

Un siècle de physique à travers un manuel à succès: le traité de physique de Ganot

Françoise Khantine - Langlois

Laboratoire Interdisciplinaire de Recherches en Didactique et Histoire des Sciences et des Techniques (LIRDHIST),
Université Claude Bernard Lyon 1, 43 Bd du 11 Novembre 1918, 69622 Villeurbanne Cedex
langlois @iuta.univ-lyon1.fr

Résumé

Suite à la réforme de 1852 faisant une plus large place à l'enseignement scientifique, de nombreux manuels de physique ont été édités au XIX^e siècle. Parmi eux, le *Traité de Physique* d'Adolphe Ganot a une place particulière. Alors que son auteur n'avait pas de statut universitaire, l'ouvrage a été traduit dans de nombreuses langues et a servi à l'enseignement de la physique dans le monde entier. C'est encore actuellement une référence pour tous ceux qui s'intéressent aux appareils de physique. Réédité pendant près de 80 ans, il fut le premier à présenter certaines caractéristiques de nos manuels actuels et a joué un rôle dans la propagation des théories nouvelles. Nous présentons ci-dessous les grandes caractéristiques novatrices de ce manuel et les raisons de sa popularité.

Mots- clés: Physique, manuels, histoire des sciences, Ganot

Abstract

In 1852, teaching was deeply modified in France and a larger place was given to scientific teaching. Consequently, numerous physics textbooks have been edited. Among them, the "Traité de Physique", from Adolphe Ganot, got a prominent place. Though the author did not get any academic position, his book was translated in numerous foreign languages and was used worldwide for physics teaching. Its still remains a reference for people interested in physics apparatus. Regularly republished for 80 years, this manual was the first one to exhibit some characteristics of our present textbooks and facilitated the propagation of the new theories. In this article are reported the main innovative features of this textbook and the reasons why it became so popular.

Keywords: Physics, textbooks, history of Sciences, Ganot

Le 19 mai 1853 le *Journal des Débats* publie le texte ci-dessous, signé Léon Foucault :

« M Ganot a fait hommage à l'Académie d'un petit traité élémentaire de physique expérimentale. Nous croyons devoir seconder les bonnes intentions de l'auteur en annonçant la seconde édition d'un charmant ouvrage rédigé simplement et sans autre prétention que celle d'arriver le plus directement possible à l'intelligence du lecteur. M Ganot a largement usé du secours qu'on peut tirer de la gravure sur bois, et l'on voit, en ouvrant son livre au hasard, qu'il s'est complu à représenter les appareils en action. Il n'y a qu'un pédantisme outré qui puisse s'offenser de cette satisfaction donnée à la curiosité des esprits distingués ; laissons donc les fâcheux murmurer contre les prétendus abus de la physique amusante ou plutôt contre la diffusion des lumières, et proclamons hautement l'importance des services rendus à la science par la publication des ouvrages illustrés à la manière de l'excellent traité de physique de M. Ganot. »

En écrivant ces quelques lignes, le célèbre physicien [1] n'imaginait sûrement pas que les prix Nobel Emilio Segré [2] ou Robert Millikan [3], l'ingénieur Arthur Krebs [4] ou l'écrivain russe Ivan Tourgueniev [5] citeraient la « physique de Ganot » dans leurs écrits et qu'en 1904, un critique écrirait encore « *le traité de physique de Ganot mis à jour par M.G.Maneuvrier, (...) est bien connu de nos lecteurs : il a déjà servi de guide dans l'étude de la physique à de nombreuses générations de lycéens.* » [6].

Il ne pouvait pas non plus prévoir que ce manuel servirait à l'enseignement de la physique du Japon au Brésil, en passant par l'Espagne et l'Angleterre, jusqu'au milieu du XX^e siècle [7], [8].

Qui était Adolphe Ganot ? D'où vient l'immense popularité de ce manuel, sa longévité et l'importance de sa diffusion ? C'est à ces questions que nous tentons de répondre.

Adolphe Ganot: un personnage mal connu

Le Grand dictionnaire Larousse du XIX^e siècle [9] mentionne uniquement :

« *Adolphe Ganot Physicien français, né à Rochefort en 1804. Il s'est adonné à l'enseignement des mathématiques et de la physique et s'est fait connaître par deux ouvrages classiques qui ont eu un grand succès. Ils sont intitulés "traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée et de météorologie" (...)...Et "cours de physique purement expérimentale" ».*

Pierre Binjamin (*sic*) Adolphe Ganot est né le 13 Floréal an XII (1804) à Rochefort, en Charente Maritime, et décédé à Paris en 1887. Sa famille était aisée et cultivée : son père était contrôleur des contributions, et son frère aîné instituteur. Bachelier ès-lettres et ès-sciences, comme souvent à cette époque, il enseigne quelque temps les mathématiques au collège royal de Bourbon-Vendée (ancêtre du lycée Edouard Herriot de La Roche-sur-Yon) tout en préparant l'agrégation. Des soucis de santé l'empêchent de se présenter au concours et de mauvaises relations avec son père le conduisent à

quitter sa région natale [10]. Il arrive à Paris en 1835 et enseigne la physique dans une école privée fondée par le chimiste Alexandre Baudrimont, puis ouvre son propre cours. Ces cours formaient des chimistes pour l'industrie et l'agriculture et préparaient au baccalauréat ès-sciences [11]. Au départ, c'est pour ses élèves que Ganot a rédigé son cours. Comme nous le verrons plus loin, l'évolution de l'enseignement scientifique va lui donner l'occasion de le publier. Il en fera ensuite l'œuvre de sa vie. En effet, comme il le rappelle au lecteur en 1882, dans la 18^e édition du traité, dernière des éditions qu'il a lui même publiées, il a été l'auteur-éditeur de ses ouvrages pendant 30 ans. Ceux ci ont été tirés à 204 000 exemplaires pour le *Traité* et 51 000 pour le *Cours*.

L'importance de ces tirages explique que l'on trouve facilement les ouvrages chez les bouquinistes ; le fait qu'ils soient souvent annotés et tachés indique qu'ils ont effectivement été utilisés par leurs propriétaires qui y tenaient parfois beaucoup, comme le montre un ex-libris sur la page de garde d'une 11^e édition rachetée par un américain à la Havane !

« My old school-book corresponding to this having been destroyed by the Great Chicago Fire in 1871, I take pleasure in replacing it by this volume which I discovered in a second hand store this 10th day of Sept. a.d. 1875 ; H.J. Birch. »

En 1882, Ganot cède à Hachette « *sa propriété littéraire et tout son matériel dont les figures existant dans la 18^e édition (bois et clichés)* » pour la somme très importante de 40 000 francs. C'est Georges Maneuvrier [12], qui se chargera de l'actualisation du manuel et l'ouvrage sera réédité en France jusqu'en 1931. Le contrat de cession à Hachette mentionne par ailleurs que des traductions ont été publiées en allemand, hollandais, espagnol, russe, anglais. Ces traductions ont été faites par des scientifiques reconnus, par exemple pour l'édition anglaise Edmund Atkinson, élève de Würtz et traducteur de Helmholtz. Elles ont aussi été éditées en grand nombre et régulièrement remises à jour au fur et à mesure des rééditions françaises. En dehors de ces traductions officielles, il existe aussi des traductions en turc, en polonais ou en suédois.

Comment travaillait Ganot ?

Difficile de le savoir puisque le traité ne comporte aucune préface expliquant les motivations et la philosophie de l'auteur. Il s'est évidemment inspiré des ouvrages existant : au hasard du texte, on trouve des références à des traités de spécialistes comme le « *traité de l'électricité statique en 2 vol.* » de Mascart, le « *traite élémentaire de la pile électrique* » par Alfred Niaudet, le « *traité de la météorologie* » de Becquerel ou à des communications à l'Académie des Sciences. On peut l'imaginer fréquentant cette institution, proche de chez lui, et lisant au fur et à mesure de leurs parutions tous les articles scientifiques.

Il est certain que Ganot n'a jamais fait de recherche lui-même, car à aucun moment ses ouvrages ne citent un travail personnel, contrairement à ceux de ses concurrents Drion et Fernet, par exemple [13].

Enfin, il faut remarquer que Ganot s'est strictement limité à un traité de physique ; bien qu'il se dise également professeur de mathématique, il n'a rien écrit dans ce domaine ; il n'a également rien écrit à propos de la chimie, science pourtant en plein développement à son époque.

S'il n'avait pas de références universitaires, Ganot avait en revanche une expérience pédagogique qui lui a permis de rédiger un ouvrage résolument tourné vers les élèves.

Un manuel innovant

Au début du XIX^e siècle, les manuels sont rédigés soit par les savants de l'époque, tels Becquerel ou Pouillet, soit par d'anciens élèves de l'école normale supérieure, enseignants ou inspecteurs.

C'est à l'occasion de la réforme des études de 1852 [14], [15] avec la création d'une section de sciences spécifique dotée de nouveaux programmes, qu' Adolphe Ganot publie la première édition d'un « *Traité élémentaire de physique expérimentale et appliquée* ».

Des gravures et une typographie agréables et plusieurs niveaux de lecture

L'ouvrage se distingue avant tout de ceux qui l'ont précédé par la présence « *de 360 belles gravures sur bois intercalées dans le texte* ». Ganot a eu l'heureuse idée d'exploiter au maximum la technique de la gravure sur bois de bout, mise au point au XVIII^e s et popularisée vers 1830. Cette technique, qui fut l'un des moteurs de l'expansion de l'édition au XIX^e siècle, permet d'intercaler les figures dans le texte au lieu de les grouper sur quelques planches dépliantes à la fin du livre. La lecture s'en trouve grandement facilitée comme le montrent les figures 1 et 2 ci-dessous, relatives à la capillarité et extraites l'une du manuel de Despretz (1842) [16] (le ménisque est au numéro 57) et l'autre du traité de Ganot. Ce procédé sera immédiatement repris par tous les auteurs mais on trouvera encore pendant longtemps la mention de « *gravures intercalées dans le texte* » au début des manuels.

figure 1 : une planche de gravure sur cuivre du manuel de Despretz

figure 2 : une page du *Traité* de Ganot

Alors que les pages de titre des ouvrages de Becquerel [17] ou de Pouillet [18] annoncent simplement qu'ils sont « *adoptés pour l'enseignement dans les collèges royaux* », celui de Ganot se déclare « *à l'usage des établissements d'instruction* », mais aussi « *des aspirants aux grades des Facultés et des candidats aux diverses écoles du Gouvernement* ». Il s'adresse donc directement aux élèves en leur offrant la possibilité de plusieurs niveaux de lecture puisqu'un avis signale que « *Les paragraphes et les chapitres marqués d'un astérisque (*) ne sont pas compris dans le nouveau programme d'enseignement, mais ils le sont dans les programmes des facultés de médecine et des facultés des sciences. Tout ce qui est imprimé en petit caractère sera omis par les lecteurs qui ne sont pas familiarisés avec le calcul algébrique* ».

Il faut aussi souligner l'utilisation systématique de diverses tailles de polices, de titres en caractères gras et d'italiques pour faciliter la lecture.

Des exercices corrigés et des annales

La seconde originalité technique du traité est la présence de nombreux problèmes corrigés. Adolphe Ganot fournit des énoncés d'exercices avec solutions dès l'édition de 1854. Certains de ces exercices sont inclus dans le texte avec leurs solutions détaillées et, à la fin du volume, ce sont de véritables annales qui sont publiées puisqu' on y trouve les sujets donnés à la faculté de Paris augmentés, dans chaque édition, de ceux des dernières années ; plus tard cette partie sera complétée par des sujets des facultés de province.

Des « *indications générales sur la résolution d'un problème de physique* », qui apparaissent dans la 12^e édition, sont particulièrement intéressantes. Les problèmes de physique y sont présentés comme de « *véritables problèmes de mathématiques mais dans lesquels c'est une loi physique qui lie les quantités connues à l'inconnue* » et un long texte explique comment utiliser le formalisme mathématique d'une loi pour déterminer une grandeur connaissant les autres. Ce texte existe toujours dans la 21^e édition en 1894, le mot « *mathématiques* » y est simplement remplacé par le mot « *algèbre* ».

Ces problèmes font partie des aspects du manuel loués par Millikan qui écrit :

« *Avery was essentially an abridged Ganot, the greatest virtue of which was found in the abundance of excellent problems at the end of each chapter. These were largely retained in the Avery text. Before fall came I had worked every problem in the book, and it was these problems that gave me my real understanding and love of the subject of physics* ». [3]

Les innovations techniques seront très vite intégrées par tous les éditeurs dans tous les manuels ; sur ce plan technique, le traité de Ganot perdra ainsi très vite son originalité. Il n'en sera pas de même pour sa deuxième particularité : la mise à jour permanente de son contenu qui explique les rééditions et la longévité de l'ouvrage.

Un contenu scientifique toujours réactualisé

Cette volonté est explicite dans le contrat de cession à Hachette [22] qui précise que « *MM. Hachette & Cie maintiendront à l'ouvrage son caractère scientifique actuel, mais à chaque édition ils le feront mettre au courant des progrès de la science par une personne qu'ils désigneront ...* ».

La volonté de Ganot de maintenir son texte à jour des développements, tant théoriques que techniques, de la science se traduit par un accroissement notable du nombre de pages, qui passera de 660 à 1100, mais aussi du nombre de gravures qui ira de 360 à un millier. L'ouvrage de Drion et Fernet n'augmente lui que de dix pages entre 1861 et 1886. Les nouveautés sont ajoutées au fur et à mesure de leur apparition, décrites de façon détaillée et annoncées sur la page de titre. Ainsi la 9^e édition (1860) est augmentée « *des travaux les plus récents sur l'acoustique, la lumière et l'électricité* », la 12^e (1866) « *de 30 gravures nouvelles dont plusieurs coupes à l'usage des élèves, le congélateur de M. Carré, divers appareils nouveaux de M. Tyndall, le calorimètre à mercure de MM Fabre et Silbermann, l'ophtalmoscope du Dr Helmholtz, le nouveau régulateur de la lumière électrique de M Foucault, les piles Callaud et Minotto, le pantélégraphe de M l'abbé Caselle, etc...* ».

Il s'écoule peu de temps entre la publication originale et son introduction dans le traité : par exemple, l'ophtalmoscope de Helmholtz a été décrit par ce dernier dans « *le traité d'optique physiologique* » publié en 1856. Dans la 15^e édition (1872) apparaît la machine électrique de Gramme inventée en 1869.

Cette actualisation permanente se traduit aussi par la suppression d'appareils dépassés ; c'est le cas du microscope à gaz - éclairé par « *de la chaux vive tenue incandescente par un jet de gaz hydrogène qui brûle au moyen d'un jet de gaz oxygène* » - représenté et décrit dans la 2^e édition et qui disparaît dès la 3^e édition.

Reflets des débats théoriques

Contrairement à nos manuels actuels, celui-ci reflète bien les débats qui agitent le monde scientifique et, à l'heure où l'on cherche tant à introduire la dimension historique dans l'enseignement de la physique, on peut constater que cette dimension est présente en permanence dans l'ouvrage de Ganot.

L'auteur n'expliquant jamais ses positions dans une préface, c'est la comparaison des éditions successives et des commentaires au sein du texte qui donnent des indications sur ses idées : il est conscient de l'évolution permanente des connaissances, mais aussi soucieux des contraintes de

l'enseignement et des risques liés à la divulgation de concepts trop nouveaux pour être admis définitivement.

Par exemple, la naissance de la spectrographie se traduit par une modification du paragraphe sur l'analyse chimique : le paragraphe de la 4^e édition (1856) « *On connaît aujourd'hui soixante deux substances élémentaires ou simples, c'est-à-dire dont l'analyse chimique ne parvient à extraire qu'une seule espèce de matière, mais il est possible que plus tard le nombre de ces substances augmente ou diminue, car on peut en découvrir de nouvelles comme il peut arriver qu'on parvienne à en décomposer plusieurs* » devient, dans la 14^e (1870), « *On connaissait depuis longtemps soixante deux substances élémentaires ou simples, c'est-à-dire dont l'analyse chimique n'extrait qu'une seule espèce de matière. En 1859, ce nombre a été augmenté de trois métaux nouveaux [19], découverts à l'aide d'une méthode d'analyse due à MM Bunsen et Kirchhoff, (..) En 1863, la même méthode a fait trouver un quatrième métal, l'indium, ce qui porte à soixante six le nombre des corps simples connus, mais il est probable que plusieurs d'entre eux sont composés* ».

Dans la seconde moitié du XIX^e siècle, on peut suivre l'évolution de l'interprétation théorique de la chaleur dans les éditions successives du *Traité*. La partie intitulée « *Calorique* » dans l'édition de 1866 devient « *Chaleur* » dans l'édition de 1872 avec un paragraphe supplémentaire intitulé « *Historique de la théorie dynamique de la chaleur* ».

Entre les deux, une note au début de la 14^e édition (1870) indique « *...., plusieurs théories nouvelles ont été introduites. La théorie dynamique de la chaleur a été exposée sous forme succincte et élémentaire. L'hypothèse des fluides impondérables, abandonnée de toutes parts, a été remplacée par celle d'un fluide unique. C'est une hypothèse substituée à une autre, il est vrai ; mais l'hypothèse nouvelle est plus simple et représente les idées dominantes aujourd'hui. Ajoutons que ces modifications ont été présentées avec la plus grande réserve, et de façon à ne pas troubler les habitudes de l'enseignement* ».

Cette préoccupation de ne pas perturber l'enseignement se retrouve à propos d'un autre domaine en pleine évolution au XIX^e siècle, l'électricité (5^e édition, p. 526) : « *la théorie de Symner sur les deux fluides électriques se prête avec une grande simplicité à l'explication des phénomènes : aussi est elle généralement admise dans les écoles, du moins en France. Cependant, on ne doit pas oublier que ce n'est là qu'une hypothèse. D'ailleurs il faut bien avouer tout ce qu'a de vague cette dénomination de fluide appliquée aux causes du calorique, de la lumière, du magnétisme et de l'électricité. Qu'est ce en effet qu'un fluide ? Quelle est sa nature ? Aucun physicien n'a donné de renseignement à ce sujet. On doit donc se borner à regarder l'hypothèse des deux fluides électriques comme exprimant deux états, dans lesquels l'électricité se présente sous l'aspect de deux forces égales et contraires tendant à se faire équilibre.* »

Cette introduction des théories récentes dans les manuels d'enseignement secondaire n'est à l'époque pas générale ; ainsi, alors que l'édition de 1866 possède un paragraphe intitulé « *loi d'Ohm* », le nom du physicien allemand n'apparaît pas dans l'ouvrage contemporain des inspecteurs Drion et Fernet. Ce parti pris d'actualité est encore signalé par la critique de 1904 : « *Dans la 22^e édition, qui vient de paraître, on a fait une place aux découvertes qui ont révolutionné en ces dernières années le champ de l'électricité et de l'optique, en particulier à celles de Röntgen et de Becquerel et de M. et Mme Curie* ».

Malgré les précautions de Ganot, ces modifications constantes posent des problèmes, comme le signale un traducteur brésilien confronté à des enseignants plutôt conservateurs [20].

L'influence du *Traité* est certaine puisque, pour certains historiens, [21] les ouvrages de Ganot ont largement contribué à répandre l'idée de la réalité des atomes et des molécules. En effet, les premières pages du manuel affirment dès la 2^e édition (1853) :

« Toute quantité de matière limitée est un corps. Les propriétés des corps font voir qu'ils ne sont point formés de matière continue, mais d'éléments pour ainsi dire infiniment petits, qui ne peuvent être divisés physiquement, et sont simplement juxtaposés sans se toucher, étant maintenus à distance par des attractions et des répulsions réciproques qu'on désigne sous le nom de forces moléculaires. Ces éléments des corps se nomment atomes. Un groupe d'atomes forme une molécule. Les corps ne sont que des agrégats de molécules ».

Conclusion

Les éditions posthumes publiées chez Hachette, bien que déclarées « *complètement refondues* » ne seront en fait que très progressivement modifiées. La structure générale de l'ouvrage subsistera, la volonté de décrire de nombreux dispositifs techniques demeurera et les développements du formalisme mathématique resteront limités, respectant ainsi « *l'esprit Ganot* ». Ainsi, l'empreinte du pédagogue novateur, du scientifique averti mais aussi de l'homme d'affaire avisé perdurera encore de nombreuses années au travers d'un ouvrage qui restera populaire jusqu'au premier quart du 20^e siècle et saura motiver des vocations de physiciens.

Références et notes

Les 13^e et 17^e éditions du *Traité* sont disponibles en ligne sur le site de la bibliothèque nationale de France (gallica.bnf.fr).

- [1] Léon Foucault a, deux ans plus tôt, réalisé au Panthéon la spectaculaire expérience du pendule mettant en évidence la rotation de la Terre.
- [2] Segré, E., *Les physiciens classiques et leurs découvertes*, Fayard, Paris ,**1987**, préface. Emilio Segré (Tivoli 1905 - Lafayette 1989), prix Nobel de physique 1959.
- [3] Millikan, R., *The Autobiography*, Prentice-Hall Inc., USA, **1951**, p. 14. Robert Millikan (Illinois 1868 - Californie 1953), prix Nobel de physique 1923.
- [4] Lettre au général de Montluisant en 1924, http://rbmn.waika9.com/Krebs_lettre.html, consulté le 13 février 2004. Arthur Constantin Krebs (1850-1935), ingénieur qui a conçu le moteur du sous-marin électrique français « le gymnote ».
- [5] Tourgueniev, I., *Père et fils*, La Pléiade, Gallimard, **1982**, p. 627.
- [6] Revue générale des sciences pures et appliquées, tome XV, Armand Colin, Paris, **1904**, p. 746.
- [7] Takata, S., *Ganot's textbooks of physics introduced into Japan*, Historia Scientiarum JPN, **1987**, N° 33, pp. 25-41.
- [8] Mattos,C. ,Gaspar,A. , *A origem das "propriedades gerais da materia" e a crença dos professores.* www.sbf1.if.usp.br/eventos/epf/viii/PDFs/CO23_2.pdf, consulté le 24 septembre 2002.
- [9] Larousse, P., *Grand dictionnaire du XIX^e siècle*, supplément tome 2, réédité par Christian Lacour éditeur, Nîmes, **1992**.
- [10] AHN-F17-20793
- [11] Micé, L., Discours d'ouverture de la séance publique du 19 Mai 1881 cité dans : Actes de l'académie de Bordeaux, 3^e sér. (1880) 729. D'après : Bensaude-Vincent, B.; Garcia Belemar, A.; Bertomeu Sanchez J.R., *La naissance d'une science des manuels (1789-1852)*, Editions des Archives Contemporaines, Paris, **2003**.
- [12] Georges Maneuvrier est de formation classique, normalien, agrégé et docteur. Il sera directeur du laboratoire de physique de la Sorbonne. Il sera secondé en 1908 par Marcel Billard, lui aussi agrégé et enseignant au lycée Charlemagne à Paris.
- [13] On ne trouve aucune phrase comme celle-ci, relevée dans Drion et Fernet : « *Plus récemment, MM Loir et Drion sont parvenus de même à condenser l'acide carbonique sous la pression de l'atmosphère* ». Drion, C., Fernet, E., *Traité de physique élémentaire*, Masson, Paris, 2^e éd. **1851**; 9^eéd. **1886**. Charles Drion, normalien, Docteur ès-sciences 1859, professeur au lycée St Louis (Paris) puis à la faculté de Besançon ;

Emile Fernet, normalien, professeur au lycée St Louis (Paris) puis inspecteur.

- [14] Hulin, N., *L'organisation de l'enseignement des sciences : la voie ouverte par le second empire*, Paris, Editions du C.T.H.S, **1989**.
- [15] Belhoste, B., *Les sciences dans l'enseignement secondaire français*, INRP, **1995**, edition economica, tome 1, 1789-1914, p. 46.
- [16] Depretz, C., *Traité de physique*, Méquignon-Marvis, Paris, **1836**.
- [17] Becquerel, *Traité de l'électricité et du magnétisme*, Firmin Didot, Paris, **1855**.
- [18] Pouillet, C., *Eléments de physique expérimentale et de météorologie*, Bechet jeune, Paris, **1844**.
- [19] Le césium, le rubidium et le thallium.
- [20] Vaquero, J.M., Santos, A., *Heat and Kinetic Theory in 19th-Century Physics Textbooks : the Case of Spain*, arXiv:physics/0002042 v1, 22 Feb **2000**, p. 3.
- [21] Yoda, J., *Ernst Mach's Vienna 1895-1930*, J Blackmore et al., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, **2001**, p. 18.
- [22] Archives de l'IMEC, référence HA C2 S30 B28 D21.

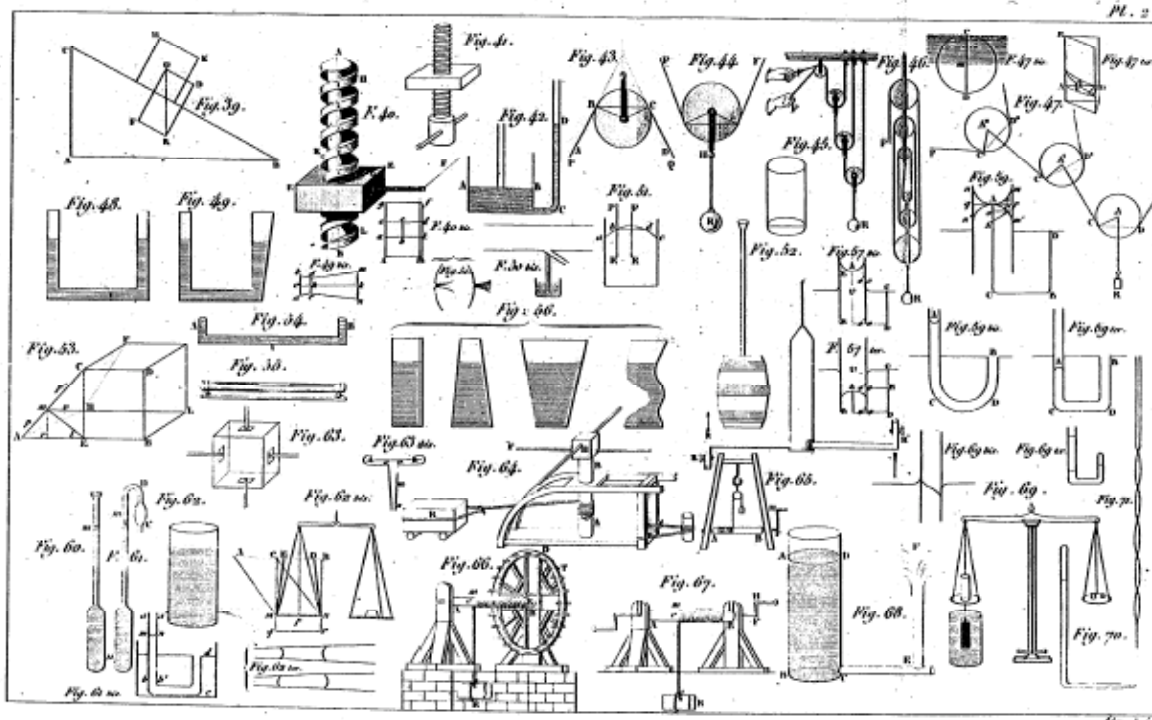


Figure 1 : une planche de gravure sur cuivre du manuel de Despretz

de la lame, qui s'exerce dans la direction mn . Or, selon les intensités respectives de ces forces, leur résultante peut prendre les trois positions suivantes :

1° Cette résultante est dirigée suivant la verticale mR (fig. 82); alors la surface en m est plane et horizontale, car, d'après les conditions d'équilibre des liquides (87), leur surface doit être perpendiculaire à la force qui sollicite leurs molécules.

2° La force n augmentant, ou F diminuant, la résultante R est dirigée dans

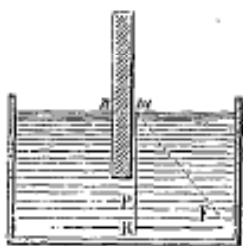


Fig. 82.

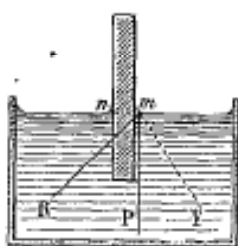


Fig. 83.

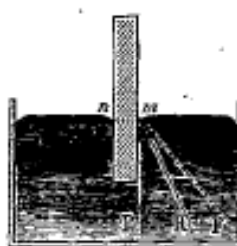


Fig. 84.

l'angle nmP (fig. 83); dans ce cas, la surface prend une direction inclinée perpendiculaire à mR , et elle est concave.

3° La force F augmentant, ou n diminuant, la résultante R prend la direction mR (fig. 84) dans l'angle PmF , et la surface, se disposant perpendiculairement à cette direction, devient convexe.

Le calcul montre que, dans le premier cas, l'attraction du liquide sur lui-même est double de celle du solide sur le liquide; dans le second cas, l'attraction du liquide est plus petite que le double de celle du solide; dans le troisième, elle est plus grande.

119. Influence de la courbure du liquide sur les phénomènes capillaires. — C'est de la forme concave ou convexe du ménisque que dépend l'ascension ou la dépression d'un liquide dans un tube capillaire. En effet, si l'on

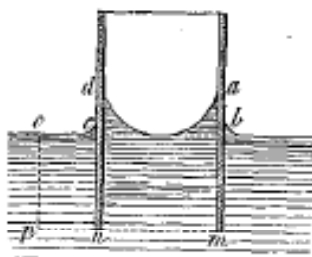


Fig. 85.

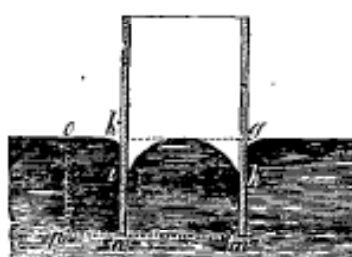


Fig. 86.

considère un ménisque concave $abcd$ (fig. 85), les molécules liquides de ce ménisque étant soutenues en équilibre par les forces qui les sollicitent (118), elles n'exercent aucune pression sur les couches inférieures; de plus, elles agissent, en vertu de l'attraction moléculaire, sur les couches inférieures les plus voisines, d'où il résulte que, sur une couche quelconque mn , considérée dans l'intérieur du tube, la pression est moindre que s'il n'y avait point de ménisque. Par conséquent, d'après les conditions d'équilibre des liquides (81 et 87), le liquide doit s'élever dans le tube jusqu'à ce que la pression intérieure sur la couche mn soit égale à la pression op , qui s'exerce extérieurement sur un point quelconque p de la même couche.

Dans le cas où le ménisque est convexe (fig. 86), l'équilibre existe encore, en