomie des voies aériennes, le rapport longueur/diamètre quasi constant à chaque génération, la distribution des longueurs et diamètres à travers les générations. Finalement, deux modèles ont été proposés pour synthétiser ces découvertes : un modèle dit « A », à dichotomie régulière et un modèle dit « B », à dichotomie irrégulière (3, 4). Le modèle « A » est ainsi devenu une référence très largement employée pour représenter les voies aériennes tandis que le modèle « B », plus réaliste, a été paradoxalement moins utilisé.

Une loi très générale a par ailleurs été mise en évidence, permettant de décrire l'évolution du diamètre à chaque génération « n » dans les voies aériennes conductrices. Elle énonce que le rapport entre diamètres de bronches appartenant à des générations consécutives est quasi constant : $D_{n+1}/D_n \approx 2^{1/3} \approx 0,79$ (4) ce qui correspond à la loi de Hess-Murray initialement formulée dans des travaux portant sur le système artériel (21, 22). Cette loi traduit en fait le caractère « auto-similaire » de l'arbre trachéobronchique (23, 24). En revanche, dans la zone de transition et la zone respiratoire, l'évolution du diamètre à chaque génération est bien plus faible. Ces mêmes travaux morphométriques ont enfin démontré l'augmentation considérable (géométrique) de la section cumulée le long de l'arbre, la dite section atteignant 1 m^2 au niveau des canaux alvéolaires périphériques.

Le modèle de l'arbre trachéobronchique élaboré par Ewald Weibel a ainsi établi un lien fort entre l'anatomie pulmonaire et la géométrie dite « fractale », cette géométrie inventée par le mathématicien Benoît Mandelbrot pour décrire

les objets « invariants d'échelle » (auto-similaires) qui reproduisent indéfiniment leur structure à l'intérieur d'eux-mêmes à des échelles toujours plus petites. Mandelbrot a ainsi proposé des arbres fractals (1977) capables de remplir un espace de façon homogène par une structure générique en « T » ou « Y », en conservant des branches de rapport d'aspect, autrement dit de rapport longueur/diamètre constant (25). Or l'analogie entre le modèle fractal et l'arbre respiratoire tel que mesuré par Weibel et Gomez est frappante. En effet, en dépit de grandes variations de dimensions, l'arbre aérien mesuré présente un rapport longueur/diamètre à peu près constant ($L/D=3,25$), ainsi qu'un rapport entre diamètres successifs à chaque embranchement d'environ 0,85 dans l'arbre trachéobronchique intermédiaire (3). Par ailleurs, ces relations s'étendent au-delà de l'espèce humaine, les variations observées de ces grandeurs géométriques entre espèces étant dues à la nécessité d'atteindre tous les points d'un l'espace à remplir dont la forme peut varier (26). Le caractère quasi-fractal de l'arbre aérien et des arbres vasculaires attenants est un exemple remarquable de structure biologique dont la géométrie est optimisée pour répondre au mieux à leur finalité physiologique (8).

D'autres auteurs ont proposé des modèles différents pour décrire l'arbre trachéobronchique. Ainsi, dans celui développé par Keith Horsfield (1968), le décompte des générations s'effectue à partir du bas de l'arbre, à l'inverse de l'arbre de Weibel (ou de Mandelbrot) dont la numérotation des générations part de la trachée. Ces deux modèles sont très différents conceptuellement. Si le premier facilite la prise en compte des asymétries, il aboutit cependant à dénombrer 25 générations dans les voies aériennes humaines (23) ce qui n'est finalement pas si différent des 23 générations dénombrées par Ewald Weibel. Quant aux rapports d'embranchement obtenus avec les deux modèles, ils sont très proches, ce qui signifie que les deux modèles sont largement compatibles malgré les différences d'approche.

La description quantitative de l'arbre trachéobronchique introduite par Ewald Weibel a joué un rôle primordial dans la modélisation pulmonaire. Non seulement elle a servi de fondation à l'élaboration de modèles informatiques, mais elle a permis pour la première fois d'effectuer des calculs simples et puissants pour évaluer les propriétés de transport de cette structure. Un travail réalisé en collaboration étroite avec Ewald Weibel a ainsi démontré que les lois d'échelle de l'arbre de conduction sont très proches de à celle d'un réseau de transport offrant le meilleur compromis entre perte d'énergie par friction et occupation volumique (24). Néanmoins, cette optimalité géométrique découlant de la nature quasi fractale de l'arbre bronchique doit également incorporer des critères de « robustesse », car de petites variations géométriques risquent d'induire de fortes variations des performances respiratoires. Ainsi, la géométrie pulmonaire moyenne offre bien une efficacité physique optimale mais tout en respectant une « marge de sécurité » qui empêche de rentrer dans la zone critique de fonctionnement.

Sur tous ces aspects, l'apport d'Ewald Weibel a été et reste déterminant. Il n'a pas simplement « décrit » le poumon, il a offert à la communauté scientifique un langage, en quelque sorte le vocabulaire et la grammaire du poumon qui permettent de la visualiser simplement, de le penser, de le manipuler. À charge pour les générations futures de poursuivre l'œuvre d'Ewald Weibel dans un domaine emblématique pour le biomécanicien : la physiologie respiratoire, dont les immenses applications intéressent tant la biologie moderne que la médecine et la clinique de demain.

Références

1. E. R. Weibel, in *Respiratory Physiology People and Ideas*, W. J.B., Ed. (Springer, New York, 1996).
2. C. T. Aeby. (Engelmann, Leipzig, 1880).
3. E. R. Weibel, *Morphometry of the Human Lung*. A. P. Springer-Verlag, Ed., (Academic Press, Berlin, New York, 1963).
4. E. R. Weibel, D. M. Gomez, Architecture of the human lung. Use of quantitative methods establishes fundamental relations between size and number of lung structures. *Science* **137**, 577-585 (1962).
5. E. R. Weibel, D. M. Gomez, A principle for counting tissue structures on random sections. *J Appl Physiol* **17**, 343-348 (1962).
6. M. Ochs *et al.*, The number of alveoli in the human lung. *Am J Respir Crit Care Med* **169**, 120-124 (2004).
7. F. Rohrer, Der Strömungswiderstand in den menschlichen atemwegen und der einfluss der unregelmässigen verzweigung des bronchialsystems auf den atmungsverlauf in verschiedenen lungenbezirken *Arch. Gesamte Physiol.* **162**, 225-299 (1915).
8. E. Weibel, in *Fractals in Biology and Medicine*, T. Nonnenmacher, G. A. Losa, E. R. Weibel, Eds. (Birkhäuser, Basel, 1994).
9. F. N. Low, The pulmonary alveolar epithelium of laboratory mammals and man. *Anat Rec* **117**, 241-263 (1953).
10. K. V. Neergaard, Neue Auffassungen über einen Grundbegriff der Atemmechanik. Die Retraktionskraft der Lunge, abhängig von der Oberflächenspannung der Alveole. *Z. Gesamte Exp. Med.* **66**, 1-22 (1929).
11. E. R. Weibel, J. Gil, Electron microscopic demonstration of an extracellular duplex lining layer of alveoli. *Respir Physiol* **4**, 42-57 (1968).
12. H. Bachofen, P. Gehr, E. R. Weibel, Alterations of mechanical properties and morphology in excised rabbit lungs rinsed with a detergent. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* **47**, 1002-1010 (1979).
13. P. Gehr, M. Bachofen, E. R. Weibel, The normal human lung: ultrastructure and morphometric estimation of diffusion capacity. *Respir Physiol* **32**, 121-140 (1978).
14. J. A. Dempsey, P. G. Hanson, K. S. Henderson, Exercise-induced arterial hypoxaemia in healthy human subjects at sea level. *J Physiol* **355**, 161-175 (1984).
15. P. D. Wagner *et al.*, Pulmonary gas exchange in humans exercising at sea level and simulated altitude. *J Appl Physiol (1985)* **61**, 260-270 (1986).
16. B. Sapoval, M. Filoche, E. R. Weibel, Smaller is better--but not too small: a physical scale for the design of the mammalian pulmonary acinus. *Proc Natl Acad Sci U S A* **99**, 10411-10416 (2002).
17. C. D. O'Malley, J. B. d. C. M. Saunders, *leonardo da Vinci on the human body* (H. Schuman, New York, 1952).
18. D. Isabey, H. K. Chang, Steady and unsteady pressure-flow relationships in central airways. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* **51**, 1338-1348 (1981).
19. D. Isabey, H. K. Chang, C. Delpuech, A. Harf, C. Hatzfeld, Dependence of central airway resistance on frequency and tidal volume: a model study. *J Appl Physiol (1985)* **61**, 113-126 (1986).
20. D. M. Gomez, A Physico-Mathematical Study of Lung Function in Normal Subjects and in Patients with Obstructive Pulmonary Diseases. *Med Thorac* **22**, 275-294 (1965).
21. W. R. Hess, Das Prinzip des kleinsten Kraftverbrauches im Dienste hämodynamischer Forschung. *Archiv für Anatomie und Physiologie*, 1-62 (1914).
22. C. D. Murray, The Physiological Principle of Minimum Work: I. The Vascular System and the Cost of Blood Volume. *Proc Natl Acad Sci U S A* **12**, 207-214 (1926).
23. K. Horsfield, G. Dart, D. E. Olson, G. F. Filley, G. Cumming, Models of the human bronchial tree. *J Appl Physiol* **31**, 207-217 (1971).
24. B. Mauroy, M. Filoche, E. R. Weibel, B. Sapoval, An optimal bronchial tree may be dangerous. *Nature* **427**, 633-636 (2004).
25. B. Mandelbrot, *The fractal geometry of nature*. Freeman, Ed., (New York, 1983).
26. T. R. Nelson, B. J. West, A. L. Goldberger, The fractal lung: universal and species-related scaling patterns. *Experientia* **46**, 251-254 (1990).

Annexes

Biographie E.R.Weibel :

- 1994 - Present: Emeritus Professor of Anatomy, University of Berne, Switzerland
- 1981-2002 Associate in the Museum of Comparative Zoology, Harvard University, Cambridge, MA., USA
- 1979-1981: Agassiz Visiting Professor in Comparative Biology, Harvard University, USA
- 1984 - 1985: Rector University of Berne
- 1974 Visiting Professor, Yale University, USA
- 1966 -1994: Professor and Chairman, Institute of Anatomy, University of Berne
- 1963-1966: Assistant Professor of Anatomy, University of Zürich, Switzerland
- 1961 - 1962 Research Associate, Rockefeller University, New York, USA, Dept. of Cell Biology (Prof. George E. Palade)
- 1959 - 1961 Research Associate, Cardiopulmonary Laboratory, Bellevue Hospital, College of Physicians and Surgeons, Columbia University, USA (Profs. Andre F. Cournand and Dickinson W. Richards)
- 1958 - 1959: Research Fellow, Yale University (Prof. Averill A. Liebow), USA
- 1955 - 1958: Assistant in Anatomy, University of Zürich, (Prof. Gian Töndury), Switzerland
- 1949 - 1955 Medical School in Zürich, Göttingen and Paris, graduated 1955 Zürich, Switzerland
- 1929 Year of birth

Honours and Awards

- Marcel-Benoist Prize (Swiss Federal Government) (1974)
- Honorary Fellow of the Royal Microscopical Society (1979)
- Felix Fleischner Medal (1979)
- Foreign Associate of the U.S. National Academy of Sciences (1981)
- College Medalist, American College of Chest Physicians (1982)
- Fellow, American Association for the Advancement of Science (1985)
- Anders Retzius Medal, Karolinska Institutet, Stockholm (1987)
- Member of Royal Society of Sciences of Uppsala (1987)
- H.R. Schinz Medal, (1988)
- Honorary Degree of Doctor of Science, University of Edinburgh (1988)

- Member of the Polska Akademia Nauk (1988)
- Member Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina (1989)
- Medal of Royal Microscopical Society (1989)
- Member Swiss Academy of Medical Sciences (1992),
- Jan Evangelista Purkinje Gold Medal, Prague (1993)
- Member Academia Europaea (1998)
- Honorary Doctor of Medicine, University of Geneva (1999)
- Honorary Foreign Member, American Academy of Arts and Sciences (2000)
- Honorary Member, Swiss Academy of Sciences (2000)
- Honorary Member, Swiss Academy of Medical Sciences (2004)
- Prix "La Recherche", Paris (2005)
- Educational Award, European Respiratory Society (2007)
- Honorary Member in Professional Societies: Société Française de Microscopie Electronique, International *Society for Stereology, American Physiological Society, Swiss Society of Radiology and Nuclear *Medicine, Swiss Society for Anatomy, Histology and Embryology.

Daniel ISABEY* (DR émérite CNRS)

daniel.isabey@inserm.fr,

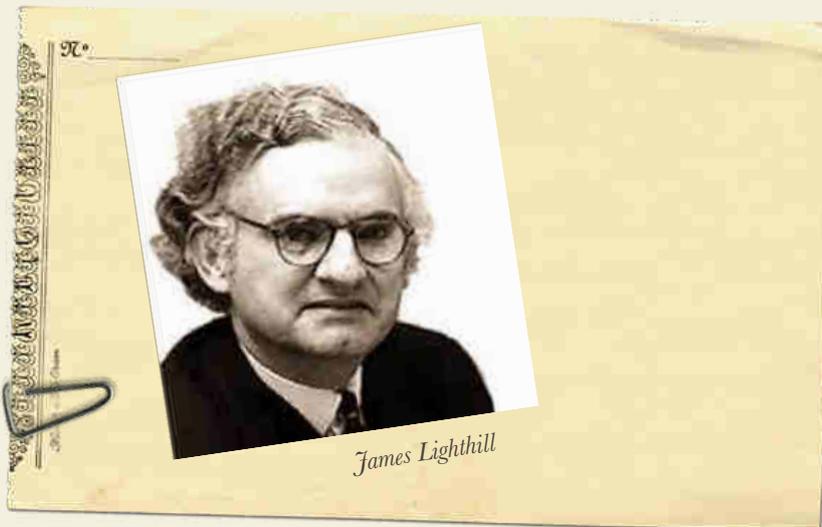
Bruno LOUIS* (CR Inserm)

bruno.louis@inserm.fr,

Marcel FILOCHE* & (DR CNRS, marcel.filoche@polytechnique.edu),

* Equipe Biomécanique & Appareil Respiratoire, ERL7240, Inserm U955, IMRB Créteil et

& Physique de la Matière Condensée, Ecole Polytechnique, Université Paris-Saclay, Palaiseau.



Chapitre 13 : **James Lighthill**

James Lighthill (1924-1998) : les fondements de la biomécanique des fluides

Biographie

James Lighthill est né à Paris le 23 Janvier 1924. Enfant précoce, doué d'une mémoire phénoménale, il a montré très tôt des dispositions exceptionnelles pour les mathématiques, la musique et les échecs. Après des études à Trinity College (Cambridge) et deux ans au National Physical Laboratory (NPL) pendant la deuxième guerre mondiale, il rejoint l'université de Manchester en 1946 où il participe à la création du premier centre intégré britannique d'enseignement et de recherche sur les mathématiques pures et appliquées. En 1959, il est nommé directeur du Royal Aircraft Establishment (RAE) où il impulse des projets de développement aéronautique (décollement vertical, avion supersonique - qui conduit éventuellement au Concorde, recherche spatiale). En 1964, il rejoint Imperial College (Londres) où il initie des activités de recherche sur les ondes et sur la biomécanique des fluides. En 1969, il quitte Londres pour rejoindre son alma mater, Cambridge, sur la chaire de

Professeur Lucasian de Mathématiques. Mais en 1979, considérant qu'il aurait plus d'impact en dirigeant un grosse entité d'enseignement et de recherche qu'en restant simple chercheur dans un université (si prestigieuse soit-elle), il prend la présidence de University College London (UCL), poste qu'il occupera jusqu'à sa retraite en 1989. Pendant ces dix années, il a fortement contribué au développement de UCL et a notamment favorisé l'accès à l'enseignement supérieur aux femmes : sous sa gouvernance, la part des femmes dans le corps professoral de UCL est passée de 4 à 15. Lighthill a terminé sa carrière tourbillonnante comme Chercheur Honoraire à UCL. Nageur émérite, il programmait chaque année une 'expédition natatoire' qui consistait souvent à effectuer le tour d'une île à la nage. Cette expédition était organisée avec soin après une étude approfondie des courants et des marées. Il eut de nombreuses aventures, comme le tour du Stromboli pendant une éruption du volcan... En Juillet 1998, alors qu'il terminait le tour de l'île de Sark, sa valve mitrale le lâcha... et il quitta ce monde avec panache.

Impact scientifique de Lighthill

Lighthill a consacré sa carrière à la modélisation mathématique rigoureuse de problèmes de mécanique des fluides. Après des débuts en aéronautique, il s'est intéressé à la propagation des ondes dans les fluides et a notamment créé le concept d'aéroacoustique (dans un article sans aucune référence). Par exemple, il a été le premier à démontrer que l'intensité du son généré par un jet turbulent était proportionnelle à la puissance 8 de la vitesse caractéristique... information qui a pu être mise à profit immédiatement par les ingénieurs pour réduire le bruit de leurs engins. Ses travaux dans ce domaine sont rassemblés dans le livre *Waves in Fluids* (1978), qui continue aujourd'hui à être un ouvrage de référence.

Cependant la communauté internationale des biomécaniciens le connaît surtout comme un des grands pionniers de la mécanique des fluides biologiques. Son intérêt pour ce sujet a été déclenché par le Prof. James Gray (Département de zoologie, Cambridge) qui lui a demandé son aide pour comprendre et analyser la natation animale. C'est ainsi que Lighthill a publié son premier article de biomécanique, où il étudie une sphère qui nage grâce à un champ de vitesse surfacique imposé (Lighthill 1952b). Ce modèle très idéalisé (!) a démontré pour la première fois qu'un mouvement irréversible de la surface était indispensable pour assurer une propulsion et que la vitesse de déplacement résultante était proportionnelle au carré de l'amplitude de la perturbation surfacique. Ce modèle a plus tard servi de base à l'un de ses étudiants pour analyser la propulsion ciliée d'un microorganisme (Blake, 1971). En même

temps, un autre de ses étudiants a formulé la théorie de la propulsion par flagelle (Hancock 1953). La théorie des corps élancés et des distributions de Stokeslet utilisée dans ces modèles est actuellement à la base de nombreuses simulations numériques.

Alors qu'il était Directeur du RAE et qu'il avait sans doute d'autres problèmes immédiats, Lighthill a fait une incursion dans le domaine de la zoologie et a publié le premier modèle de la nage d'un poisson qui se déplace à l'aide d'une ondulation à l'instar d'une anguille, un grand classique maintenant. En modélisant le poisson comme un corps élancé, il explique comment la poussée est générée par la réaction inertielle du fluide, soumis à l'accélération latérale créée par le mouvement de l'onde (Lighthill 1960). Un calcul de la dissipation d'énergie démontre que la poussée peut se calculer à partir du mouvement de la partie distale du poisson (la queue)... une bonne nouvelle pour les biologistes dans la mesure où elle leur simplifie le recueil de données !

C'est lorsqu'il reprend une carrière universitaire à Imperial College et à Cambridge, que Lighthill a révolutionné la biomécanique des fluides. Il écrit notamment plusieurs articles de revue essentiels, où il reprend, complète et généralise les différents résultats publiés (souvent par ses propres étudiants, auxquels il avait l'élégance de donner la primeur de la publication de leurs résultats en leur permettant de publier leur thèse sous leur seul nom). Ses contributions couvrent la propulsion aquatique (Lighthill 1969b) ou aérienne (Lighthill 1974, 1977), ainsi que la propulsion flagellaire des microorganismes

à petits nombres de Reynolds (Lighthill 1976). Dans chacune de ces revues, il conduit un recensement du règne animal auquel il s'intéresse pour s'assurer que tous les modes de locomotion sont bien couverts, au moins qualitativement, par l'analyse biomécanique qui est développée. Un exemple est montré sur la Figure 1 où ce recensement est effectué pour les microorganismes. Dans le cadre des écoulements physiologiques, la contribution essentielle de Lighthill est liée à la création, en collaboration avec Colin Caro, du Physiological Flow Studies Unit de Imperial College en 1966. Cette unité de recherche a immédiatement acquis une réputation et une influence internationales, notamment dans le domaine de l'athérosclérose et sa relation avec les interactions fluide-structure entre la paroi artérielle et l'écoulement sanguin. Sur le plan scientifique, il faut retenir la synthèse sur les écoulements physiologiques, présentée dans son ouvrage *Mathematical Biofluidynamics* (Lighthill 1975) et notamment le chapitre sur la propagation de l'onde de pression artérielle qui est un modèle de précision et de clarté.



Figure 1 : Le monde des microorganismes d'après Lighthill (1976, copyright ©1976 Society for Industrial and Applied Mathematics. Reprinted with permission. All rights reserved).

On ne peut passer sous silence les travaux de Lighthill sur la biomécanique de l'oreille interne qui ont été sa principale activité de recherche alors qu'il avait une lourde charge administrative. Il a démontré que la faculté des cellules ciliées de la cochlée pour capter les différentes fréquences sonores en fonction de leur distance à l'entrée, était associée à un phénomène d'absorption par la couche limite des ondes électroacoustiques dans l'organe (Lighthill 1981, 1991, 1992).

Conclusion

Lighthill a été un des scientifiques majeurs qui ont marqué le 20^{ème} siècle, à travers ses travaux sur l'aérodynamique supersonique, les couches limites, l'aéroacoustique, les ondes de choc et la biomécanique des fluides. Il reste dans notre mémoire pour la qualité, la pertinence et la clarté de ses analyses et de ses revues. Pour une analyse plus complète nous référons le lecteur à l'article de Pedley (2001).

Références

- Blake JR. 1971a. A spherical envelope approach to ciliary propulsion. *J. Fluid Mech.* 46:199–208
- Hancock GJ. 1953. The self-propulsion of microscopic organisms through liquids. *Proc. R. Soc. London A* 217:96–121
- Lighthill MJ. 1952b. On the squirming motion of nearly spherical deformable bodies through liquids at very small Reynolds numbers. *Commun. Pure Appl. Math.* 5:109–18
- Lighthill MJ. 1960b. Note on the swimming of slender fish. *J. Fluid Mech.* 9:305–17
- Lighthill MJ. 1969b. Hydromechanics of aquatic animal propulsion. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 1:413–46
- Lighthill J. 1974. Aerodynamic aspects of animal flight. *Fluid Sci. Lect., Br. Hydromech. Res. Assoc., R. Inst., London.* 30 pp.
- Lighthill J. 1975. *Mathematical Biofluidynamics.* Philadelphia, PA: SIAM. 281 pp.
- Lighthill J. 1976. Flagellar hydrodynamics. *SIAM Rev.* 18:161–230
- Lighthill J. 1977. Introduction to the scaling of aerial locomotion. In *Scale Effects in Animal Locomotion*, ed. TJ Pedley, pp. 365–404. London: Academic
- Lighthill J. 1978a. *Waves in Fluids.* Cambridge: Cambridge Univ. Press. 504 pp.
- Lighthill J. 1981. Energy flow in the cochlea. *J. Fluid Mech.* 106:149–213
- Lighthill J. 1991. Biomechanics of hearing sensitivity (the Rayleigh Lecture). *ASME J. Vib. Acoust.* 113:1–13
- Lighthill J. 1992. Acoustic streaming in the ear itself. *J. Fluid Mech.* 239:551–606
- Pedley T.J. 2001. James Lighthill and his contribution to fluid mechanics. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2001. 33:1–41

Dominique Barthes-Biesel¹ et

Timothy J. Pedley²

¹Biomécanique & Bioingénierie, UMR CNRS 7338

Sorbonne Universités, Université de Technologie de Compiègne, FRANCE

² Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, Centre for Mathematical Sciences, ROYAUME-UNI