

*Bibliothèque numérique*

**medic@**

**Marey, Etienne-Jules. -  
Hydrodynamique expérimentale: le  
mouvement des liquides étudié par la  
chronophotographie**

*In : La nature : revue des  
sciences et de leurs  
applications aux arts et à  
l'industrie, 1893, 6 mai, p.  
359-363*



**(c) Bibliothèque interuniversitaire de médecine (Paris)**  
Adresse permanente : <http://www.bium.univ-paris5.fr/hist-med/medica/cote?marey013>

## HYDRODYNAMIQUE EXPÉRIMENTALE

LE MOUVEMENT DES LIQUIDES

ÉTUDIÉ PAR LA CHRONOPHOTOGRAPHIE

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 un article précédent, j'ai montré que la chronophotographie permet de suivre les phases du mouvement d'un poisson<sup>1</sup>; 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.

Les mathématiciens 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, mais ils ont toujours regretté de n'avoir d'autres bases expérimentales 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. Elle est représentée par les figures 1 et 2. 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 formés de glaces (fig. 2). 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, disposés en une sorte de pyramide creuse, s'étendent jusqu'à l'objectif du chronophotographe en 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 la 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 qui a traversé 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, 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 y 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 tiennent suspendues dans le mélange et en équilibre indifférent.

Enfin, une règle centimétrique dessinée sur du papier est collée sur la paroi de cristal, au-dessus du niveau du liquide (fig. 2). 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 photographies.

*Changement du profil des liquides dans les ondes.* — La ligne brillante qui marque le niveau de l'eau, prend, lorsqu'on agite le 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 figure A (page 561) représente le mouvement sur place d'une onde de clapotis simple. On a obtenu ce mouvement en plongeant dans l'eau, à des intervalles 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 des nœuds et aux points morts de 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<sup>2</sup>, 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

<sup>1</sup> *Mouvements de natation de la raie*, n° 1029, du 18 février 1895, p. 177.

<sup>2</sup> Voy. n° 974, du 30 janvier 1892, p. 155.



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 figure 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.

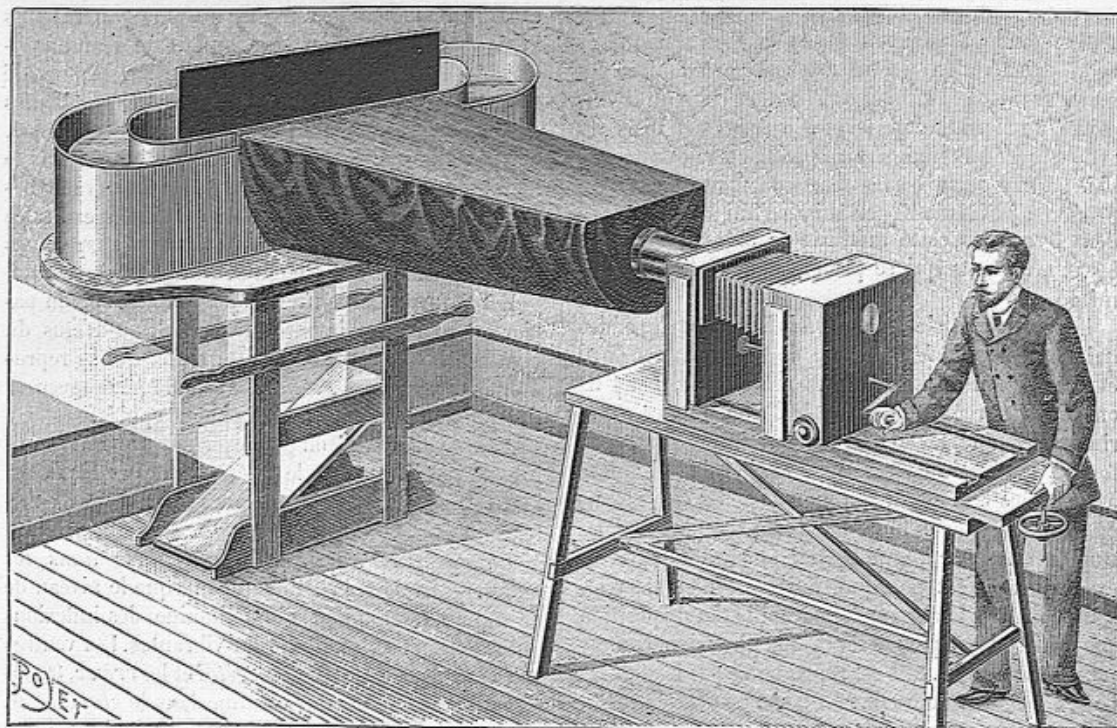


Fig. 1. — Disposition employée pour étudier par la chronophotographie les mouvements qui se passent dans les liquides agités.

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.

La ligne 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 figure D correspond aux premiers instants du phénomène.

C'est d'abord une suite d'abaisssements 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 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 quatorze par seconde, on connaît la vitesse de l'onde à chaque in-

stant, 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

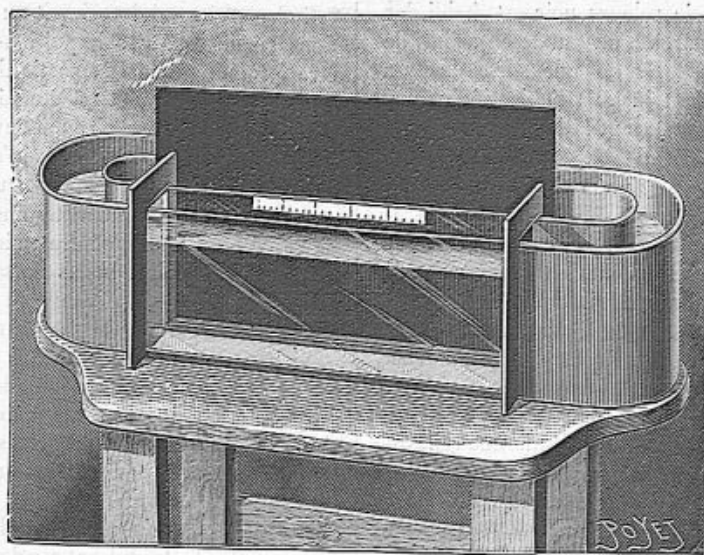


Fig. 2. — Détail du canal elliptique, dans lequel les mouvements du liquide sont rendus visibles.



correspond 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<sup>1</sup>.

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

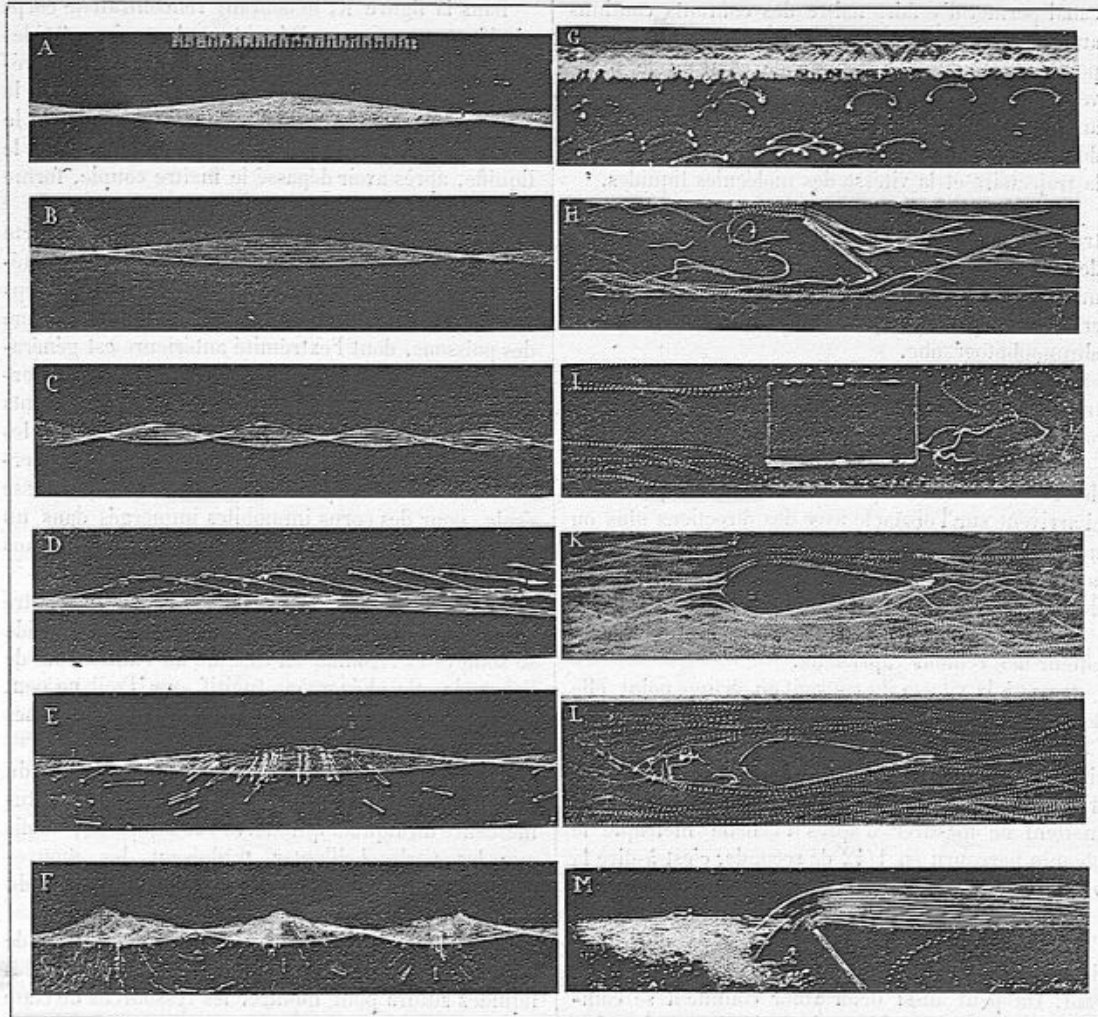


Fig. A,B,C,D,E,F,G,H,I,K,L,M.—Reproduction par l'héliogravure des épreuves chronophotographiques relatives du mouvement des liquides.

positions intermédiaires. Pour mieux suivre l'ensemble de ces mouvements intérieurs, produisons, figure 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 Boussinesq.

<sup>1</sup> 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.

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

Les molécules<sup>1</sup> de la surface décrivent des demi-

<sup>1</sup> 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.



ellipses dans un plan parallèle à la direction du transport de l'onde. 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 figure D, les molécules décrivent à la surface du liquide des courbes fermées<sup>1</sup>.

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

La plaque photographique a été démasquée pendant trois secondes; la fréquence des images était de 42 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 liquides exécutent des remous capricieux.

Quant à la vitesse du courant 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  $1/42$  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 I, l'obstacle était formé par une caisse en forme de parallépipède 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.

<sup>1</sup> 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.

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 figures 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<sup>1</sup>.

Dans la figure K, le courant rencontrait le corps pisciforme par son côté obtus; les veines fluides suivent les parois et s'échappent à l'arrière 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 extrémité la plus aiguë, le liquide, après avoir dépassé le maître couple, forme des remous très prononcés, figure L.

L'intensité des remous qui constituent une perte de force vive peut être considérée comme un critérium 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<sup>2</sup>.

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 figure 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 du mouvement des liquides suffira pour montrer les ressources de cette

<sup>1</sup> 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 cellulose courbée suivant le contour de ces joues y était soudée de manière à former une cavité close. La transparence insuffisante du cellulose fait que les perles qui passent au-dessus du corps immergé sont moins éclairées que les autres, mais cependant encore visibles dans les chronophotogrammes.

<sup>2</sup> 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.



méthode que j'applique actuellement à l'étude de la locomotion des animaux aquatiques.

Les physiiciens pourront peut-être aussi recourir à cette méthode pour contrôler certains points de la théorie des ondes et des courants, et même pour étudier l'action des différentes sortes de propulseurs d'après les mouvements qu'ils impriment au liquide dans lequel ils se meuvent.

E.-J. MAREY,  
de l'Institut.

NOUVEAU

## SYSTÈME DE CHAUFFAGE DES WAGONS

On parle beaucoup en ce moment d'une innovation dans le mode de chauffage des wagons de chemins de fer anglais par la vapeur d'eau. Ce système, déjà si souvent essayé, sans succès il est vrai, nous paraît avoir trouvé sa solution définitive, et, tant par sa simplicité

que par les qualités économiques qu'il présente, être appelé à un avenir certain. Déjà appliqué à des milliers de voitures américaines (sur le Manhattan et le Delaware Railways notamment), le nouveau système de chauffage vient encore d'être adopté par deux des plus grandes compagnies anglaises, à la suite de nombreuses expériences qui en avaient consacré l'utilité incontestable ainsi que le succès.

Le principe du nouvel appareil est un accumulateur placé sous la banquette et qui emmagasine une quantité de chaleur suffisante pour chauffer l'intérieur du compartiment à une température normale, et cela pendant six heures environ, sans qu'il soit nécessaire de renouveler la vapeur. Celle-ci provient de la chaudière de la locomotive et se répartit une fois pour toutes dans chaque appareil séparé, au moyen d'un simple tuyau de communication.

La partie essentielle du système, l'accumulateur L (fig. 1), consiste en deux cylindres non concentriques (fig. 2) en fer forgé. Le cylindre intérieur n'a que 10 centimètres de diamètre et 1<sup>m</sup>,50 de longueur. Il est rempli aux sept huitièmes d'une solution fortement saline A, l'espace libre B étant réservé à la dilatation du liquide. C'est le manchon extérieur seul, un peu plus long que l'autre, qui communique par le tampon vissé D (fig. 1), percé en E d'un trou taraudé, avec la chaudière, et en reçoit la vapeur par l'intermédiaire d'un tuyau à faible section. Un jeu de soupapes-réservoirs automatiques disposées judicieusement prévient l'excès de pression dans l'appareil et assure l'écoulement de l'eau formée par la condensation. Réunis les uns aux autres par un accou-

plement étanche pareil à celui des freins, les tuyaux d'intercommunication entre les wagons se désaccouplent automatiquement dès que les voitures sont détachées.

Les figures 3 et 4 donnent une idée d'ensemble de la disposition générale des appareils. Les accumulateurs H, au nombre de cinq par wagon, sont reliés aux conduites principales A et B au moyen de petits branchements verticaux. En C et D, sous le centre de la voiture, se trouvent les deux soupapes-réservoirs automatiques.

Avant le départ du train, on ouvre le robinet spécial de la chaudière. La vapeur se répand alors dans tout le système et, remplissant l'espace annulaire irrégulier C (fig. 2), chauffe rapidement la paroi de l'enveloppe extérieure. Pendant que la température du compartiment s'élève, la solution contenue dans le tube intérieur absorbe de la chaleur qu'elle emmagasine pour toute la durée du voyage. Quand la température voulue est atteinte, on ferme le robinet de la machine, et la chaleur accumulée précédemment se transmet alors, par simple conductibilité, au manchon extérieur d'où elle rayonne dans la voiture.

On conçoit tout de suite les nombreux avantages du système. En effet, par suite de l'étendue exceptionnelle de la surface rayonnante, la température s'élève très rapidement; en outre, la solution saline se maintenant à un degré constant de concentration ne se congèle jamais

et n'exige aucun renouvellement.

Enfin, par un ingénieux dispositif des appareils d'écoulement et d'accouplement, la congélation d'aucune des parties du système n'est rendue possible. Les soupapes C et D concourent activement à cet important résultat. En effet, d'une part, elles

assurent dans toute la longueur du train un courant de vapeur sèche, et par suite empêchent les voitures de tête d'être surchauffées au détriment des dernières. D'autre part, comme elles sont munies de réservoirs automatiques, l'écoulement de l'eau se fait de lui-même dès que celle-ci tend à se refroidir et que la pression intérieure diminue.

Les expériences d'essai ont été faites l'hiver dernier par la Compagnie du *Great Northern* et par celle du *Manchester-Sheffield Railway*. Malgré un froid assez vif, après un trajet de six heures, l'abaissement de la température intérieure du wagon n'a guère dépassé un degré centigrade (20 degrés au départ, 18°,8 à l'arrivée). Ces expériences ont été si concluantes et les résultats en ont été si satisfaisants que, comme nous l'avons dit, les deux compagnies anglaises ont aussitôt adopté le nouvel accumulateur.

X. WEST.

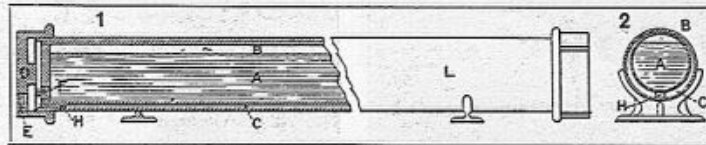


Fig. 1 et 2. — Accumulateur de chaleur.

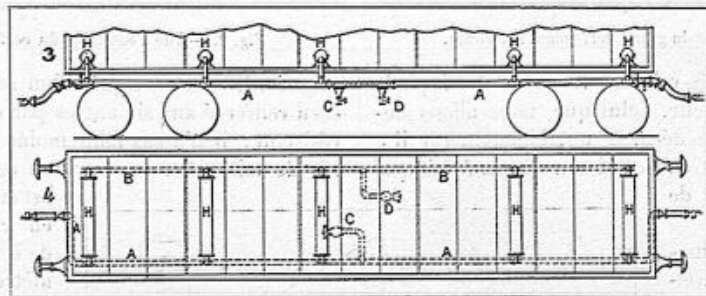


Fig. 3 et 4. — Disposition de l'appareil. — Coupe et plan.