

Bibliothèque numérique

medic@

Marey, Etienne-Jules. - Le mouvement
des liquides étudié par la
chronophotographie

*In : Comptes rendus
hebdomadaires des séances de
l'Académie des Sciences, 1893,
116 : 913-924*



(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)
Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/histmed/medica/cote?marey172>

COMPTES RENDUS

DES SÉANCES

DE L'ACADEMIE DES SCIENCES.

SÉANCE DU LUNDI 1^{er} MAI 1893,

PRÉSIDÉE PAR M. LOEWY.

MÉMOIRES ET COMMUNICATIONS

DES MEMBRES ET DES CORRESPONDANTS DE L'ACADEMIE.

HYDRODYNAMIQUE EXPÉRIMENTALE. — *Le mouvement des liquides étudié par la Chronophotographie.* Note de M. MAREY.

« Une étude expérimentale de la locomotion dans l'eau exige qu'on puisse déterminer à la fois les mouvements de l'animal qui nage et ceux qu'il imprime au liquide dans lequel il se meut. Dans une Note précédente, j'ai montré que la Chronophotographie permet de suivre les phases du mouvement d'un poisson (¹); je vais indiquer aujourd'hui les conditions dans lesquelles cette méthode se prête à exprimer les mouvements qui se passent dans le liquide lui-même.

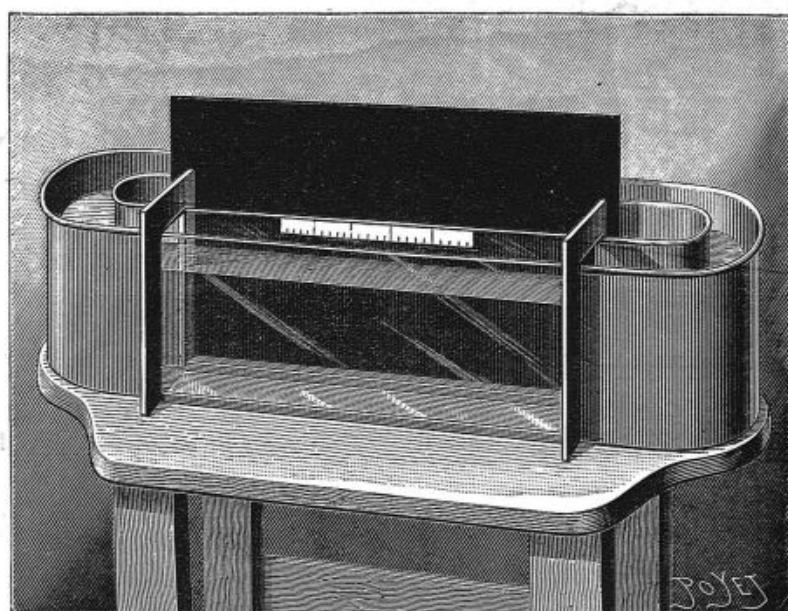
(¹) *De la natation de la Raie* (*Comptes rendus*, 16 janvier 1893).

» Les mathématiciens qui ont soumis à l'analyse les ondes qui se produisent à la surface de l'eau, les courants et remous qui se font dans sa profondeur, ont toujours regretté de n'avoir d'autre base expérimentale que les données, bien incertaines, que fournit la simple observation. Le jeu de la lumière à la surface de l'eau, l'agitation de petits corps tenus en suspension dans le liquide, sont des phénomènes trop fugitifs pour que notre œil puisse les apprécier exactement; c'est pourquoi j'ai tenté d'en fixer les caractères par la chronophotographie.

» La disposition que j'ai employée pourra servir aux physiciens comme aux physiologistes. Voici en quoi elle consiste :

» De l'eau est contenue dans un canal elliptique dont les parois, sur une partie de leur longueur, sont rectilignes et formées de glaces (*fig. 1*).

Fig. 1.



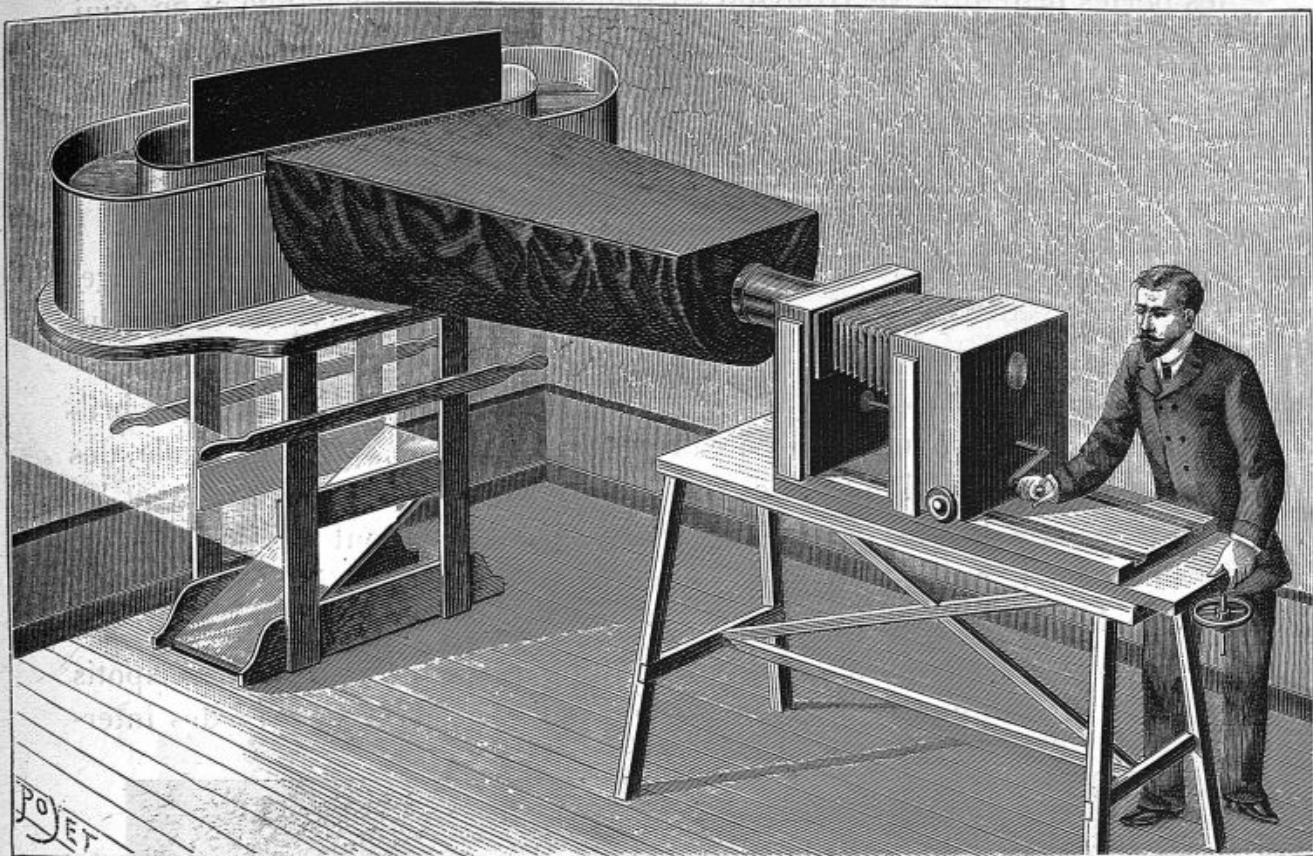
C'est dans cette partie transparente que les mouvements du liquide, rendus visibles ainsi qu'on va le dire, seront saisis par la photographie.

» Un champ obscur de velours noir est établi derrière la partie transparente du canal; en avant, des rideaux opaques (*fig. 2*) disposés en une sorte de pyramide creuse s'étendant jusqu'à l'objectif du chronophotographe et empêchant la lumière extérieure d'éclairer le liquide. Celui-ci est traversé de bas en haut par la lumière solaire que reflète un miroir incliné placé au niveau du sol.

» Si l'eau est parfaitement limpide, elle est traversée par la lumière

solaire sans en rien envoyer dans la direction de l'appareil photographique, sauf dans la partie de sa surface qui mouille la paroi de verre située du côté de l'appareil. En cet endroit, en effet, la capillarité forme un ménisque concave qui règne tout le long de la paroi. La lumière solaire

Fig. 2.



Disposition employée pour étudier, par la Chronophotographie, les mouvements qui se passent dans les liquides agités.

qui traverse l'eau éprouve sous ce ménisque une réflexion totale; aussi voit-on, sur la glace dépolie de l'appareil photographique, une ligne très brillante et très fine qui marque le niveau de l'eau et qui, se déplaçant avec lui, traduira sur les épreuves photographiques toutes les ondulations de la surface.

» Quand on veut saisir également les mouvements qui se passent à l'intérieur du liquide, on les rend visibles au moyen de petits corps brillants en suspension dans l'eau, et que la lumière solaire éclaire vivement. A cet effet, on fait fondre, en proportions convenables, de la cire, qui est moins dense que l'eau, et de la résine dont la densité est plus grande; puis, avec

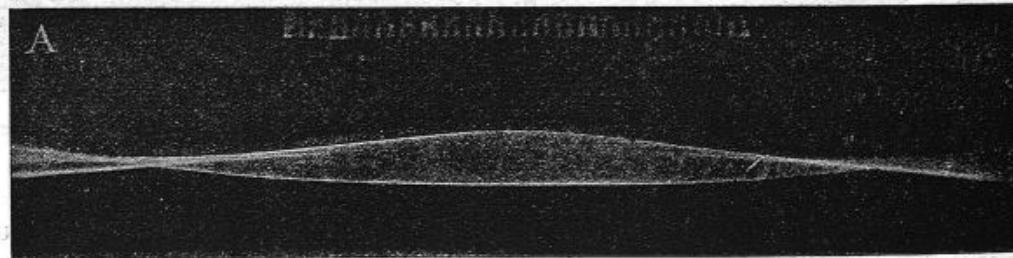
cette matière plastique, on fait un grand nombre de petites boules qu'on argente par le procédé en usage dans les pharmacies. Ces perles brillantes doivent être légèrement plus denses que l'eau douce, de manière que, si on les plonge, elles gagnent le fond avec lenteur. Il suffit alors d'ajouter graduellement dans le canal une certaine quantité d'eau salée pour que les perles brillantes se trouvent suspendues dans le mélange et en équilibre indifférent.

» Enfin, une règle centimétrique, dessinée sur du papier, est collée sur la paroi du cristal, au-dessus du niveau du liquide (*fig. 1*). Cette règle, qui se reproduira sur les images, servira d'échelle pour mesurer l'amplitude des mouvements photographiés.

» Avec ce dispositif on peut exécuter un grand nombre d'expériences sur le mouvement des liquides; j'en vais présenter quelques-unes sous forme de photogrammes.

» A. *Changements du profil des liquides dans les ondes.* — La ligne brillante qui marque le niveau de l'eau prend, lorsqu'on agite ce liquide, des inflexions qui rappellent celles des cordes vibrantes. Les ventres et les nœuds, c'est-à-dire les *crêtes* et les *creux*, tantôt occupent des points fixes, comme dans le *clapotis*, et tantôt se déplacent avec des vitesses variables, comme dans les *vagues* et la *houle*.

» La *fig. A* représente le mouvement sur place d'une onde de clapotis simple. On a obtenu ce mouvement en plongeant dans l'eau, à des inter-



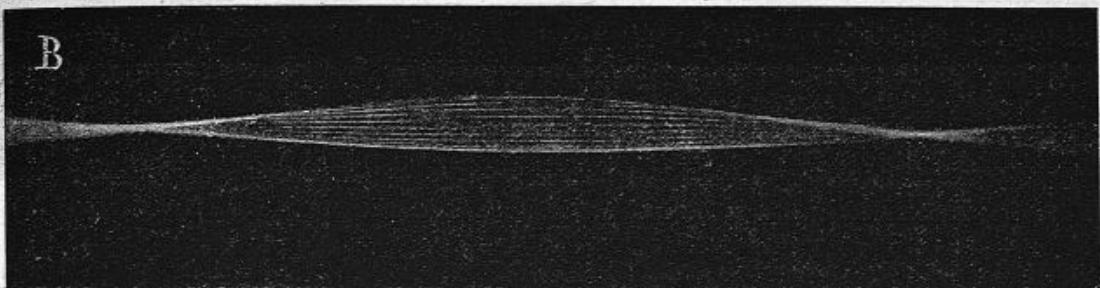
valles de temps égaux et convenablement réglés, un cylindre plein qui imprimait au liquide des oscillations régulières. Ces impulsions rythmées doivent être produites dans la partie du canal opposée à celle où le mouvement est étudié.

» L'objectif de l'appareil étant ouvert en permanence, la ligne brillante du niveau de l'eau a laissé la trace de son passage dans tous les lieux qu'elle a parcourus, mais avec une intensité plus grande aux points où sa vitesse était moindre : ainsi au voisinage de nœuds et aux points morts de

(917)

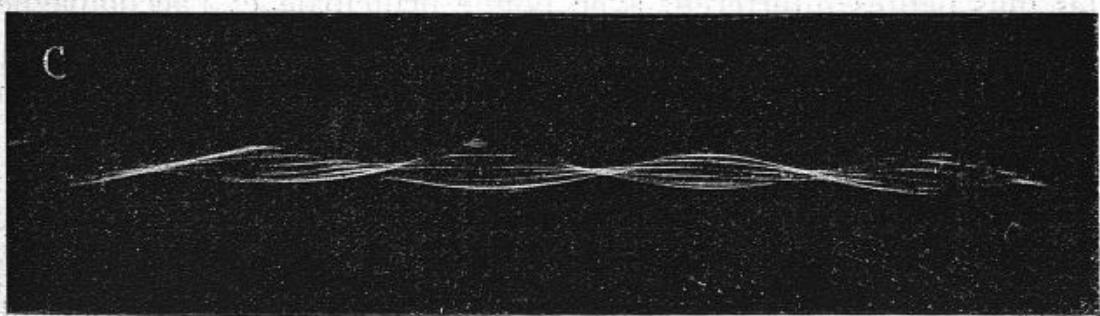
son oscillation, c'est-à-dire à la crête et au creux, où la vitesse, avant de changer de signe, passe par un minimum.

» Si l'on veut mieux connaître les changements de vitesse que présente le profil de l'onde aux différentes phases d'une oscillation simple, il faut recourir à la Chronophotographie (¹), c'est-à-dire admettre la lumière pendant des instants très courts et à des intervalles de temps réguliers. On obtient alors (*fig. B*) les positions successives du niveau du liquide.



Ces positions se traduisent par des courbes plus espacées au milieu de l'oscillation, plus rapprochées au voisinage des crêtes et des creux.

» Enfin, si l'on change la cadence du mouvement imprimé au liquide en l'accélérant d'une manière graduelle, on tombe dans d'autres périodes de clapotis où les ondes sont plus courtes, comme celles de la *fig. C*.

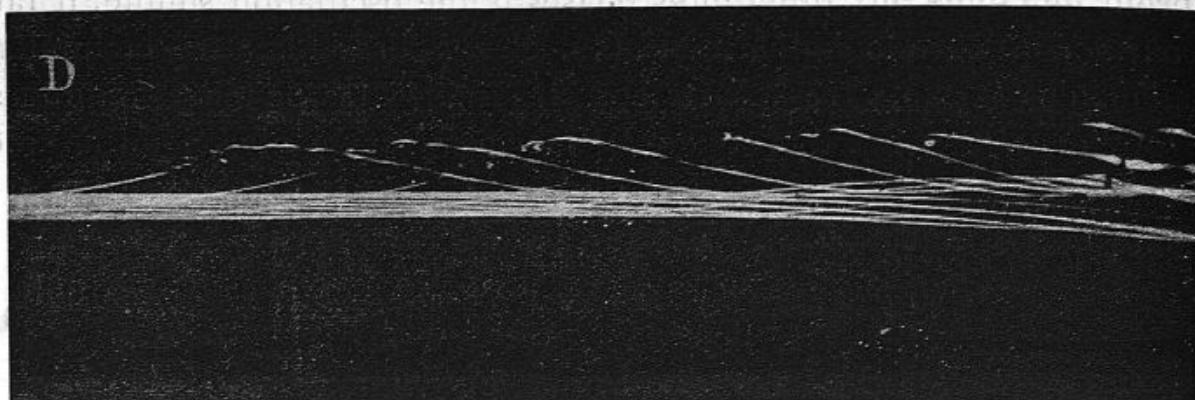


» Dans tous les cas, le profil de l'onde qui passe par les crêtes et les creux a la forme que les hydrauliciens lui ont assignée : celle d'une trochoïde.

» Les ondes animées de translation, vagues et houles, montrent sur les images chronophotographiques la vitesse de leur transport ainsi que leurs changements de forme et d'amplitude.

(¹) Voir pour la description de cette méthode, *Comptes rendus*, 7 août 1882.

» La *fig. D* représente, par la Chronophotographie, une vague produite de la manière suivante : le cylindre qui sert à mettre l'eau en mouvement est immergé dans le canal, à l'extrémité droite de la paroi de cristal, en



un point invisible à l'observateur. Quand l'agitation de l'eau est passée, on soulève ce cylindre, puis on le replonge brusquement. La série d'images qui se voient sur la *fig. D* correspond aux premiers instants du phénomène.

» C'est d'abord une suite d'abaissements progressifs du niveau de l'eau à mesure que le cylindre émerge; puis une brusque intumescence au moment où le cylindre est plongé de nouveau. Cette intumescence chemine vers la gauche de la figure en diminuant peu à peu de hauteur. Des ondes plus petites interfèrent avec l'onde principale et l'accompagnent dans sa marche.

» Comme le nombre des images était de 14 par seconde, on connaîtra la vitesse de l'onde à chaque instant en mesurant, d'après l'échelle métrique, le chemin parcouru par sa crête pendant chaque quatorzième de seconde, soit environ $0^m,16$, ce qui correspondait à une vitesse de $2^m,24$ à la seconde.

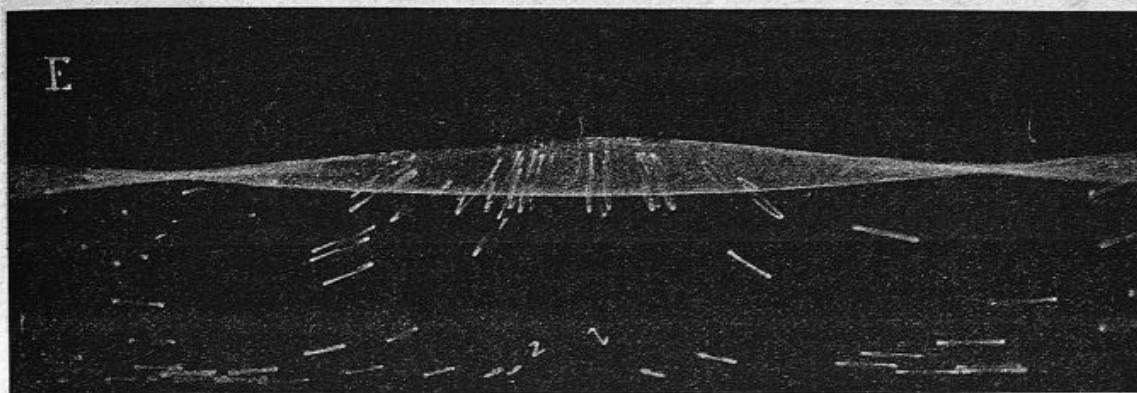
» Les ondes animées de translation donnent à la Chronophotographie des profils incomplets : le versant postérieur est le mieux marqué et parfois même le seul visible sur les images (¹).

» B. *Mouvements intérieurs du liquide dans les ondes.* — On répand en grand nombre, dans l'eau du canal, les perles brillantes dont il a été

(¹) Il semble que, par l'effet du transport de l'onde, le ménisque capillaire qui réfléchit la lumière du Soleil s'efface du côté où l'onde progresse, c'est-à-dire sur le versant antérieur.

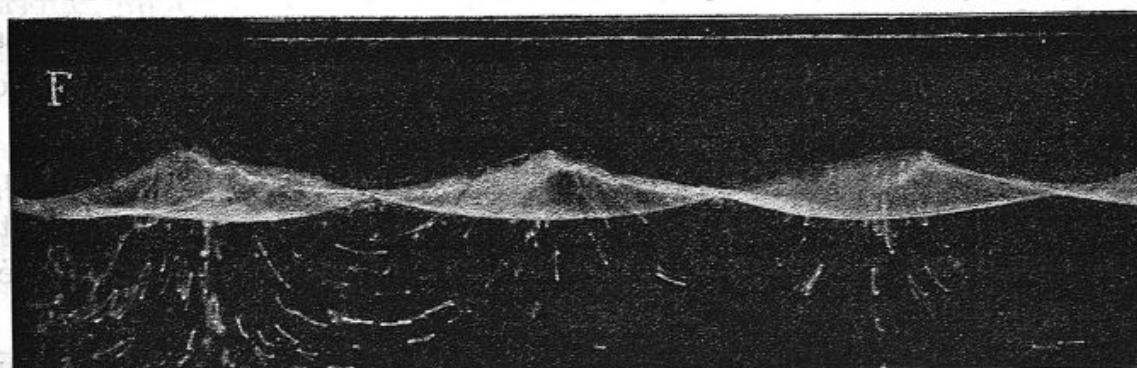
question plus haut. Si l'on reproduit alors les mouvements de clapotis ou de vagues, on obtient sur les photographies les trajectoires de ces perles dans les différentes parties de l'onde, c'est-à-dire les mouvements qu'éprouvent, en ces points, les molécules du liquide lui-même.

» Sur la figure E, on reconnaît, à son profil, l'onde de clapotis simple. A l'intérieur de cette onde, les molécules oscillent verticalement en face



des ventres, horizontalement aux nœuds, obliquement dans les positions intermédiaires.

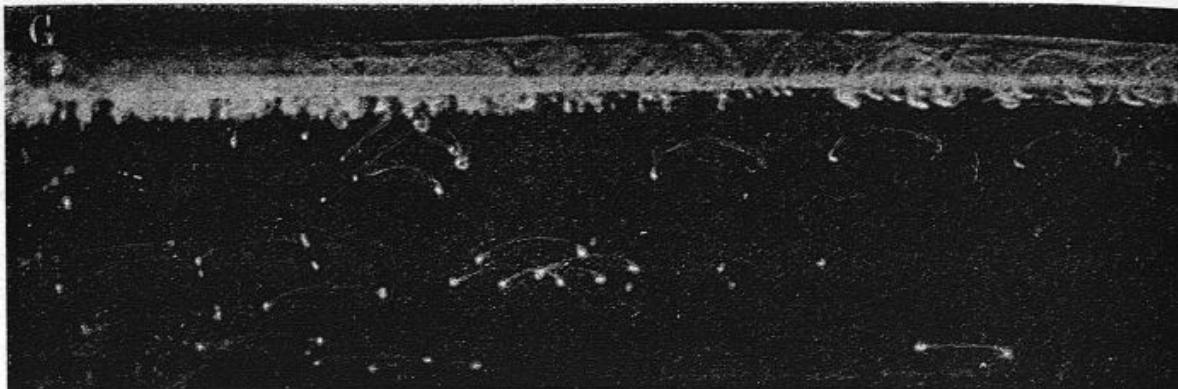
» Pour mieux suivre l'ensemble de ces mouvements intérieurs, produisons (*fig. F*) un clapotis de période plus courte.



» On voit alors comment les trajectoires des molécules se disposent suivant des courbes dont les centres sont aux nœuds. Ces expériences confirment les résultats donnés par les études analytiques de notre confrère M. Boussinesq.

» Dans les ondes qui cheminent, le mouvement intérieur des molécules est différent : ainsi la *fig. G* est produite par l'immersion brusque d'un cylindre dans le canal. L'onde marchait de droite à gauche; l'objectif a été ouvert en permanence.

» Les molécules de la surface décrivent des demi-ellipses dans un plan parallèle à la direction du transport de l'onde (¹). Dans les couches profondes du liquide, la courbe suivie par les molécules est de moins en moins



prononcée; au fond du canal, leur trajectoire finit par se réduire à une ligne presque droite.

» Quand on imprime au cylindre un mouvement de va et vient, comme dans le cas de la *fig. D*, les molécules décrivent à la surface du liquide des courbes fermées (²).

» *C. Courants et remous.* — La forme annulaire du canal permet d'y faire naître des courants continus au moyen d'une petite hélice immergée dans un point plus ou moins éloigné de celui où le mouvement s'observe. Les perles brillantes participant au mouvement du liquide lui-même permettent de déterminer, dans les différentes régions du courant, la trajectoire et la vitesse des molécules liquides.

» Pour obtenir la *fig. H*, on avait placé sur le trajet du courant un obstacle formé par une plaque de verre inclinée à 45° environ. Cette plaque, maintenue à frottement entre les deux parois de cristal, ne présente que sa tranche à l'objectif du chronophotographe.

» La plaque a été démasquée pendant trois secondes; la fréquence était

(¹) Les petites perles qui flottent à la surface de l'eau donnent leurs trajectoires sous deux aspects différents : tantôt c'est une ligne brillante et tantôt une ligne sombre. Ce dernier effet, assez singulier au premier abord, tient à ce que les perles flottantes qui touchent la paroi de cristal interrompent la continuité du ménisque capillaire qui brille à la surface de l'eau.

(²) Dans toutes ces expériences, pour obtenir des résultats bien exacts, il faudrait disposer d'un moteur mécanique pour imprimer les impulsions au liquide du canal. Les mouvements donnés à la main ont rarement la précision nécessaire.

de quarante-deux images par seconde; le courant marchait de droite à gauche.

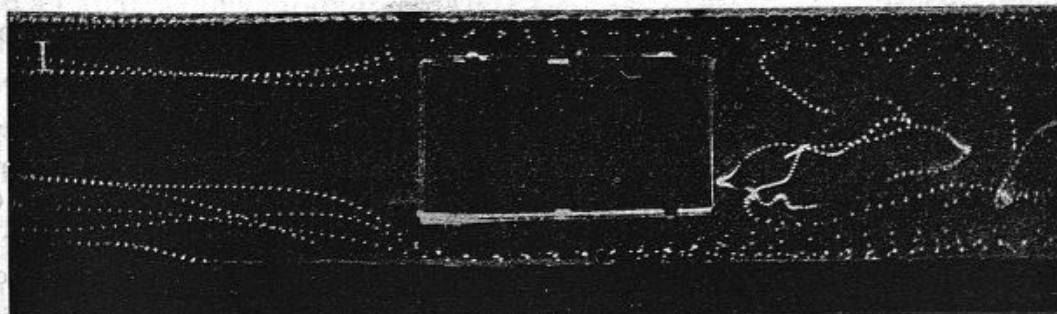
» Si nous ne considérons d'abord que les trajectoires des différents filets liquides, nous voyons que ceux-ci arrivent sur l'obstacle avec des directions plus ou moins obliques, et que, suivant la loi d'Avanzini, il se



fait un partage de ces filets près du bord inférieur du plan incliné. En arrière de l'obstacle, les filets de liquide exécutent des remous capricieux.

» Quant à la vitesse du liquide en chaque point, elle se déduit de l'écartement des images des perles. Celles-ci, parfois confondues en une trajectoire continue, expriment une grande lenteur du courant; d'autres fois, écartées les unes des autres, elles permettent de mesurer, d'après l'échelle métrique, le chemin parcouru en $\frac{1}{42}$ de seconde, c'est-à-dire la vitesse absolue du courant.

» Avec cette disposition, il est facile de mesurer l'influence qu'exercent sur le partage des filets liquides l'inclinaison du plan et la vitesse du courant. On peut aussi déterminer comment se comportent les filets liquides suivant la forme des obstacles qu'ils rencontrent. Ainsi, dans le cas représenté figure 1, l'obstacle était formé par une caisse, en forme de



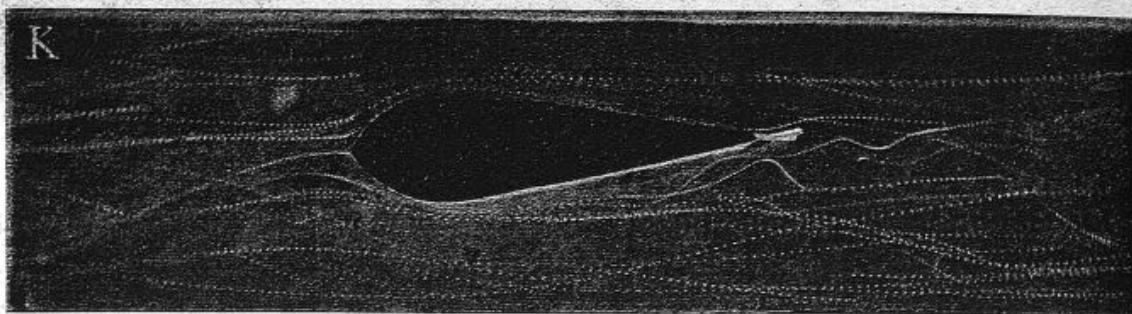
parallélépipède rectangle, immergée dans le canal, dont elle occupe toute la largeur. Les faces supérieure et inférieure de cette caisse étaient en

verre, pour laisser passer la lumière et éclairer les perles qui passaient au-dessus de la caisse; le courant allait de gauche à droite.

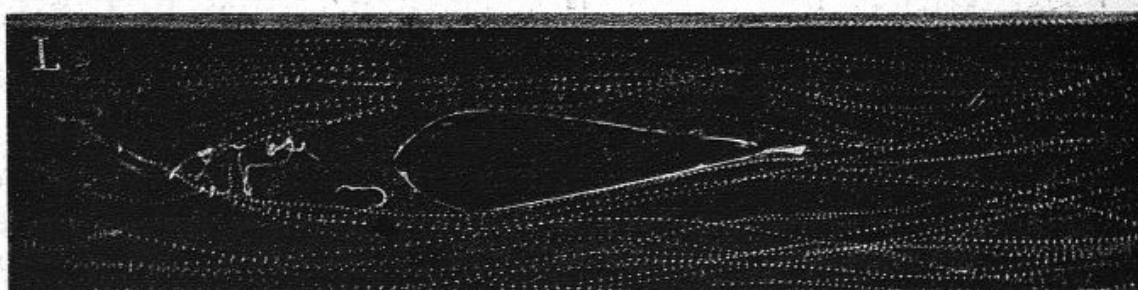
» En avant de la paroi verticale de la caisse, les filets liquides se partagent et, dès qu'ils commencent à s'infléchir, leur vitesse s'accroît; ils passent rapidement le long des bords de la caisse et vont former des remous en arrière.

» Les *fig.* K et L montrent comment le courant se comporte à la rencontre d'un corps pisciforme, c'est-à-dire d'un solide dont la coupe serait une sorte de fuseau inégalement effilé à ses deux extrémités (').

» Dans la *fig.* K, le courant rencontrait le corps pisciforme par son côté obtus; les veines fluides suivent les parois, et s'échappent à l'ar-



rière en présentant peu de déviation. Mais si l'on renverse le sens du courant de façon que le liquide aborde le corps pisciforme par son ex-



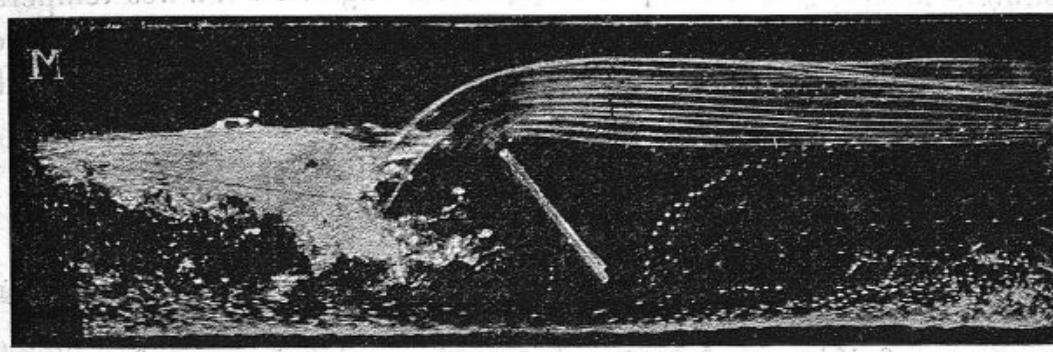
trémité la plus aiguë, le liquide, après avoir dépassé le maître-couple, forme des remous très prononcés (*fig. L*).

(¹) Ce solide immergé, devant laisser passer la lumière de bas en haut, était formé de deux joues d'ébonite; le profil de l'une d'elles est visible derrière la glace. Ces joues touchaient les parois du canal; une lame transparente de celluloïd, courbée suivant le contour de ces joues, y était soudée de manière à former une cavité close. La transparence insuffisante du celluloïd fait que les perles qui passent au-dessus du corps immergé sont moins éclairées que les autres, mais cependant encore visibles dans les chronophotogrammes.

» L'intensité des remous qui constituent une part de force vive peut être considérée comme un criterium des résistances que rencontrent les corps immergés dans un courant. Or on voit que la forme des poissons, dont l'extrémité antérieure est généralement obtuse et la postérieure très effilée, est parfaitement adaptée à la facilité de leurs mouvements dans l'eau. Car, d'après la plupart des auteurs, les conditions de la résistance des fluides sont réversibles, c'est-à-dire qu'elles sont les mêmes, à vitesse égale, pour des corps immobiles immergés dans un courant, et pour ces mêmes corps se mouvant dans un liquide immobile (¹).

» Quand le liquide est poussé avec violence contre un obstacle immergé près de sa surface, ce liquide se soulève et retombe en cascade de l'autre côté de l'obstacle. Ce phénomène fugitif, que l'œil ne peut suivre dans ses détails, est traduit avec toutes ses phases par la Chronophotographie.

» La *fig. M* montre, d'après les changements du niveau de l'eau, les phases successives de l'intumescence du liquide qui arrive sur l'obstacle,



tandis que les perles brillantes traduisent les mouvements des molécules dans les couches profondes du canal.

» Cette énumération sommaire des applications de la Chronophotographie à l'analyse des mouvements des liquides suffira pour montrer les ressources de cette méthode que j'applique actuellement à l'étude de la locomotion des animaux aquatiques.

» Les physiciens pourront peut-être aussi recourir à cette méthode pour contrôler certains points de la théorie des ondes et des courants et même

(¹) La Chronophotographie serait également applicable à l'étude des mouvements de l'air, et montrerait la façon dont les filets gazeux se comportent contre les obstacles de différentes formes. Une soufflerie, produisant dans un conduit à parois de verre une circulation d'air tenant en suspension des parcelles de duvet fortement éclairées, réaliserait les conditions nécessaires pour ces études.

pour étudier l'action des différentes sortes de propulseurs d'après les mouvements qu'ils impriment au liquide dans lequel ils se meuvent.

CHIMIE GÉNÉRALE. — *Détermination de la chaleur spécifique du bore.*

Note de MM. HENRI MOISSAN et HENRI GAUTIER.

« Les premières déterminations relatives à la chaleur spécifique du bore ont été exécutées par Regnault. Ce savant a obtenu la valeur numérique 0,2352 pour chaleur spécifique moyenne du bore graphitoïde entre 17° et 99° et 0,2574 pour celle du bore cristallisé entre 14° et 100°. Des expériences ultérieures de Kopp ont fourni les nombres 0,254 pour le bore amorphe entre 18° et 48° et 0,230 pour le bore cristallisé entre 21° et 51°. En calculant la chaleur atomique du bore au moyen de l'un quelconque de ces nombres on trouve un produit très éloigné de 6,4.

» Dans un travail qui avait pour but de rechercher si le carbone, le silicium et le bore ne suivaient pas la loi de Dulong et Petit à des températures différentes de celles où avaient opéré ses prédécesseurs, Weber effectua un certain nombre de déterminations de la chaleur spécifique du bore. Les expériences ont porté exclusivement sur le bore cristallisé, et le Tableau suivant résume les valeurs numériques qu'il a obtenues.

Intervalle de tem-

peratures	-79°, 2 à 0°	0° à 53°, 32	0° à 100°, 06	0° à 151°, 6	0° à 202°, 9	0° à 263°, 6
Chaleur spécifique moyenne.....	0,1915	0,2382	0,2548	0,2725	0,2890	0,3068

» On peut représenter graphiquement ces résultats, en prenant pour abscisses les températures et pour ordonnées les quantités de chaleur nécessaires pour porter l'unité de poids de 0 à t ; on obtient ainsi une courbe dont la courbure est assez faible pour que l'on puisse considérer le coefficient angulaire de la corde joignant les points relatifs aux températures t_1 et t_2 , comme représentant la chaleur spécifique à la température $\frac{t_1 + t_2}{2}$ si t_1 et t_2 sont peu éloignées. En opérant ainsi Weber a donné les nombres suivants :

Température.....	-39°, 6	26°, 6	76°, 7	125°, 8	177°, 2	233°, 2
Chaleur spécifique.....	0,1915	0,2382	0,2737	0,3069	0,3378	0,3663
Chaleur atomique	1,106	12,620	3,010	3,375	3,715	4,029