

La machine d'Atwood

Georges Atwood et sa machine pédagogique.

Par Françoise Khantine-Langlois, S2HEP, (francoise.langlois@univ-lyon1.fr)

Un des premiers programmes officiels d'enseignement de physique, daté du 30 novembre 1819 indique pour les élèves de philosophie des collèges royaux:

Démonstration de la chute des graves ; Description et usage de la machine d'Atwood.^[1] Les instructions pour l'équipement d'un cabinet de physique publiées peu après mentionnent *machine d'Atwood (Pixii) 650fr*

Un siècle plus tard le programme de 1911 préconise toujours la machine dans un contexte différent :

Établissement des lois fondamentales de la dynamique au moyen de la machine d'Atwood ou du plan incliné de Galilée ; application à la chute libre des corps ; Définition de la masse ; énoncé de la relation générale entre la force, la masse et l'accélération^[2].

Le programme de terminale de 1957 n'indique plus aucun dispositif mais la plupart des manuels de l'époque consacrent encore plusieurs pages à la machine d'Atwood. En quoi consiste cette machine ? Quelle est son histoire ? C'est ce que nous évoquons ici.

Le contexte de son invention

Georges Atwood (1745-1807), physicien anglais fut enseignant à Cambridge après avoir été étudiant dans ce même collège. Il fut élu membre de la Royal Society en 1776.

Son enseignement se plaçait résolument dans la tradition des physiciens anglais du 17^e siècle, tel Desaguliers dont s'inspira l'**abbé Nollet** pour faire ses célèbres *leçons de physique expérimentale*. Ses cours étaient réputés pour la qualité des démonstrations expérimentales qu'il y présentait et attiraient de nombreux auditeurs venus de l'Europe entière.

Parmi ceux-ci figurait un gentilhomme portugais **J.H. de Magellan** qui correspondait en français avec de nombreux savants européens. En 1780 il écrit une lettre de 39 pages à Monsieur Volta, professeur à Pavie, pour lui décrire

« *une machine nouvelle de dynamique inventée par M. Atwood avec laquelle on rend aisément sensible les loix du mouvement des corps en ligne droite et en rotation.[...]; avec un précis des expériences relatives à la première espèce de mouvement et la manière de les exécuter*». [3]

La description de l'appareil par Atwood lui – même ne sera publiée que plus tard, en 1884 dans un livre intitulé « *A treatise on the rectilinear motion and rotation of bodies ; with a description of original experiments relative to the subject* » [4]. Ce gros traité de mécanique de près de 400 pages contient d'abord cinq chapitres de théorie sur les mouvements et un chapitre consacré à l'écriture des rapports ; l'utilisation expérimentale de la machine n'apparaît qu'au chapitre 7 et précède trois chapitres sur les rotations. La lecture n'est pas toujours immédiate pour nous c'est pourquoi ci-dessous j'utiliserai le vocabulaire actuel.

Le cadre théorique de Georges Atwood est clairement la physique de Newton, mais en cette fin du XVIII^e siècle la vérification expérimentale des lois est limitée. Atwood en explique clairement les raisons. Il cite les résultats d'une expérience de chute libre réalisée par Desaguliers dans la cathédrale Saint Paul de Londres : une boule de plomb de 2 inch de

diamètre est arrivée au sol en 4,5 secondes, durée qui selon la théorie devrait correspondre à une chute libre de 325,6 pieds alors que la cathédrale n'en fait que 272. Cette différence est bien explicable par l'effet de la résistance de l'air. Mais il est impossible de travailler sur des hauteurs plus faibles car les durées de chute sont trop faibles pour être mesurables avec les instruments de l'époque.

L'autre dispositif possible est le plan incliné introduit par Galilée : la chute est ralentie, quelques mètres suffisent, l'effet de l'air devient négligeable, l'utilisation d'un objet sphérique ou cylindrique limite les frottements aux frottements de roulement mais ces frottements diffèrent selon la forme de l'objet.

Par ailleurs, comme pour la chute verticale, il est, d'une part impossible de mettre en mouvement une même masse avec des accélérations différentes ou inversement différentes masses avec la même accélération et, d'autre part le mouvement étant constamment accéléré on ne peut pas en mesurer la vitesse.

Toutes ces difficultés vont être surmontées par le dispositif inventé par Georges Atwood pour faire des démonstrations de cours.

Monsieur de Magellan l'écrit clairement dans sa lettre à Volta :

« Cette machine, (...), rend sensible les loix du mouvement uniformément accéléré ou retardé, de même que celles du mouvement uniforme, sans employer qu'un espace moindre de cinq pieds & demi, ce qui la rend extrêmement commode et très avantageuse dans un Cours de Physique. La simplicité et l'exactitude avec laquelle cette machine rend ce genre d'expériences à la portée des sens, sont encore son plus grand mérite ; car vous savez que les observations sur la chute des corps & l'accélération de

leurs vitesses demandent des opérations très délicates, fort difficiles & assez laborieuses: & ce qui plus est tout-à-fait impraticables dans un Cours régulier de Physique Expérimentale. »

Le principe

1. Machine d'Atwood. Accélération du mouvement et tension du fil dans le cas où l'on néglige la masse de la poulie et les frottements.

La figure 37 représente schématiquement une machine d'Atwood; sa légende en indique le fonctionnement.

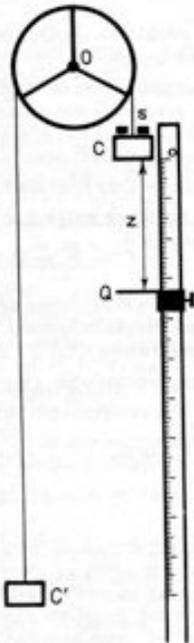


Fig. 37. — Machine d'Atwood.

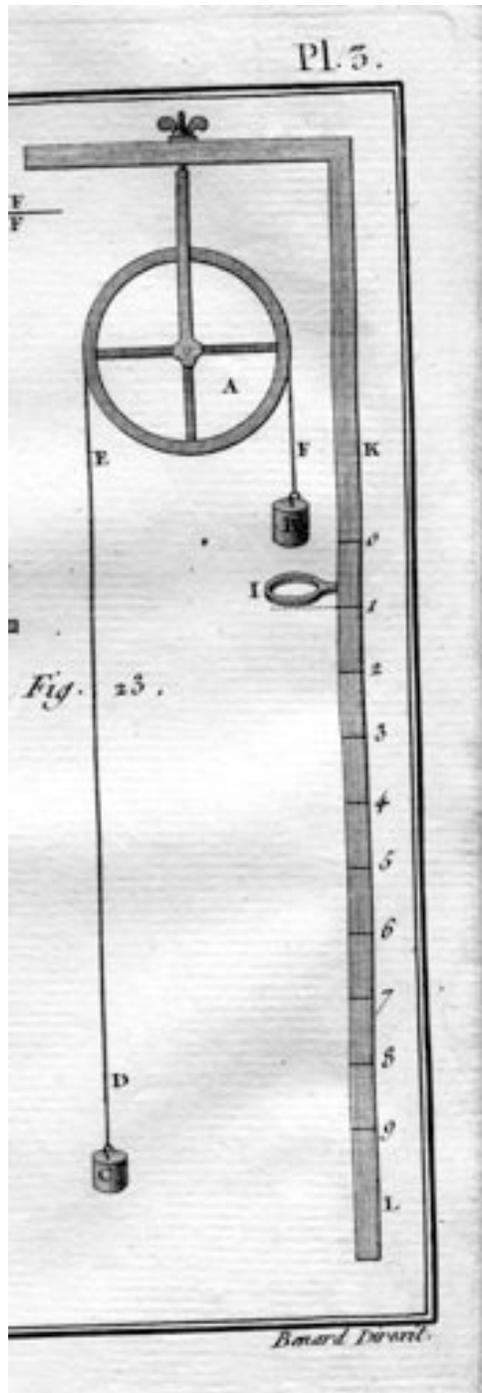
Deux cylindres identiques, C et C', sont reliés par un fil fin qui passe dans la gorge d'une poulie très légère, pouvant tourner (sans frottement appréciable) autour de son axe horizontal O.

Le cylindre C porte une surcharge s qui met tout le système en mouvement.

Les espaces parcourus se mesurent le long de la règle graduée, depuis le départ (au zéro) jusqu'au curseur plein Q. Un métronome donne les durées de ces parcours.

Cessac J., et Treherne G., Nathan, Paris, 1962

Le principe du dispositif est très simple [5] et il est exposé aussi bien dans l'ouvrage de **Mathurin Brisson** en 1800 (an VIII) que dans les manuels de terminale du XX^os



Brisson, M., *Traité élémentaire ou principes de physique*, Bossange, Masson & Besson, Paris, 1800 (an VIII), 3e éd.

La poulie et le fil étant supposés négligeables, si les deux masses sont égales elles ne peuvent être, selon le principe de l'inertie, que soit au repos, soit en mouvement uniforme. Si elles sont différentes, $m_2 = m_1 + m$, leur mouvement est uniformément accéléré avec une accélération égale à $a = mg / (m_2 + m_1)$

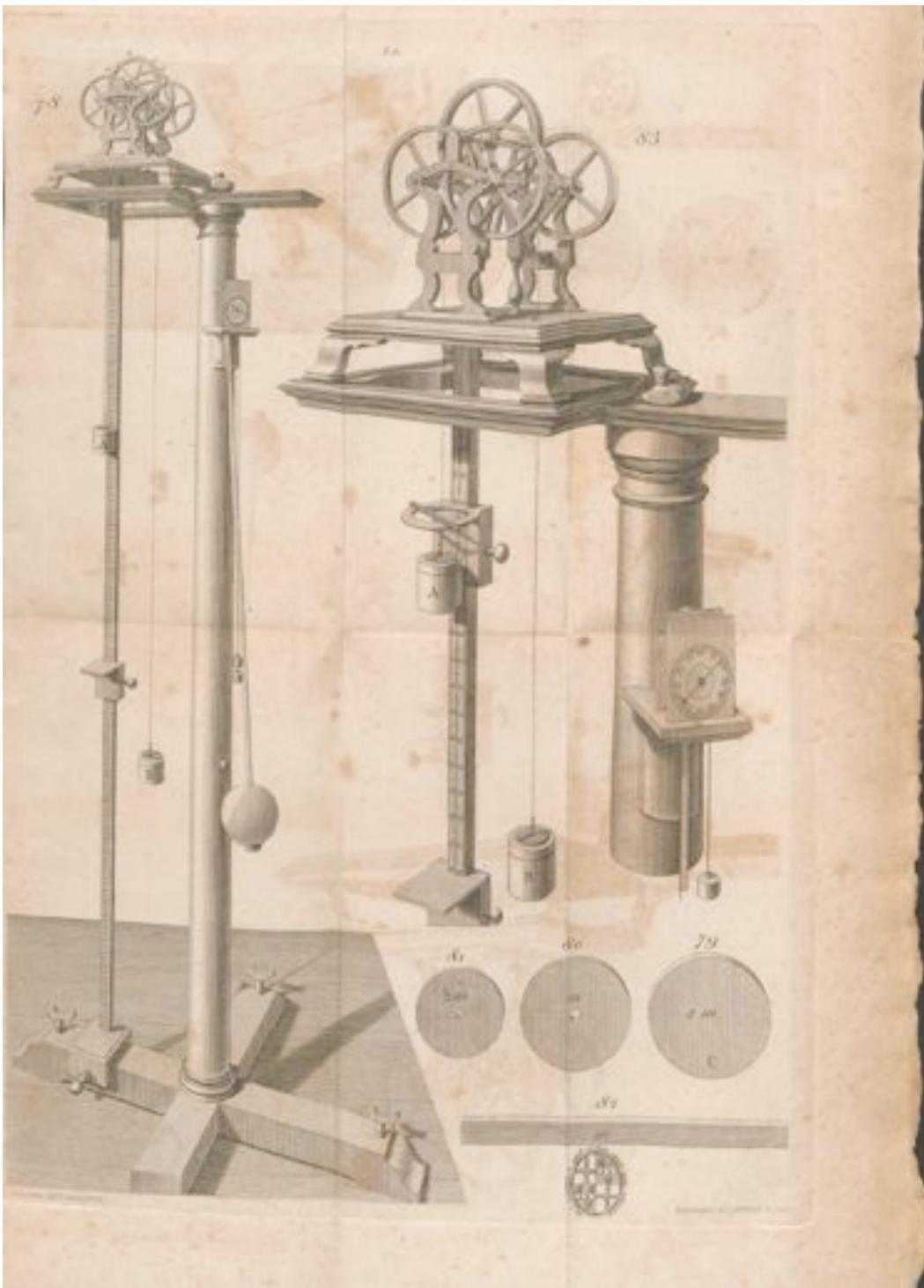
,ou g représente l'accélération de la pesanteur. Il est donc aisé de modifier l'accélération en conservant une masse constante pour l'ensemble : il suffit de répartir différemment la masse totale . Par ailleurs il suffit de supprimer la surcharge m pour revenir à un mouvement uniforme dont on sait mesurer la vitesse.

La théorie montre également qu'il est facile de tenir compte de la masse m de la poulie , si celle ci est bien répartie sur le cercle; Dans ce cas l'accélération devient $a = \frac{mg}{m_2 + m_1 + m}$

La machine réalisée pour Atwood

Le livre de Georges Atwood nous fournit une description complète de sa machine sous forme d'une belle gravure qui en donne une représentation détaillée.

L'objet a été réalisé dans les ateliers du constructeur Georges Adams, un des meilleurs de l'époque .



Extrait du livre d'Atwood

Cette gravure montre bien les différents éléments de la machine qui mesure environ 2m de haut :

0. Les poulies

- . La règle graduée et le détail des diverses masses.

0. L'horloge

Le système de poulies nous paraît très complexe, il a été proposé au 17^os par Desaguliers pour étudier les frottements ; il est en fait constitué de 5 poulies, 4 petites et une grande. L'axe de la grande poulie repose de chaque côté au point d'intersection de deux petites poulies. Ainsi on substitue au frottement de glissement un frottement de roulement beaucoup plus faible. Les poulies sont très fines et très légères de même que le fil de soie qui passe dans la gorge de la grande poulie.

La machine de l'université Lyon1 et le dispositif de poulies en partie d'origine , en partie refait :



Poulies du dispositif de Lyon1. Photo J.F.Jal



Machine d'Atwood de Lyon 1. Photo Michel Cuny

La règle graduée supporte des plaquettes et des anneaux horizontaux et mobiles. Les masses sont des rondelles de tailles diverses que l'on répartie de manière identique dans des boites qui passent facilement à travers les anneaux. Les plaquettes servent à arrêter le mouvement et les anneaux ont pour fonction de supprimer les surcharges rectangulaires, de longueur supérieure au diamètre des rondelles. Une fois la surcharge supprimée, les deux masses sont de nouveau égales et le mouvement accéléré redevient uniforme. La vitesse constante est celle acquise à l'instant où la surcharge a été enlevée. Il suffit de laisser le mouvement se poursuivre et de mesurer la distance parcourue pendant quelques secondes pour connaître cette vitesse. Enfin le dispositif de mesure du temps est une horloge à pendule dont le mouvement est entretenu par le système d'échappement, inventé vers 1650 et usuel au 18^e siècle. Si l'horloge émet clairement un 'top' à chaque battement elle ne permet guère de mesurer précisément des durées inférieures à la seconde, on ne peut l'arrêter facilement et elle n'enregistre pas la durée. Cet ensemble, pour bien fonctionner, suppose une réalisation technique de très haute qualité : en effet la machine doit être parfaitement verticale pour que les masses passent facilement dans les anneaux, la poulie doit être aussi régulière et légère que possible et les masses mesurées avec une grande précision. Dès la réalisation des troisième et quatrième exemplaires un levier a été ajoutée pour permettre le déclenchement simultané de l'horloge et du démarrage des masses. Mais rien de tel n'est possible au moment de l'arrêt.

L'utilisation

Dans son livre Atwood donne une cinquantaine d'exemple de problèmes vérifiables avec sa machine. Nous n'en donnons que deux exemples :

- . Pour vérifier la proportionnalité de la distance au carré du temps la procédure

est la suivante :

0. Prévoir en utilisant la loi de la chute libre la distance x qui doit être parcourue en n secondes
0. placer la plaque d'arrêt à la distance x du point de départ démarrer sur un top du pendule
0. compter les tops de l'horloge. Le choc sur la plaque d'arrêt doit s'entendre en même temps que le n ème top.
 - . Répéter l'opération pour une autre valeur de n
0. Pour vérifier la relation de proportionnalité de la vitesse au temps est un peu plus délicat puisqu'il faut :
0. Placer l'anneau une distance correspondant à un nombre de secondes déterminé
0. Débloquer le système des masses seul
0. Lancer l'horloge juste au moment où la surcharge est arrêtée par l'anneau
0. Compter les 'top' sur la distance entre l'anneau et la plaque d'arrêt

Plusieurs essais sont nécessaires pour obtenir une distance anneau – arrêt correspondant à un nombre de secondes entier et permettre ainsi un calcul de la vitesse du mouvement uniforme.

Ces procédures nous paraissent complexes mais avec un peu d'entraînement on arrive à des résultats étonnants comme le montrent ceux obtenus avec la machine conservée dans la collection d'appareils anciens de physique de l'Université Lyon 1. Construite vers 1850 par Lecomte à Paris, elle a été remise en état par Jean François Jal[6]. Trois poulies ont été refaites à l'identique par Jean-Pierre Dubois à l'Observatoire de Lyon. Le dispositif de mesure du temps manquant a été remplacé un métronome réglé sur une seconde[7].

Installés dans le hall de la bibliothèque universitaire nous avons pu constater avec le public présent que :



Présentation dans le hall de la BU sciences (février 2013). Photo C.H. Vigouroux

Une surcharge de 200mg suffisait à mettre en mouvement des masses de 220 g chacune

La vérification de la loi de proportionnalité des espaces au temps nous a fourni une valeur de la masse de la poulie de 320g alors que sa pesée sur un balance Roberval a fourni 340g .

Le comptage à l'oreille des secondes était tout à fait satisfaisant et les résultats obtenus avec une précision de quelques pour cent.

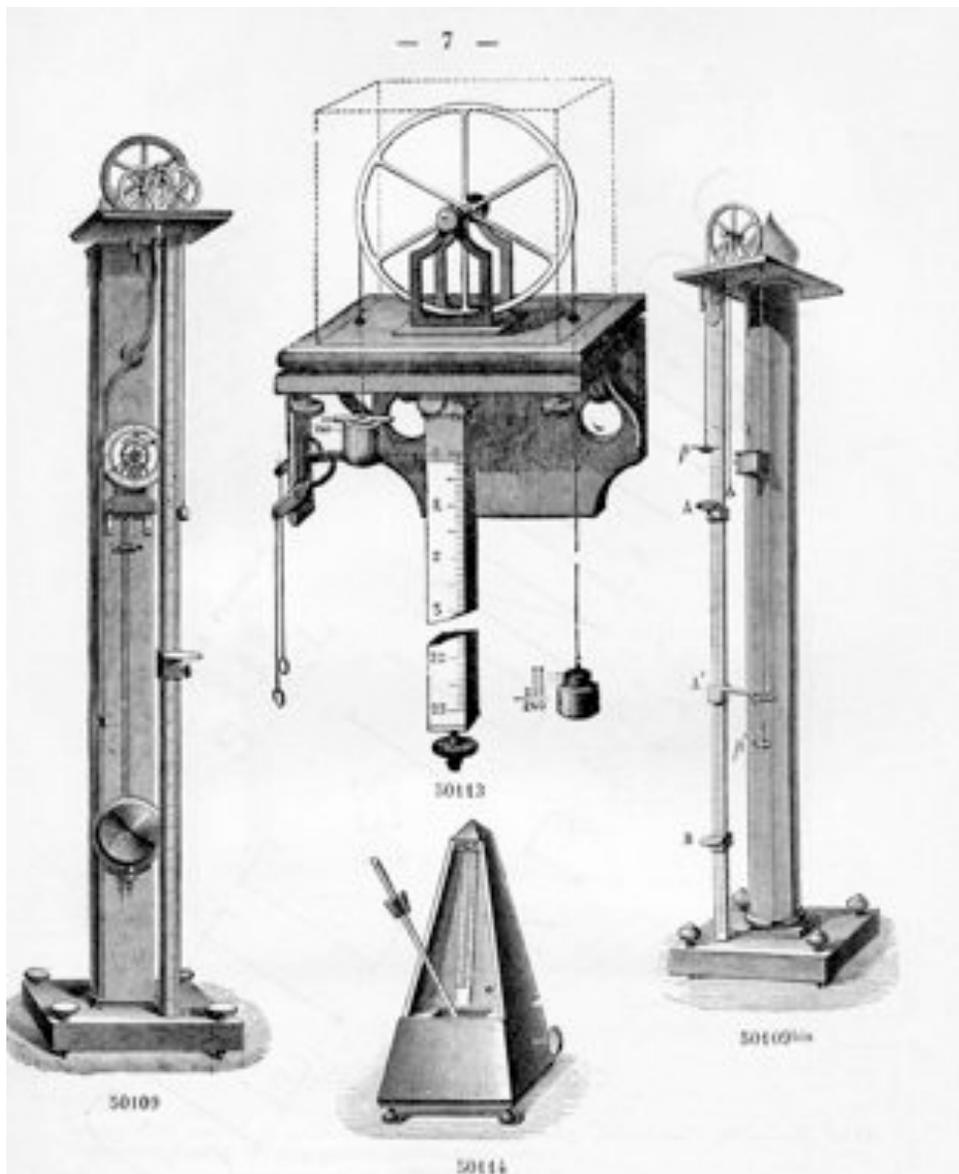
De nombreuses reproductions plus ou moins fidèles

Les enseignants ont tous vus l'intérêt du dispositif pour leurs cours. Ainsi Rouland qui réédite l'ouvrage de Sigaud de la Fond[8] en parle dès 1784 l'année même de la publication du livre d'Atwood, car il a eu connaissance de la machine par Magellan.

« Tout ceci est rendu sensible dans les expériences que l'on peut faire avec une machine dont M. G. Atwood, Membre de la Société royale de Londres, a depuis peu enrichi la Physique Expérimentale,(..). Je décrirai ici cette machine telle que je me la suis procurée, (...) et sans m'astreindre à l'ordre que M. de la Fond a établi dans cet ouvrage j'exposerai de suite quelques-uns des problèmes qu'il est possible de résoudre par ce moyen tant sur l'accélération que sur la retardation produites par la pesanteur dans le mouvement des corps auprès de la surface de la terre. »

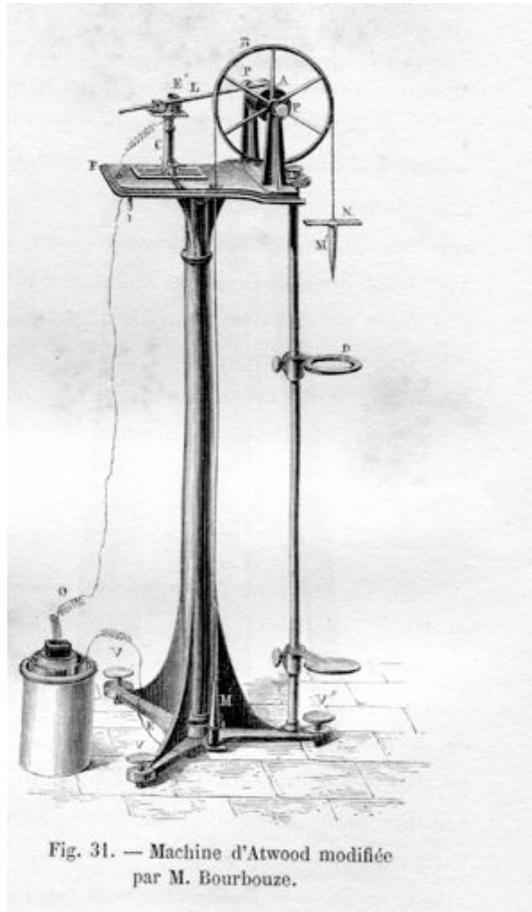
Cependant cette machine était onéreuse et très vite les constructeurs en ont proposé des modèles simplifiés, avec une simple poulie ou se suspendant au mur, des modèles modifiés au fur et à mesure des avancées technologiques : métronome à la place de l'horloge, poulie en aluminium système de déclenchement électrique et enfin des roulements à bille. Les

versions modernes étaient devenues suffisamment simple et légères pour être utilisées en séances de travaux pratiques ou il ne s'agissait que de retrouver rapidement des lois bien admises. Les images ci dessous donnent quelques exemples. Le catalogue de la société des lunetiers proposait tous les modèles : machine complète semblable à celle d'origine, machine avec une poulie simple , machine à suspendre, métronome pour la mesure du temps et prix variés.



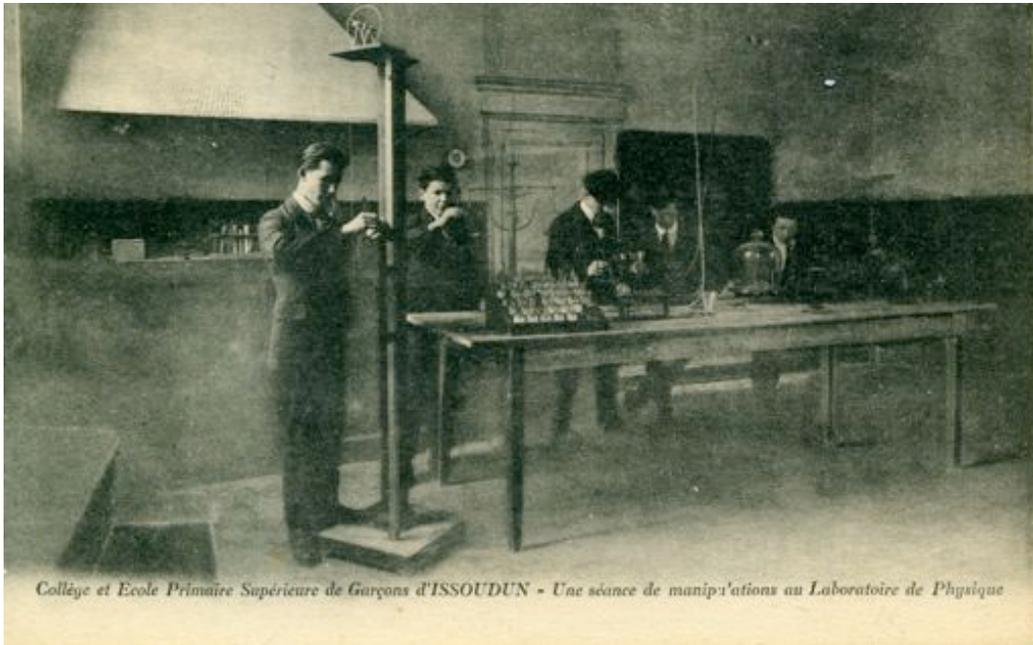
N°	CHUTE DES CORPS (Suite)	La pièce
50108	Appareil pour démontrer les propriétés de la cycloïde	80 "
50109	Machine d'Atwood à colonne, pendule à secondes (fig. 50109)	850 "
50109 ^{bis}	" " modèle simple, avec balancier battant la seconde sur un timbre, roue simple en aluminium (fig. 50109 bis)	400 "
50112	" " pour vérifier les lois de la chute des corps, modèle à règle se fixant au mur, roue en aluminium, sans métronome.	110 "
50113	Même modèle, le plateau à vis calantes, roue aluminium sous cage de verre (fig. 50113)	200 "
50114	Métronome pour les machines ci-dessus, plaque argentée indiquant la seconde, et demi-seconde (fig. 50114)	12 "

Tarif des instruments pour les sciences, physique Société des Lunetiers, Paris, 1908



Privat Deschanel Augustin, *Traité élémentaire de physique*. Hachette, Paris, 1869

Enfin on voit que la machine d'Atwood était suffisamment originale pour passer à la postérité sous forme de carte postale[9].



Bibliographie :

Atwood, George, **A treatise on the rectilinear motion and rotation of bodies; with a description of original experiments relative to the subject.**

Cambridge : printed by J. Archdeacon; for J. & J. Merrill, and J. Deighton, in Cambridge; and T. Cadell, London, 1784

S. Esposito , E.Schettino Spreading scientific philosophies with instruments: the case of Atwood's machine

[1] Belhoste,B., Les sciences dans l'enseignement secondaire français ,INRP, Paris,1995 .

[2] *ibid* p 695

[3] Magellan , J .H., Description d'une machine nouvelle, Richardon,Londres,1780

[4] Atwood,G., A treatise on the rectilinear motion and rotation of bodies,Cambridge,1784 en ligne sur e-lib.ch

[5] et il est mis en œuvre dans tous les ascenseurs à contrepoids

[6] Jean François Jal est professeur émérite à Lyon1

[7] Le métronome a été breveté en 1816 seulement

[8] Sigaud de la Fond, Description et usage d'un cabinet de physique, tome 1 page 143, Paris, 1784

[9] collection de Francis Gires