

# La détermination de la conductibilité calorifique des liquides

Autor(en): **Weber, Robert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles**

Band (Jahr): **31 (1902-1903)**

PDF erstellt am: **01.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-88489>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# LA DÉTERMINATION DE LA CONDUCTIBILITÉ CALORIFIQUE DES LIQUIDES

PAR ROBERT WEBER

Si la conductibilité calorifique des solides a été étudiée au point de vue théorique et expérimental dès le commencement du siècle passé, il n'en est pas de même de celles des liquides. Vers 1810, l'éminent physicien anglais *Thomas Thomson* avait encore à défendre l'existence de la conductibilité des liquides contre les physiciens d'autres nationalités, qui niaient l'existence de la conductibilité calorifique des liquides, ainsi que cela résulte des publications parues à cette époque dans les *Annales de Gilbert*.

Dès lors on a établi des méthodes qui permettent de trouver le coefficient de conductibilité soit en valeur relative, soit en valeur absolue cm., gr., sec.; ainsi par *Lundquist*<sup>1</sup>, *Winkelmann*<sup>2</sup>, *H.-F. Weber*<sup>3</sup>, *Wachsmuth*<sup>4</sup>, *Angström*<sup>5</sup>, *Grätz*<sup>6</sup>, *Bottomley*<sup>7</sup>, *Chree*<sup>8</sup>, *Berget*<sup>9</sup>, *Milner et Chattok*<sup>10</sup>.

<sup>1</sup> LUNDQUIST. *Mon. sc.*, 1871, p. 500.

<sup>2</sup> WINKELMANN. *Pogg. Ann.* 153, p. 481, 1874.

<sup>3</sup> H.-F. WEBER. *Wied. Ann.* 10, pp. 103, 304, 472, 1880. — *Berl. Monatsberichte*, 1885, p. 457.

<sup>4</sup> WACHSMUTH. *Wied. Ann.* 48, p. 158, 1893.

<sup>5</sup> ANGSTRÖM. *Pogg. Ann.* 123, p. 468, 1864.

<sup>6</sup> GRETZ. *Wied. Ann.* 25, p. 337, 1885.

<sup>7</sup> BOTTOMLEY. *Proc. Roy. Soc.*, 1881.

<sup>8</sup> CHREE. *Proc. Roy. Soc.*, 1887.

<sup>9</sup> BERGET. *C. R.* 105, p. 224, 1887.

<sup>10</sup> MILNER ET CHATTOK. *Phil. Mag.* 48, p. 46, 1899.

Ces méthodes sont basées en partie sur l'état variable de la température du liquide, en partie sur l'état constant de la distribution de la température du liquide. La méthode que je vais exposer est basée sur l'état constant.

### 1. Théorie de la méthode.

Quand on cherche la forme à donner à un liquide pour que ce soit le liquide même qui modifie exclusivement ou principalement le passage de la chaleur, on voit qu'il faut s'arrêter à la forme d'une couche limitée par deux surfaces planes et parallèles, et situées à une faible distance l'une de l'autre. Pour que la surface limite latérale perde de son influence, il faut aussi donner une assez grande étendue à la surface plane; en outre, le tout doit prendre la forme d'une couche circulaire, ou d'un cylindre de faible hauteur.

La forme la plus avantageuse pour le liquide devient donc celle du « mur » de *Fourier*.

Pour établir une relation algébrique entre la conductibilité du milieu à étudier et ses dimensions, le temps et la différence de température, *Fourier* a posé les conditions expérimentales suivantes :

1. Que la transmission de chaleur ne se fasse que par conductibilité et point par convection ;
2. que le milieu soit limité par deux surfaces planes et parallèles ;
3. que tous les points d'un même plan parallèle aux surfaces limites aient la même température, différente d'un plan à un autre ;

4. que les températures  $T$  et  $t_0$  des surfaces limites, ainsi que la température  $t$  de tout plan parallèle, puissent rester les mêmes.

Dans ces conditions, et en désignant par  $Q$  la quantité de chaleur qui passe perpendiculairement aux surfaces limites de  $S$  cm<sup>2</sup> pendant  $\tau$  secondes, par  $D$  la distance des deux surfaces qui sont aux températures  $T_0$  et  $t_0$ , et par  $k$  le coefficient de conductibilité calorifique, *Fourier* a établi la relation

$$Q = k \frac{S(T - t)}{D} \cdot \tau \quad (1)$$

Cette relation donne immédiatement une expression pour le coefficient

$$k = \frac{Q \cdot D}{S \cdot (T - t_0) \cdot \tau} \quad (2)$$

Elle exige en général la détermination des six quantités  $Q$ ,  $D$ ,  $S$ ,  $T$ ,  $t$ ,  $\tau$ .

Pour pouvoir appliquer cette relation aux liquides, le « mur » devra être horizontal, et limité en bas par un solide plan et horizontal, en haut par la surface libre ou de même par un solide plan et horizontal, et latéralement par une disposition qui change le moins possible le flux de chaleur à l'intérieur. La chaleur est à fournir uniformément à tous les points de la surface supérieure, elle est à enlever de la même manière par les points de la surface inférieure; les deux quantités de chaleur sont à maintenir constantes pendant un temps suffisamment long pour établir l'état de température constante en tous les points et pour faire les mesures nécessaires.

La relation pour  $k$  devient notablement plus simple, quand on produit la chaleur  $Q$  par voie électrique, soit par un courant de  $J$  ampères à  $E$  volts. Si la chaleur  $Q$  est produite en  $\tau$  secondes, elle s'exprime d'après Joule par

$$Q \text{ cal} = 0,24 J . E . \tau$$

Substituant cette valeur pour  $Q$  dans (2), elle devient après réduction :

$$k = \frac{0,24 J . E . D}{S (T - t_0)} \quad (3)$$

c'est-à-dire indépendante du temps  $\tau$ .

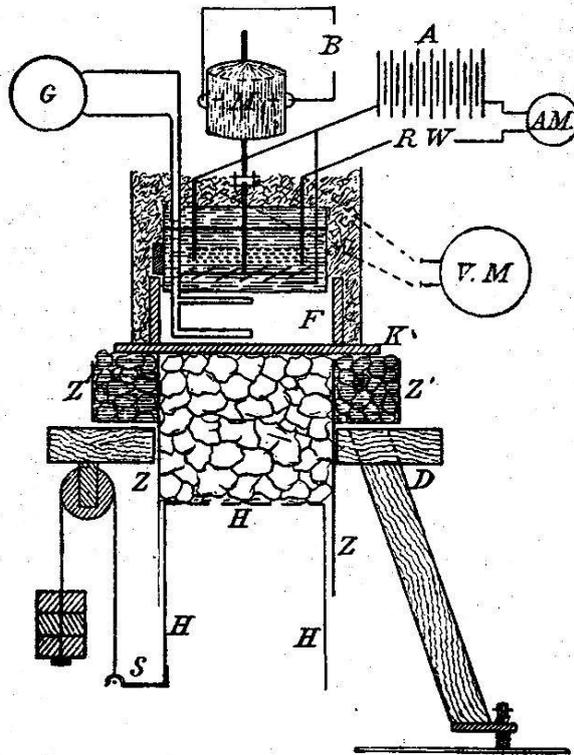
La mesure de  $J$  et  $E$  est, de nos jours, plus facile et plus exacte que celle de  $Q$ . Mais il faut retenir dès l'abord que la chaleur  $Q$  obtenue par transformation de l'énergie électrique  $J . E$  ne passe pas toute au travers du liquide. Une certaine fraction s'en ira dans l'air ambiant, et une autre fraction aux autres corps voisins et en contact. La valeur de  $Q$ , ou le montant de l'énergie qui doit entrer dans la formule (3) pour  $k$ , doit être diminuée d'une quantité à déterminer.

## 2. Disposition expérimentale.

L'ensemble de la disposition expérimentale et des appareils employés est donné, partie en coupe, partie schématiquement, par la figure ci-jointe.

L'appareil de mesure de conductibilité proprement dit repose sur un trépied en bois  $D$ . Sa table est percée d'un trou assez grand pour recevoir le cylindre en zinc  $Z$ . Celui-ci porte la galerie  $Z'$  qui remplit le double but de bien asseoir le cylindre sur le trépied

et de recevoir de la glace et de l'eau pour empêcher la fusion de la glace pilée dans le cylindre *Z*. Le même cylindre *Z* contient encore le cylindre-piston *H*, dont le fond est en haut et percé de trous pour livrer passage à l'eau de fusion. Etant mobile dans *Z*, le cylindre *H* est porté à l'aide de trois tiges rigides *S* et les cordes qui passent sur les poulies fixées au trépied.



Le cylindre *Z* a 37<sup>cm</sup> de long et 20<sup>cm</sup> de diamètre; le cylindre *H* a 13<sup>cm</sup> de long et le cylindre *Z'* a 12<sup>cm</sup> de haut et 30<sup>cm</sup> de diamètre extérieur. Sur le bord du cylindre *Z* repose d'abord le vase qui doit recevoir le liquide à étudier. La base est formée par une plaque *K* de cuivre de 26<sup>cm</sup> de diamètre et 0<sup>cm</sup>,4 d'épaisseur; la paroi latérale est un cylindre en verre de 20<sup>cm</sup> de diamètre, 2<sup>cm</sup>,1 de hauteur et 0<sup>cm</sup>,3 d'épaisseur. La

surface supérieure du liquide est limitée par la base du vase chauffeur *W*. La plaque de fond *K* est d'abord placée horizontalement à l'aide des vis calantes du trépied suivant les indications d'un niveau à bulle d'air ; la surface supérieure du liquide est maintenue horizontale par le fond du vase chauffeur *W*, en donnant aux talons supports du vase chauffeur une longueur appropriée. Car ce vase chauffeur repose sur le cylindre de verre par trois talons, en même temps qu'il s'y enfonce de 2 à 6<sup>mm</sup>. Le vase chauffeur est rempli aux deux tiers environ d'huile de paraffine, liquide que j'ai choisi à cause de ses qualités électriques. Le fond de ce vase est en cuivre, les deux autres surfaces en laiton.

Dans ce vase chauffeur se trouvent d'abord l'appareil de chauffage, puis un agitateur, enfin un thermomètre. L'appareil de chauffage se compose d'un fort cadre en tôle de fer découpée en rectangle. Le cadre porte deux fortes colonnes en laiton, fixées solidement et bien isolées du cadre en fer. Un cordon de fil nickeline, soudé à l'une des colonnes, est enroulé sur le cadre parallèle à l'un des côtés et puis parallèlement aux autres côtés pour aboutir et être soudé à la seconde colonne de laiton. Ces colonnes dépassent le vase et la couche de coton qui le recouvre ; elles permettent la communication avec la source d'électricité et avec les instruments de mesures électriques. Le cordon de fils de nickeline était formé de fils de 0<sup>mm</sup>,2, isolés à la soie, en les tressant par quatre fois 8 fils. La longueur de ce cordon de 32 fils était de 13<sup>m</sup>,7 environ ; sa résistance électrique de 4,9 ohms environ. Comme source d'énergie électrique, j'ai employé une batterie d'accumulateurs. Le courant passait donc

depuis la batterie par un ampèremètre de précision de Siemens et Halske, par une résistance de réglage *R* et par le cordon chauffeur.

La paraffine liquide étant en assez grande quantité et mauvais conducteur de chaleur, il est indispensable d'y placer un agitateur assez énergique. J'ai construit une sorte de roue à très longues ailettes ; elles vont jusque vers 1<sup>cm</sup>,5 du bord du vase et elles sont tournées obliquement par rapport à leur plan, leur distance du fond du vase chauffeur est juste assez grande pour ne pas froter le fond. L'axe de rotation passe par un petit tube consolidé sur le cadre chauffeur ; un anneau fixé sur l'axe permet de faire reposer l'agitateur sur le tube et de le faire tourner sans difficulté. Sur le prolongement de l'axe de l'agitateur est disposé l'axe d'un petit moteur électrique Siemens et Halske *M* modèle G M 2,5 et les deux axes sont couplés. Le moteur repose sur le bord du vase chauffeur par trois pieds auxiliaires fixés sur le moteur même. Le courant d'une batterie *B* d'accumulateurs fournit l'énergie pour actionner et le moteur et l'agitateur. En donnant à l'axe une vitesse d'environ un tour par seconde, le liquide chauffeur est assez remué pour enlever la chaleur au fil chauffeur, et pour maintenir constante la température du fond du vase. — Le mercure cependant, corps bon conducteur, enlève si bien la chaleur du fond du vase chauffeur, qu'il faut donner à l'agitateur une vitesse de deux tours environ par seconde.

Le thermomètre qui plongeait dans le liquide du vase chauffeur était à mercure, son réservoir dévié à angle droit sur la tige divisée. Le but était de déterminer la température de la couche liquide sur le fond du vase chauffeur. Le réservoir restait donc couché

dans un plan horizontal au fond de cuivre du vase, près du bord et entre celui-ci et l'agitateur; la tige sortait verticalement. Elle est divisée en dixièmes de degrés, permettant de lire les centièmes. Le but du thermomètre n'est pas de déterminer la température de la couche limite supérieure du liquide à étudier, ou la température du fond du vase chauffeur, mais d'indiquer la température dans un même endroit, non loin du fond du liquide chauffeur, pour qu'on puisse la maintenir constante. Aussi, lors des mesures, ces indications ont pu être maintenues constantes à quelques dixièmes de degré, ou même, suivant le liquide, à quelques centièmes de degré près.

Le vase *F*, qui doit contenir le liquide à étudier, reçoit les parties indispensables d'un couple thermo-électrique. Il est fait de cuivre et constantane. Ce dernier forme la partie la moins longue. Les deux fils sont soigneusement isolés par de la soie, puis courbés en forme de *U* et dimensionnés de manière que les soudures sont sur l'axe vertical du liquide, l'une aussi basse, l'autre aussi haute que possible, tandis que les fils vont horizontalement jusque vers le bord du vase, pour être courbés à angle droit et pour passer au travers d'un petit tube en laiton par le vase chauffeur jusqu'au galvanomètre situé en dehors. Pour assurer l'invariabilité de la forme du couple et surtout de la distance verticale des soudures, une petite pièce rectangulaire en ébonite est placée entre les deux fils aux deux tiers de leur longueur, et un fil de soie retient bien les deux fils appuyés contre ce support ébonite.

Enfin, à partir de la plaque de cuivre *K* du fond du vase, le vase à liquide et le vase chauffeur étaient

couverts d'une couche protectrice de laine. Sur un carton de hauteur dépassant de 3<sup>cm</sup> le vase chauffeur j'ai étalé et fixé une couche égale de laine fine et cardée; son épaisseur est de 2<sup>cm</sup> environ. Une couche de laine semblable se trouve sur le vase chauffeur. La couche sur le carton était appuyée par une ficelle, serrant bien la ceinture; celle du haut était lestée par des plaques de métal. — La protection des vases aurait été plus complète en employant de l'édredon à la place de la laine; mais il n'est guère possible de refaire dans les expériences qui se suivent des couches d'édredon de même épaisseur et de même densité, ainsi que cela se fait aisément avec la laine cardée.

### 3. Discussion de la disposition expérimentale.

En tout premier lieu, les dispositions expérimentales doivent satisfaire aux conditions qui sont à la base de la théorie, telles qu'elles sont énumérées p. 210 et 211. La première condition, que la chaleur doit se transmettre par conductibilité seulement et point par convection, est satisfaite parce que la chaleur est amenée au liquide par le haut et enlevée par le bas. La source de chaleur est aussi constante que ne l'est l'enlèvement de la chaleur par la glace. Tous les éléments de chacune des surfaces limites sont à la même température; pour celle du haut, grâce à l'agitateur, pour celle du bas, grâce à la présence uniforme de la glace et à la grande épaisseur de la plaque de cuivre qui forme le fond.

Cependant, l'effet de l'anneau de verre formant la paroi latérale du vase à liquide et l'effet des fils métal-

liques plongés dans le liquide peuvent paraître suspects. Mais l'anneau de verre, par son bord inférieur bien plan, est fixé sur la plaque de cuivre par de la cire à cacheter; ce contact intime l'oblige à prendre la température de la plaque de cuivre, soit sensiblement celle de la glace fondante. Le bord supérieur de l'anneau de verre est en contact direct avec le vase chauffeur, ou bien, en certaines places, il n'en est séparé que par une couche de liquide très mince et de quelques millimètres de hauteur. Ce fait oblige le bord supérieur du verre à prendre la température du vase chauffeur. Ainsi la répartition de la température dans le verre et dans le sens de la hauteur devient donc aussi stable que dans le liquide, et cela après le même intervalle de temps à peu près. Mais dès que, dans des points voisins et sur une même horizontale du verre et du liquide, la température est identique, toute cause pour la convection est éliminée. J'admets naturellement que la quantité de chaleur qui traverse le verre par  $\text{cm}^2$ , et de haut en bas, n'est pas la même que celle qui passe dans la même direction et par  $\text{cm}^2$  au travers du liquide. Comme la convection est due à une différence de température et non de quantité de chaleur, ce dernier fait ne sera pas une cause de perturbation.

Quant à la quantité de chaleur qui passe par le verre, on pourra la supposer invariable pour une même différence de température, indépendante de la nature du liquide voisin.

Les fils de cuivre du couple thermo-électrique passent dans un tube étroit en laiton au travers du liquide chauffeur et vont ensuite dans le liquide à étudier. Une partie de la chaleur reçue au passage par le vase

chauffeur sera transmise au liquide par conductibilité. Ces fils sont isolés à la soie et vernis par un vernis isolant; ils sont posés horizontalement, parallèles aux surfaces limites et, par suite, dans des surfaces isothermes. Puisqu'ils sont en métal, ils transmettent plus de chaleur que la même section de liquide, et la différence sera surtout sensible dans la partie des fils situés près du bord; elle va en diminuant vers les soudures. Les fils en constantane, au contraire, ont la température du liquide ambiant. La chaleur amenée par les fils de cuivre fera élever la température du liquide quelque peu au-dessus de celle du plan isotherme passant par ces fils; mais en considérant la faible épaisseur du fil de cuivre, la petite différence de température et le fait que ces fils n'occupent qu'un rayon, on voit que la perturbation provenant de ces fils du couple, comparée à la totalité de la chaleur transmise, doit être négligeable.

Au dehors de l'anneau en verre la température ambiante est en partie plus élevée, en partie plus basse que celle du liquide et du verre; il en résulte un échange de chaleur par rayonnement. Cet échange est maintenu à une valeur assez invariable par l'emploi de la ceinture en laine. La quantité de chaleur perdue par ce rayonnement a été diminuée encore en choisissant convenablement la température du vase chauffeur; elle était dans la règle le double de la température ambiante. De cette façon la quantité de chaleur reçue du dehors devenait sensiblement égale à celle abandonnée au dehors par la moitié supérieure du verre.

La seconde condition à la base de la théorie veut que le liquide soit limité par deux surfaces planes,

parallèles et infiniment étendues. L'étendue infinie n'est pas réalisable, mais aussi pas nécessaire dans cette forme. La condition a le sens, que l'on ne doit pas avoir besoin de considérer ce qui se passe dans le sens des plans limites, ou bien, que les conditions de l'expérience, perpendiculairement aux plans limites, soient les mêmes dans tous les  $\text{cm}^2$  de la couche liquide. On peut donc faire les mesures sur une couche liquide finie. Les surfaces limites sont planes, comme coïncidant avec les surfaces solides du fond du vase à liquide et du vase chauffeur. Le parallélisme des surfaces est réalisé, en les faisant horizontales à l'aide d'un niveau à bulle d'air.

L'identité de température en tous les points d'un même plan horizontal est réalisée par celle du liquide du vase chauffeur, et par celle de la glace appliquée contre le fond cuivre, pour les surfaces limites ; et par le maintien de ces températures limites pendant un temps assez long, pour les plans horizontaux intermédiaires. La glace était en contact avec toute la plaque de cuivre et appuyée contre elle avec une force de 8 à 12kg.

La dernière des conditions à réaliser, que les températures des surfaces limites, ainsi que la température d'un plan horizontal quelconque doivent rester les mêmes, n'est limitée que par la capacité de la source d'électricité et par la provision de glace. Les deux suffisent facilement pour une seule et même série de mesures durant plusieurs heures.

#### 4. Détermination des différentes quantités.

*La section S.* — La couche de liquide traversée verticalement par la chaleur  $Q$  a une section horizontale, dont la grandeur se déduit immédiatement du diamètre du vase chauffeur ou de l'anneau en verre, qui est de 20<sup>cm</sup> ; de là

$$S = 315 \text{ cm}^2.$$

*La différence de température ( $T - t$ ).* — Cette différence de température n'est pas celle existant entre l'indication du thermomètre dans le liquide chauffeur et la température de la glace fondante. Car puisque la glace sous la plaque de cuivre  $k$  entre en fusion, la face inférieure de  $k$  doit avoir une température supérieure à zéro degré, et comme, entre la glace et le cuivre, il y a une mince couche d'eau, c'est cette eau qui réalise la fusion, sa température doit être aussi supérieure à zéro degré. Il en résulte que depuis la glace fondante à la couche d'eau formée, à la face inférieure de la plaque de cuivre, à son intérieur, à sa face supérieure, jusqu'à la surface limite inférieure du liquide à étudier, la température doit être de plus en plus élevée. Arrivé au liquide même, j'estime que la température est de plusieurs degrés.

A la surface supérieure les conditions sont analogues. Depuis la température de la couche d'huile de paraffine dans laquelle plonge le thermomètre, elle baisse toujours jusqu'au fond du vase chauffeur, jusqu'à la couche supérieure du liquide à étudier. Le thermomètre n'indique donc pas cette dernière température ; elle en diffère, j'estime, de plusieurs degrés. Aussi, je

le répète, ce thermomètre avait pour but d'indiquer une température en un point quelconque, pour pouvoir la maintenir en ce point, et, par là, de pouvoir ~~maintenir une certaine répartition~~ de température dans tout le liquide. On voit que toute vérification des points fixes et de la division du thermomètre est superflue.

Le mécanisme du passage de la chaleur d'un corps à un autre, au travers de leur surface ou couche de séparation ne nous est pas connu ; il est donc impossible de conclure de l'une des températures à celle dans l'autre corps, de part et d'autre de la surface limite. Toutefois l'expérience montre que le passage de la chaleur dépend de la nature des corps et de la nature et de l'état de la surface limite. La conductibilité, soit le passage de la chaleur dans cette couche limite, est beaucoup plus petite que dans toute autre couche homogène.

Si l'on voulait introduire pour  $D$  dans la formule (3) la distance entre les deux surfaces horizontales limites de la couche liquide, la différence de température correspondante ne serait pas  $(T - 0)$  degrés, mais de plusieurs degrés inférieure à  $T$ .

La disposition expérimentale, en particulier l'emploi du couple thermo-électrique élimine cette difficulté des couches limites, et les conditions théoriques ne s'y opposent pas du tout. Il suffit que  $\Delta t$  soit la différence de température des plans parallèles liquides à la distance  $D$ , quelle que soit la position de ces plans dans le liquide.

Or ces différences de température se mesurent facilement et exactement par les couples thermo-électriques. J'ai employé un galvanomètre *Deprez-d'Arzon-*

*val* avec miroir et lecture à la lunette. Sans doute que les mesures avec un bon galvanomètre système Wiedemann, bien établi, sont plus commodes et beaucoup plus exactes, mais l'emploi de cet instrument était rendu impossible par le voisinage du tramway de la ville.

Si le galvanomètre a dévié de la division  $N_0$  à celle de  $N$  ensuite d'une différence de température de  $\Delta t$  degrés aux soudures, on sait que, pour le genre de couple thermo-électrique cuivre-constantane, il y a la relation

$$\Delta t = C(N - N_0) \quad (4)$$

et que  $C$  est une constante, la constante du couple thermo-électrique. Dans la suite des mesures elle a été déterminée plusieurs fois, soit pour des couples modifiés, soit à cause d'un changement dans la disposition, soit pour vérifier l'invariabilité de l'arrangement. Les valeurs respectives seront indiquées en tête de chaque groupe de mesures.

La formule (3) pour  $k$  se modifie par l'introduction de la nouvelle forme pour  $\Delta t$  en

$$k = \frac{0,24 J \cdot E \cdot D}{S \cdot \Delta t} = 0,24 \cdot \frac{1}{C \cdot S} \cdot D \cdot \frac{J \cdot E}{N - N_0} \quad (5)$$

*Distance D.* — Lors de la confection des couples thermo-électriques les soudures  $D$  ont été coupées aussi courtes que possible, puis arrondies à la lime; elles prirent ainsi une épaisseur de 1<sup>mm</sup>. Les deux branches ayant été consolidées, j'ai mesuré la plus petite distance intérieure des deux soudures, et la plus grande distance extérieure. Leur moyenne a été introduite dans le calcul comme distance  $D$  des plans horizon-

taux marqués par les soudures. Cette distance n'était pas la même dans toutes les mesures; intentionnellement ou accidentellement les fils des couples ont été déformés. La valeur de  $D$  correspondant à chaque mesure sera également indiquée en tête du groupe.

La détermination exacte de cette distance  $D$  est assez difficile, parce que tout le système n'est pas très rigide, et par conséquent les instruments de précision pour les mesures de distance ou d'épaisseur ne sont pas applicables. Les différentes valeurs de  $D$  sont comprises entre 0,90 et 1<sup>cm</sup>,00; la lecture n'est guère possible à plus de 0<sup>mm</sup>,01 près, tout en répétant les mesures pour une même distance afin d'avoir une moyenne. Ce fait peut introduire dans la valeur de  $k$  une faute de 2 à 3 % de sa valeur. Aussi c'est là le côté faible de la méthode.

*Intensité du courant  $J$ .* — Le courant de chauffage est fourni par une batterie d'accumulateurs de quinze éléments; on lui donne la valeur convenable en employant la totalité ou une partie de ces éléments, et en le faisant passer par une résistance de réglage. Son intensité a été mesurée par un ampèremètre de précision de Siemens et Halske, dont la division donne 0,1 ampère et qui permet d'évaluer aisément les 0,01 ampère. Le voltmètre était intercalé après l'ampèremètre et en dérivation avec le fil chauffeur; le courant pris par ce voltmètre a été déterminé par simple élimination du voltmètre, et puis il a été déduit de l'intensité totale lue sur l'ampèremètre. Cette différence est le courant  $J$  introduit dans la formule (5).

*Force électromotrice E.* — La force électromotrice appliquée à l'appareil chauffeur a été mesurée par un voltmètre de précision de Siemens et Halske, dont la division donne 0,2 volt et permet la lecture de 0,02 volt. A cet effet, les bornes de l'instrument étaient reliées aux colonnes en laiton du cadre qui porte le cordon en nickeline. Aucune correction de l'indication du voltmètre n'était nécessaire.

*Energie électrique  $W = J.E$ .* — L'énergie totale donnée par la batterie d'accumulateurs est  $J.E = W$  watts. La quantité de chaleur équivalente produite par seconde est

$$Q = 0,24 J.E \text{ gramme-calories.}$$

La majeure partie de cette chaleur passe au travers du liquide à étudier jusqu'à la glace, mais une autre partie passe depuis le vase chauffeur à l'extérieur, soit par en haut ou latéralement au travers de la laine dans l'air, ou par le cylindre en verre et à la glace. Cette dernière partie ne participe pas à la conductibilité par le liquide, elle ne doit pas entrer non plus dans la formule (5) donnant  $k$ . De là la nécessité de distinguer entre ces deux quantités et de les déterminer séparément.

##### 5. Quantité d'énergie ou quantité de chaleur qui seule passe par la couche de liquide.

La détermination de la quantité d'énergie qui seule passe par le liquide peut se faire de deux manières, ou bien en la trouvant directement, ou par différence entre l'énergie totale fournie au vase chauffeur et la

quantité de chaleur qui passe depuis le vase chauffeur à côté de la couche liquide, soit par le haut et le côté du vase chauffeur et par le verre cylindrique. J'ai choisi la dernière alternative : elle demande deux mesures auxiliaires et des dispositions un peu différentes.

Dans la première disposition le vase chauffeur était placé sur une plaque en tôle, séparé de celle-ci par trois cônes en bois de 1<sup>cm</sup>,2 de hauteur et placé comme la plaque de cuivre *K* sur le cylindre *Z* chargé de glace. L'intervalle laissé entre la plaque et le fond du vase chauffeur était rempli d'une couche d'édredon bien serré. Cette couche et le vase chauffeur ont été entourés d'une ceinture de laine cardée d'environ 2<sup>cm</sup> d'épaisseur ; le tout bien serré contre le vase. Sur le vase était une couche de la même laine cardée, aussi de 2<sup>cm</sup>,5 d'épaisseur et bien serrée contre le vase par des plaques de laiton y posées. Le vase chauffeur contenait son thermomètre. Lorsque le courant électrique commence à chauffer, la température s'élève jusqu'à celle qui fut ordinairement maintenue lors des mesures sur les liquides. Arrivée à ce point, la résistance de réglage du courant électrique permettait de la maintenir pendant des heures.

Voici une première série de mesures obtenues dans ces conditions :

TABLE 1.

<i>z</i>	<i>T</i>	<i>t<sub>a</sub></i>	<i>J</i>	<i>E</i>
	°	°	Amp.	Volts
10 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup>	29,42	16,0	0,905	5,32
11 —	29,28	16,0	0,904	5,32
12 —	29,35	16,4	0,909	5,35
	29,35	16,13	0,906	5,33

d'où

$$W_1 = J \cdot E = 4,830 \text{ watts.}$$

Dans cette table et dans celles qui suivent la signification des lettres est celle-ci :

$z$  l'heure de l'observation,  $Z$  la durée de l'observation,  $t_a$  la température ambiante,  $T$  la température lue au thermomètre dans le vase chauffeur,  $J$  l'intensité,  $E$  la force électromotrice aux extrémités du cordon chauffeur, et  $W_1$  l'énergie électrique correspondante.

Procédant de la même manière plusieurs fois, tantôt avec  $T$  vers  $29^{\circ},5$ , tantôt avec  $T$  vers  $34^{\circ},5$  et pendant un temps variant de une heure à trois heures, j'ai obtenu, vers  $29^{\circ},5$  :

TABLE 2.

$Z$	$T$	$t_a$	$T - t_a$	$J$	$E$	$W_1$
	°	°	°	Amp.	Volts	Watts
2h — m	29,35	16,13	13,22	0,906	5,33	4,830
1 15	29,58	16,70	12,88	0,892	5,23	4,665
2 —	29,39	14,83	14,56	0,913	5,42	4,946
3 —	29,64	16,50	13,14	0,926	5,41	5,000
	29,5	16,03	13,47	—	—	4,860

et de même vers  $34^{\circ},5$  :

TABLE 3.

$Z$	$T$	$t_a$	$T - t_a$	$J$	$E$	$W_1$
	°	°	°	Amp.	Volts	Watts
2h 45m	34,18	14,1	20,08	1,107	6,31	6,988
2 —	34,61	15,35	19,26	1,090	6,265	6,829
3 —	34,54	15,5	19,00	1,081	6,27	6,777
	34,44	15,0	19,44	—	—	6,865

Ces quantités d'énergie 4,860 watts et 6,865 watts sont perdues par les trois surfaces du vase chauffeur. La perte de chaque surface sera proportionnelle à sa grandeur et à la différence de température d'avec l'air ambiant, et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la couche protectrice de laine ou d'édredon, et proportionnelle à la nature de cette couche, soit à une sorte de coefficient de conductibilité. Or, les bases du vase chauffeur ont  $315\text{cm}^2$ , la surface cylindrique a  $20 \cdot \pi \cdot 7,5 = 471\text{cm}^2$ . L'épaisseur de la couche de laine sur le vase est de  $2\text{cm},5$ , celle de la couche cylindrique est de  $2\text{cm}$ , et celle de l'édredon est  $1\text{cm},8$ . Par conséquent, avec  $A$  comme constante de proportionnalité, à la température  $T = 34^{\circ},44$  du vase chauffeur, et  $15^{\circ},0$  de l'air ambiant, il passe par la couche d'édredon la quantité d'énergie :

$$A \cdot \frac{315 \cdot (34,44 - 0,00)}{(315 + 471 + 315) \cdot 1,8} = A \cdot \frac{315 \cdot 34,44}{1101 \cdot 1,8} \quad (6)$$

et par les deux couches de laine l'énergie :

$$B \cdot \left\{ \frac{471}{1101} \cdot \frac{19,44}{2} + \frac{315}{1101} \cdot \frac{19,44}{2,5} \right\} \quad (7)$$

$B$  étant la constante de proportionnalité qui caractérise la laine. L'expérience a donné le résultat que la somme de ces deux énergies vaut 6,865 watts; de là la relation :

$$A \cdot \frac{315}{1101} \cdot \frac{34,44}{1,8} + B \cdot \frac{361,1}{1101} \cdot 19,44 = 6,865$$

Les mesures identiques faites aux températures  $T = 29^{\circ},5$  et  $t_a = 16^{\circ},03$ , donc  $T - t_a = 13^{\circ},46$ , avec  $W_1 = 4,860$ , donnent par le même raisonnement :

$$A \cdot \frac{315 \cdot (29,5 - 0,0)}{1101 \cdot 1,8} + B \cdot \frac{13,46 \cdot 361,1}{1101} = 4,860$$

Résolvant ces équations par  $A$  et  $B$ , on trouve :

$$\left. \begin{array}{l} A = 0,0018 \\ B = 1,096. \end{array} \right\} \quad (8)$$

Ainsi l'énergie qui passe par le fond du vase chauffeur au travers de l'édredon à la température  $T$  est :

$$C = \frac{0,0018 \cdot 315}{1101 \cdot 1,8} \cdot T = 0,00156 \cdot T \text{ watts.} \quad (9)$$

Aux températures spéciales  $T_1 = 34^{\circ},60$  et  $T_2 = 29^{\circ},46$  l'énergie est :

$$\left. \begin{array}{l} \text{à } T_1 = 34^{\circ},60, \quad C_1 = 0,0539 \text{ watt,} \\ \text{à } T_2 = 29^{\circ},46, \quad C_2 = 0,0467 \text{ watt.} \end{array} \right\} \quad (10)$$

Les valeurs pour les coefficients de transmissibilité  $A$  et  $B$  nous montrent incidemment que la chaleur passe beaucoup plus difficilement au travers de l'édredon qu'au travers de la laine, — que l'édredon retient plusieurs cents fois mieux la chaleur que ne le fait la laine.

Dans la seconde disposition, le vase chauffeur était posé sur le bord bien plan du verre cylindrique, de manière que celui-ci pût bien prendre la chaleur du chauffeur. Le verre cylindrique était de nouveau scellé sur la forte plaque de cuivre  $k$  avec de la cire à cacheter ; l'espace libre, destiné aux liquides, était rempli d'édredon bien serré ; enfin le tout était protégé par la ceinture en laine et la couche de laine lestée, — tout comme dans la première disposition.

Aussi, la plaque de cuivre  $k$  était de nouveau posée sur le cylindre  $Z$  chargé de glace ; soit aussi la disposition employée lors des mesures avec les liquides.

Plusieurs séries de mesures faites dans le voisinage de  $T = 34^{\circ},5$  et  $29^{\circ},5$  ont donné les moyennes suivantes :

a. A la température moyenne de  $T = 34^{\circ},6$  :

TABLE 4.

$Z$	$T$	$t_a$	$T - t_a$	$J$	$E$	$W_2$
	o	o	o	Amp.	Volts	Watts
1h—m	34,61	14,35	20,26	1,284	7,315	9,392
1 30	34,69	16,16	18,53	1,288	7,216	9,294
1 45	34,48	15,87	18,61	1,237	7,113	8,800
	34,6	15,46	19,14	—	—	9,162

b. A la température moyenne  $T = 29^{\circ},43$  :

TABLE 5.

$Z$	$T$	$t_a$	$T - t$	$J$	$E$	$W_2$
	o	o	o	Amp.	Volts	Watts
1h—m	29,22	15,60	13,62	1,118	6,43	7,189
2 —	29,41	14,60	14,81	1,115	6,385	7,119
1 —	29,46	16,85	12,59	1,115	6,37	7,103
2 —	29,66	15,85	13,81	1,095	6,295	6,890
	29,43	15,72	13,71	—	—	7,075

Il résulte de ces deux tables 4 et 5 que les pertes d'énergie par le cylindre en verre et les trois faces du vase chauffeur aux températures moyennes de  $T = 34^{\circ},6$  et  $T = 29^{\circ},43$  de celui-ci sont :

$$\left. \begin{array}{l} \text{à } T_1 = 34^{\circ},60, \quad W'_2 = 9,162 \text{ watts,} \\ \text{à } T_2 = 29^{\circ},46, \quad W''_2 = 7,075 \text{ watts.} \end{array} \right\} \quad (11)$$

La différence des énergies désignées par  $C$  et  $W_2$  donne justement la totalité de l'énergie engendrée par le courant électrique et qui ne passe pas par le liquide à étudier. Ce  $W_2 - C = w$  est donc la quantité d'énergie dont il faut corriger  $W = J.E$  pour n'avoir que celle qui passe par conductibilité au travers du liquide à étudier.

Cette correction vaut donc :

$$\text{à } T_1 = 34^{\circ},60, \quad w_1 = 9,162 - 0,054 = 9,108 \text{ watts,}$$

$$\text{à } T_2 = 29^{\circ},46, \quad w_2 = 7,075 - 0,047 = 7,028 \text{ watts.}$$

Lors des mesures avec les liquides il ne serait pas aisé du tout d'arriver à chaque série à une température moyenne  $T$  égale à  $34^{\circ},60$  ou  $29^{\circ},46$ . De là la nécessité de donner pour  $w$  une expression qui permette la détermination de  $w$  pour toutes les températures  $T$  comprises entre  $28^{\circ}$  et  $35^{\circ}$  environ. Voici comment on trouve cette expression pour  $w$  : il est évident que la perte d'énergie par le vase et le verre doit être proportionnelle à la différence de température  $(T - 0)$  du vase chauffeur et de la glace, à cause du verre et du fond, et aussi proportionnelle à la différence  $(T - t_a)$  du vase chauffeur et de l'air ambiant, à cause des surfaces latérales et du haut du vase chauffeur. Cela réclame une relation de la forme :

$$M.T + N(T - t_a) = w$$

les  $M$  et  $N$  étant deux constantes à déterminer. Or, les tables 4 et 5 donnent les valeurs correspondantes :

$T$	$t_a$	$T - t_a$	$W$
°	°	°	
34,60	15,46	19,14	9,108
29,46	15,72	13,74	7,054

De là les équations de condition :

$$M. 34,60 + N. 19,14 = 9,108,$$

$$M. 29,46 + N. 13,74 = 7,054,$$

et, en les résolvant :

$$\left. \begin{array}{l} M = 0,1117, \\ N = 0,2740, \end{array} \right\} \quad (12)$$

donc

$$w = 0,112 \cdot T + 0,274 (T - t_a) \quad (13)$$

C'est de cette quantité  $w$  qu'il faut réduire le produit  $J.E = W$  dans la formule (5) donnant  $k$ ; elle est donc à remplacer par

$$k = \frac{0,24}{C.S} \cdot D \cdot \frac{W' - w}{N - N_0} \quad (14)$$

## 6. Résultats.

Le but du présent travail n'était pas de reprendre tous les liquides et d'en déterminer la valeur du coefficient de conductibilité calorifique intérieur  $k$ , mais plutôt l'étude d'une méthode simple, tant au point de vue théorique qu'expérimental, de la vérifier et de l'appliquer à quelques liquides caractéristiques. Comme tels, j'ai choisi l'eau, la glycérine, la paraffine liquide et solide et enfin le mercure.

### A. EAU.

L'eau, préalablement bien bouillie pour la purger d'air, a été soumise à l'expérience que je viens de décrire. Je vais donner les résultats moyens de douze

séries, ainsi que les valeurs intermédiaires du calcul, et même  $k$ . L'une d'entre elles servira d'exemple pour reconnaître la qualité de l'observation et pour donner la suite complète du calcul.

Les soudures du couple thermo-électrique étaient à la distance  $D = 0\text{cm},92$ ; la constante du couple était  $C = 0,0500$ . — Les observations inscrites ne contiennent pas celles de la première période de l'expérience; car si l'on veut arriver à une certaine température  $T$ , il est inévitable de tâtonner un certain temps avec le régulateur de réglage et le courant  $J$  jusqu'à ce que le thermomètre dans le liquide chauffeur maintienne sensiblement cette température  $T$ .

TABLE G.

$z$	$T$	$t_a$	$J$	$E$	$N_o$	$N$	$N - N_o$
	o	o	Amp.	Volts			
5h—m	34,48	14,5	3,03	17,40	417	878	461
5 30	34,76	14,4	3,03	17,40	417	877	460
6 —	34,82	14,5	3,02	17,34	417	878	461
6 30	34,74	14,6	3,01	17,28	440	900	460
7 —	34,68	14,8	3,00	17,28	436	897	461
	34,70	14,56	3,017	17,34	—	—	460,5

Ainsi l'énergie électrique introduite dans le vase chauffeur est :

$$W' = J \cdot E = 3,017 \cdot 17,34 = 52,315 \text{ watts};$$

d'après (14) la correction à apporter est :

$$w = 0,112 \cdot 34,70 + 0,274(34,70 - 14,56) = 9,405 \text{ watts};$$

donc la valeur de l'énergie qui a passé, sous forme de

chaleur, au travers du liquide seulement est :

$$W = W' - w = 52,315 - 9,405 = 42,91 \text{ watts.}$$

Avec cette valeur et celle de la constante  $C$  du couple thermo-électrique, le coefficient de conductibilité de l'eau devient :

$$k = \frac{0,24 \cdot 0,92 \cdot 42,91}{0,050 \cdot 315 \cdot 460,5} = 0,001307 \text{ [cm., gr., sec.]}$$

Voici maintenant les moyennes des 12 séries faites avec l'eau ; elles sont réunies en deux groupes d'après la température  $T$  :

TABLE 7. — EAU.

Z	T	$t_a$	J	E	N-N <sub>0</sub>	D	T-t <sub>a</sub>	W'	w	W	k
	°	°	Amp.	Volts		cm.	°	Watts	Watts	Watts	
1h15m	29,52	15,82	2,70	15,70	372,3	0,92	13,70	42,39	7,61	34,78	0,001313
2 —	29,40	14,70	2,69	16,62	375,5	0,92	15,70	42,02	8,12	33,90	1269
2 —	29,16	14,80	2,76	16,08	387,0	0,92	14,36	44,38	7,19	37,19	1351
2 —	29,28	15,02	2,74	15,95	392,0	0,92	14,26	43,65	7,16	36,49	1308
1 30	29,52	11,42	2,70	15,74	370,0	0,92	18,10	42,56	8,82	33,74	1282
2 —	29,65	17,25	2,72	15,81	380,0	0,92	12,40	43,00	6,70	36,30	1343
3 —	29,30	15,50	2,68	15,62	379,2	0,92	13,80	41,85	6,50	35,35	1310
	29,40								Moyenne		0,001311
1 15	34,70	14,56	3,02	17,34	460,0	0,92	20,14	52,32	9,41	42,91	0,001307
3 —	34,20	15,00	3,05	17,49	474,0	0,92	19,20	53,34	9,08	44,26	1313
2 30	33,92	12,56	2,94	16,90	440,4	0,92	21,36	49,62	9,64	39,98	1276
1 30	34,29	16,49	2,99	17,19	437,0	0,92	17,80	51,40	8,71	42,69	1373
2 —	34,53	16,65	3,00	17,30	459,0	0,92	17,88	51,90	8,75	43,15	1322
	34,33								Moyenne		0,001318

D'après ces résultats, le coefficient de conductibilité de l'eau est variable avec la température :

$k$	Intervalle de température
0,001311	0° à 29°,40
0,001318	0° à 34°,33

Cela semble indiquer que  $k$  augmente légèrement avec la température. Quoique ce résultat paraisse probable, les différentes valeurs d'un même groupe sont trop écartées entre elles et leur moyenne pour que pareille conclusion soit admissible. Je dis simplement :

*A la température ordinaire le coefficient de conductibilité calorifique de l'eau est :*

$$k = 0,00131 \text{ (cm., gr., sec.)}$$

### B. GLYCÉRINE.

La glycérine employée avait une densité  $\delta = 1,235$ ; la constante du couple thermo-électrique était  $C = 0,050$ ; la distance des soudures était  $D = 0^{\text{cm}},92$ . Les observations se faisaient comme avec l'eau :

TABLE 8.

$z$	$T$	$t_a$	$J$	$E$	$N_o$	$N$	$N - N_o$
	°	°	Amp.	Volts			
2h 40m	29,46	16,3	2,20	12,35	435	865	430
3 40	29,40	15,7	2,20	12,34	436	866	430
4 40	29,30	15,2	2,20	12,33	438	868	430
	29,39	15,69	2,20	12,34	—	—	430

De là on obtient successivement :

$$W' = J \cdot E = 2,20 \cdot 12,34 = 27,15 \text{ watts,}$$

$$w = 0,112 \cdot 29,39 + 0,274(29^{\circ},39 - 15^{\circ},69) = 7,02 \text{ watts,}$$

$$W = W' - w = 27,15 - 7,02 = 20,13 \text{ watts,}$$

enfin

$$k = \frac{0,24 \cdot 0,92}{0,050 \cdot 315} \cdot \frac{20,13}{430} = 0,000656 \text{ (cm., gr., sec.)}$$

Les résultats des huit séries faites donnent les deux groupes des tables 9 et 10 :

TABLE 9. — GLYCÉRINE

<i>Z</i>	<i>T</i>	<i>t<sub>a</sub></i>	<i>T-t<sub>a</sub></i>	<i>J</i>	<i>E</i>	<i>W'</i>	<i>w</i>	<i>W</i>	<i>N-N<sub>0</sub></i>	<i>k</i>
	°	°	°	Amp.	Volts	Watts	Watts	Watts		
2h—m	29,36	16,23	13,13	2,22	12,39	27,50	6,87	20,63	432	0,000670
2 —	29,39	15,69	13,70	2,20	12,34	27,15	7,02	20,13	430	656
2 —	29,54	16,23	13,31	2,24	12,49	27,98	6,94	21,04	433	682
2 —	29,40	14,90	14,50	2,22	12,41	27,51	7,25	20,26	430	662
	29,42								Moyenne	0,000667

TABLE 10. — GLYCÉRINE

<i>Z</i>	<i>T</i>	<i>t<sub>a</sub></i>	<i>T-t<sub>a</sub></i>	<i>J</i>	<i>E</i>	<i>W'</i>	<i>w</i>	<i>W</i>	<i>N-N<sub>0</sub></i>	<i>k</i>
	°	°	°	Amp.	Volts	Watts	Watts	Watts		
2h—m	34,17	16,67	17,50	2,42	13,49	32,66	8,61	24,05	517	0,000654
2 —	34,54	15,47	19,07	2,44	13,62	33,28	9,08	24,20	524	649
2 30	34,64	16,80	17,84	2,44	13,49	32,96	8,75	24,20	523	650
2 —	34,30	14,50	19,80	2,37	13,51	32,01	9,26	22,75	516	620
	34,41									0,000643

Ainsi de 0° à 34°<sub>41</sub> la conductibilité est  $k = 0,000643$   
 et de 0° à 29°<sub>41</sub> »  $k = 0,000667$   
 soit plus petite à haute température qu'à basse tem-

pérature. Ce résultat est probable pour tout liquide ; il l'est beaucoup pour un liquide tel que la glycérine, dont la viscosité change rapidement avec la température. Si, malgré la faible différence des deux intervalles de température, on veut donner le coefficient de conductibilité en fonction de la température du liquide, elle est :

$$k = 0,00081 - 0,00001 . t$$

*A la température ordinaire le coefficient de conductibilité calorifique de la glycérine est*

$$k = 0,000655 \text{ (cm., gr., sec.)}$$

### C. PÉTROLE.

Le pétrole employé se vend ordinairement sous le nom de huile de sûreté (Kaiseröl) ; sa densité était  $\delta = 0,789$ . Les soudures du couple étaient à  $D = 0^{\text{cm}},92$ , et au galvanomètre il déterminait une déviation d'une division (un millimètre) pour  $0^{\circ},0406$  Celsius. La marche des expériences se voit d'après les lectures de la série suivante.

TABLE 11.

$z$	$T$	$t_a$	$J$	$E$	$N_o$	$N$	$N-N_o$
	°	°	Amp.	Volts			
6 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup>	29,42	14,6	1,70	10,02	318	766	448
6 43	29,45	14,6	1,70	10,01	323	767	444
6 51	29,44	14,6	1,68	9,97	325	771	446
6 59	29,42	14,6	1,68	9,97	328	773	445
7 07	29,42	14,8	1,66	9,97	323	766	443
7 35	29,42	14,7	1,66	9,97	320	764	444
	29,42	14,70	1,68	9,99	—	—	445

Le calcul sur ces données fournit :

$$W' = 16,79 \text{ watts, } w = 7,31 \text{ watts,}$$

$$W = 9,48 \text{ watts, et } k = 0,000368.$$

Voici les moyennes et les résultats pour  $k$  de cinq séries semblables :

TABLE 12. — PÉTROLE.

$Z$	$T$	$t_a$	$T-t_a$	$J$	$E$	$W'$	$w$	$W$	$N-N_0$	$k$
	°	°	°	Amp.	Volts	Watts	Watts	Watts		
1 h—m	29,42	14,70	14,72	1,68	9,99	16,79	7,31	9,48	445	0,000368
0 30	29,23	15,15	14,08	1,67	9,85	16,45	7,42	9,03	443	352
0 50	29,21	16,00	13,21	1,71	10,12	17,29	7,64	9,65	433	385
	29,29									0,000368
0 20	34,37	14,90	19,47	1,83	11,02	20,20	7,92	12,28	52	0,000403
0 40	34,31	15,20	19,11	1,83	11,00	20,16	7,99	12,17	522	403
	34,34									0,000403

Contraire à la manière d'être de la glycérine, la conductibilité du pétrole va en augmentant avec la température, et si, par une si petite différence de 2°,53 entre les températures moyennes 17°,17 et 14°,64 des intervalles 0° à 34°,34 et 0° à 29°,29, on veut déterminer le facteur de la température pour  $k$ , on obtient :

$$k = 0,000160 + 0,000014 . t.$$

*A la température ordinaire le coefficient de conductibilité calorifique du pétrole est*

$$k = 0,000385 \text{ (cm., gr., sec.)}$$

D. HUILE DE PARAFFINE.

La température de solidification de cette huile de paraffine est au-dessous de  $-20^{\circ}$ ; sa densité est  $\delta = 0,870$ . La distance des soudures du couple thermo-électrique était  $D = 0^{\text{cm}},92$ , et à une déviation au galvanomètre de  $1^{\text{mm}}$  correspondait  $0^{\circ},0406$ .

Dans sept séries les mesures ont donné les moyennes suivantes :

TABLE 13. — HUILE DE PARAFFINE.

<i>Z</i>	<i>T</i>	<i>t<sub>a</sub></i>	<i>T-t<sub>a</sub></i>	<i>J</i>	<i>E</i>	<i>W'</i>	<i>w</i>	<i>W</i>	<i>N-N<sub>0</sub></i>	<i>k</i>
	°	°	°	Amp.	Volts	Watts	Watts	Watts		
0h 30m	29,32	15,2	14,12	1,67	9,96	16,63	7,38	9,25	468,6	0,000344
1 —	29,45	15,9	13,55	1,67	9,86	16,44	7,65	8,80	476,3	319
0 50	29,30	14,9	14,40	1,63	9,72	15,84	7,35	8,49	463,2	317
0 50	29,11	14,2	14,96	1,67	9,78	16,32	7,13	9,20	455,4	349
	29,29							Moyenne		0,000331
0 40	34,30	15,7	18,60	1,81	10,86	19,66	8,13	11,53	552,7	0,000360
1 50	34,61	15,7	18,88	1,83	10,90	19,89	8,18	11,71	557,0	363
0 50	34,29	14,5	19,79	1,81	10,89	19,75	7,80	11,95	540,1	382
	34,40									0,000368

Pour l'huile de paraffine aussi, la conductibilité calorifique s'accroît avec la température; elle s'exprime, basée sur un petit intervalle toujours, par

$$k = 0,000119 + 0,0000145 \cdot t$$

*A la température ordinaire le coefficient de conductibilité calorifique de l'huile de paraffine est :*

$$k = 0,00035$$

### E. PARAFFINE SOLIDE.

La méthode n'est pas applicable à tous les corps solides, parce que, en général, on ne peut pas y introduire le couple thermo-électrique. Seuls les corps qui fondent à une température peu élevée peuvent servir. Il faut commencer par retirer le couple du vase chauffeur ; puis, à l'aide d'un support auxiliaire, on maintient le couple dans la position qu'il doit occuper dans le vase ; puis on verse le corps fondu. Celui-ci se solidifie, il serre le couple, et enfin on peut poser le vase chauffeur, en introduisant en même temps les fils de cuivre par le petit tube en laiton.

Dans le cas particulier de la paraffine, il faut la verser en plusieurs fois, et vers la fin par petites quantités, pour qu'elle puisse se solidifier, se refroidir et se contracter. La paraffine solide dépasse alors le bord du cylindre en verre. Pour la réduire exactement jusqu'au bord du cylindre, je l'ai rabotée à l'aide d'une règle en acier à bord assez vif. Le contact intime du fond du vase chauffeur avec la paraffine a été réalisé et assuré de la manière suivante : le vase chauffeur a été chauffé à environ  $70^{\circ}$  ; puis, avec une flamme Bunsen, la surface de la paraffine solide a été chauffée et légèrement fondue, et immédiatement après le vase chauffeur a été posé sur la paraffine et fortement lesté. Après le refroidissement lent le vase chauffeur adhère bien à la paraffine et restait collé jusqu'après la fin de la dernière série.

La paraffine a le point de fusion  $50^{\circ},4$ . La distance des soudures du couple thermo-électrique a été déterminée avant l'immersion à  $D = 0^{\text{cm}},955$ . Après les

mesures sur cette paraffine, je l'ai sortie en bloc avec le couple, en chauffant suffisamment le fond et le côté du vase qui le contient. Avec un couteau appliqué dans le plan du couple, j'ai enlevé une moitié de ce cylindre en paraffine; dans l'autre le couple était encore bien pris. La distance des soudures n'était plus que  $D = 0^{\text{cm}},90$ . En effet, la paraffine, en se solidifiant et en se refroidissant, s'est beaucoup contractée et elle a rapproché les branches du couple. C'est cette dernière valeur  $D = 0^{\text{cm}},90$  que j'ai introduite dans les calculs. Le couple thermo-électrique me donnait  $26^{\text{mm}},40$  de déviation au galvanomètre pour  $1^{\circ}$  de différence de température.

Dans cinq séries d'observations j'ai obtenu les moyennes suivantes :

TABLE 14. — PARAFFINE SOLIDE.

<i>Z</i>	<i>T</i>	<i>t<sub>a</sub></i>	<i>T - t<sub>a</sub></i>	<i>J</i>	<i>E</i>	<i>W'</i>	<i>w</i>	<i>W</i>	<i>N - N<sub>0</sub></i>	<i>k</i>
	o	o	o	Amp.	Volts	Watts	Watts	Watts		
0h 30m	29,51	16,13	13,38	1,490	8,82	13,14	7,72	5,42	268,8	0,0003736
0 40	29,30	16,55	12,75	1,506	9,00	13,56	7,81	5,75	280,6	3710
0 40	34,33	16,30	18,03	1,676	9,85	16,51	8,29	8,22	314,2	4736
0 30	34,47	16,10	18,37	1,653	10,06	16,63	8,31	8,32	317,6	4742
0 30	34,39	16,85	17,54	1,671	10,22	17,08	8,44	8,64	331,7	4715
	31,90								Moyenne	0,000423

La conductibilité de la paraffine solide augmente avec la température; toutefois d'une quantité moins grande que ne l'indiquerait le petit nombre de séries rapportées ci-dessus.

En 1878 j'ai étudié et mesuré la conductibilité de la paraffine solide <sup>1</sup> en la mettant sous forme d'une

<sup>1</sup> R. WEBER. *Dissert. inaug.*, Zurich, 1878. Voir aussi: Vierteljahrsschrift der Zürcher Naturf. Gesellschaft 1878.

sphère et en me basant sur l'état variable de la température; les températures limites étaient comprises entre  $-10^{\circ}$  et  $+20^{\circ}$ . La valeur indiquée pour  $k$  est

$$k = 0,000230 + 0,000014.t \text{ (cm., gr., sec.)}$$

Les nouveaux résultats pour la température supérieure concordent assez bien avec la valeur que donne cette formule. Les résultats pour la température inférieure sont trop petits; ils semblent trop petits aussi en les comparant aux résultats des corps de nature analogue.

Je vois la cause de ce défaut dans la possibilité, qu'à basse température il y a eu un espace vide, ou rempli d'air, entre le fond du vase chauffeur et la surface supérieure de la paraffine solide. La dilatation de la paraffine étant considérable, la contraction complète n'a pu se faire que par une séparation partielle des deux corps cuivre et paraffine. A haute température la dilatation aura chaque fois rempli ce vide. Aussi à la fin des mesures, j'ai observé sur le milieu de la surface de la paraffine une zone de quelques  $\text{cm}^2$ , qui n'a pas dû être en contact permanent avec le fond du vase chauffeur.

Considérant ce fait, il faudra admettre :

*A la température ordinaire le coefficient de conductibilité calorifique de la paraffine solide est :*

$$k = 0,000,47 \text{ (cm., gr., sec.)}$$

#### F. MERCURE.

Les manipulations avec le mercure exigent quelques modifications qui trouvent leurs causes dans la con-

ductibilité électrique et calorique et dans la grande densité du mercure.

Si les soudures du couple plongent simplement dans le mercure, comme dans le cas des autres liquides, une partie du courant dû à la force électromotrice aux soudures passera par le mercure, au lieu de passer par le galvanomètre. Or, cette dérivation, avec une nouvelle graduation du couple dans le bain de mercure, n'aurait pas d'importance, si elle était toujours la même. Mais puisqu'elle dépend de l'état de surface des soudures, du cuivre, des fils et du mercure, soit de quantités variables ou mal définies, il ne reste qu'à empêcher toute déviation. A cet effet, tous les fils ont été soigneusement isolés à la soie et ensuite couverts, ainsi que les soudures nues, d'une mince couche d'un vernis isolant, appliqué à chaud. L'isolation ainsi obtenue a été vérifiée, le couple étant plongé dans le mercure : un fil reliait l'un des pôles de l'élément Leclanché au bain de mercure, les fils du couple hors du mercure étaient reliés à l'une des bornes du galvanomètre disposé pour la mesure des courants thermo-électriques, l'autre borne était reliée au second pôle de l'élément. Le galvanomètre ne faisait aucune déviation, indiquant par là que le courant ne pouvait pas passer du bain de mercure à travers le vernis isolant sur le métal des soudures ou des fils du couple.

La grande densité du mercure, sa pression hydrostatique, en agissant sur les fils horizontaux du couple, aurait pu courber ou faire dévier les fils, ou les sortir d'un même plan vertical. Cela aurait changé la valeur de  $D$  qui doit entrer dans la formule pour  $K$ . J'ai donc remplacé les deux petits supports en ébonite, fixés au tiers de la distance des soudures à la partie courbée

à angle droit par deux nouveaux supports en ébonite, fixés aux mêmes points. Ces supports avaient plutôt la forme d'un trapèze avec une échancrure au milieu de chaque base ; la plus grande des bases avait environ 1<sup>cm</sup> de longueur ; elle appuyait par ses extrémités contre le fond du vase chauffeur. Ces appuis avec la rigidité des fils et d'un clou, à la partie du couple qui entre par un petit tube dans le vase chauffeur, étaient suffisants pour empêcher tout dérangement passager et définitif.

Les distances des soudures furent changées dans le cours des expériences ; elles étaient  $D = 0^{\text{cm}},97$ , puis  $D = 0^{\text{cm}},92$ , enfin  $D = 0^{\text{cm}},955$ , ainsi que l'indique la colonne des  $D$  de la table suivante. Dans toutes les mesures une différence de température aux deux soudures de 1° C déterminait au galvanomètre une déviation  $N - N = 26,40$  divisions.

La marche des observations étant passablement changée par la conductibilité calorifique assez grande du mercure, je donne d'abord les observations complètes sur une détermination de  $k$ , pendant laquelle  $D = 0^{\text{cm}},92$ .

TABLE 15.

$z$	$T$	$t_a$	$J$	$E$	$N_o$	$N$	$N-N_o$
	°	°	Amp.	Volts			
8h52m	29,68	15,5	4,95	30,97	456,0		
8 54	29,50	15,5	4,97	31,02	456,2	588,8	132,7
8 56	29,40	15,6	4,97	30,97		589,2	133,1
8 58	29,30	15,6	4,97	30,97	456,0		
9 —	29,06	15,6	5,01	31,20	455,6		
9 02	29,32	15,7	5,04	31,28		585,8	130,4
9 04	29,60	15,7	5,00	30,97	455,2		
9 06	29,62	15,8	4,99	31,11	466,0		
9 08	29,52	15,8	4,97	31,06		599,8	133,6
9 10	29,44	15,9	4,98	31,11	466,4		
9 12	29,42	15,9	4,99	31,06		600,4	134,1
9 14	29,40	16,0	4,99	31,06	466,2		
9 16	29,24	16,0	4,99	31,06		603,4	137,6
9 18	29,26	16,1	5,03	31,24	465,4		
9 20	29,26	16,2	5,00	31,24		601,0	135,6
9 22	29,26	16,2	5,00	31,24	465,4		
9 24	29,24	16,3	4,99	31,14		601,8	136,3
9 26	29,24	16,4	4,99	31,14	465,6		
	29,37	15,90	4,990	31,12	—	—	134,4

De là, par le calcul, on obtient successivement :

$$W' = J \cdot E = 4,990 \cdot 31,12 = 155,29 \text{ watts,}$$

$$w = 0,112 \cdot 29,37 + 0,274 (29,37 - 15,90) = 7,64 \text{ watts,}$$

$$W = 155,29 - 7,64 = 147,65 \text{ watts,}$$

et enfin :

$$k = \frac{0,24 \cdot 0,92 \cdot 26,40}{315} \cdot \frac{147,65}{134,4} = 0,02108 \text{ (cm., gr., sec.)}$$

Ces moyennes et résultats sont consignés dans la table suivante avec les moyennes et résultats des autres dix-sept séries en deux groupes, suivant la température la plus élevée dans l'intervalle  $0^{\circ}$  à  $T^{\circ}$ .

TABLE 16. — MERCURE.

Z	T	$t_a$	$T - t_a$	J	E	D	W'	w	W	N—N <sub>0</sub>	k
	°	°	°	Amp.	Volts	Cm.	Watts	Watts	Watts		
0h20m	29,56	14,96	14,60	4,772	29,88	0,97	142,60	7,40	135,20	132,4	0,01993
0 20	29,30	5,07	14,23	4,090	25,84	0,955	105,69	7,43	98,26	93,25	2024
0 20	30,04	15,03	15,01	4,840	30,15	0,955	145,91	7,47	138,46	139,6	1905
0 40	29,37	15,90	13,47	4,990	31,12	0,955	155,29	7,64	147,65	134,4	2108
0 20	29,92	17,00	12,92	4,730	29,99	0,955	141,85	8,00	133,85	128,2	2005
0 30	29,51	15,10	14,41	5,250	32,79	0,955	172,14	7,43	164,71	163,8	1934
0 40	29,52	16,30	13,22	5,118	31,92	0,955	163,38	7,76	155,62	154,2	1940
0 40	29,58	17,15	12,43	4,958	31,00	0,955	153,71	8,00	145,71	140,2	1917
0 25	29,41	16,00	13,41	5,216	32,39	0,955	168,95	7,73	161,22	166,3	1869
0 20	29,62	16,20	13,42	4,794	29,93	0,955	143,48	7,75	135,73	130,0	2005
0 15	29,55	16,00	13,57	4,929	30,55	0,955	150,41	7,75	142,66	133,5	2052
	29,58									Moyenne	0,01977 <sub>4</sub>

TABLE 17. — MERCURE.

Z	T °	t <sub>a</sub> °	T - t <sub>a</sub> °	J Amp.	E Volts	D Cm.	W' Watts	w Watts	W Watts	N - N <sub>0</sub>	k	
												0h 15m
0 30	34,45	14,75	19,70	5,322	33,53	0,92	170,55	7,90	170,65	164,8	1916	
0 40	34,34	15,00	19,34	5,350	34,55	0,955	184,84	7,94	176,90	170,9	1988	
0 30	34,42	16,80	17,62	5,430	34,09	0,955	185,21	8,44	176,77	167,2	2030	
0 35	34,77	17,05	17,72	5,530	34,43	0,955	190,38	8,55	181,83	182,3	1918	
0 25	34,30	16,15	18,15	5,260	32,80	0,955	172,47	8,44	164,03	162,6	1938	
0 30	34,30	16,10	18,20	5,407	33,57	0,955	181,52	8,44	173,08	170,0	1956	
	34,46											Moyenne
												0,01961 <sub>4</sub>

Il résulte de ces dix-huit séries, que à la température ordinaire le coefficient de conductibilité calorifique du mercure est :

$$k = 0,0197 \text{ (cm., gr., sec.)}$$

La moyenne des  $k$  pour l'intervalle de température la plus basse, de  $0^{\circ}$  à  $29^{\circ},58$ , est un peu plus grande que la moyenne des  $k$  pour l'intervalle plus élevé, de  $0^{\circ}$  à  $34^{\circ},46$ . Cela indiquerait que la conductibilité du mercure va en diminuant pour des températures croissantes. Ce même résultat a été obtenu par M. A. Berget<sup>1</sup> tandis que d'autres expérimentateurs ont trouvé le résultat contraire ; et M. Herwig<sup>2</sup> arrive au résultat qu'elle est indépendante de la température.

D'après mes résultats d'expérience, le coefficient de conductibilité, calculé sur une très petite différence de température, s'exprimerait par

$$k = 0,0207 - 0,000065.t \text{ (cm., gr., sec.)}$$

## 7. Comparaison des résultats.

Les coefficients de conductibilité calorifique de certains des liquides étudiés dans ce qui précède ont été déterminés par plusieurs expérimentateurs. Ils ont tous opéré d'après des méthodes différentes, se basant soit sur l'état stable de la température du corps, soit sur l'état variable de température. Il est intéressant de comparer ces résultats, et je les résume dans la table qui suit, en réduisant tous les résultats aux unités cm., gr., sec. et  $1^{\circ}$ .

<sup>1</sup> A. BERGET. C. R. Paris. t. 107, p. 171; 1888, et t. 106, p. 1152; 1888.

<sup>2</sup> HERWIG. Pogg. Ann. 151, p. 177; 1862.

TABLE 18.

Eau	Glycérine	Pétrole	Paraff. liq.	Paraff. sol.	Mercure	Observateurs
0,00156					0,0177	Angström Lundquist <sup>1</sup>
	0,000673					Winkelmann
0,00145					0,0154	Lorberg <sup>2</sup>
0,00124	0,00067				0,01612	H.-F. Weber
0,00131			0,000445			Christiansen <sup>3</sup>
0,00145						Bottomly
0,00158	0,00064	0,000355				Grätz
0,0013			0,00045			Chree
					0,02015	Berget <sup>4</sup>
0,00136						Less <sup>5</sup>
0,00143						Milner et Chattok
0,00131	0,000655	0,000385	0,00035	0,00047	0,0197	Rob. Weber

On voit dans ce tableau que mes résultats sont plutôt petits, sauf pour le mercure. Pour celui-ci mon résultat se rapproche beaucoup de celui de M. A. Berget, et il est avec celui-ci parmi les plus grands. Malgré cela, c'est justement la disposition expérimentale de M. Berget qui ne m'inspire pas entière confiance: le calorimètre *Bunsen* est excellent pour la mesure d'une quantité de chaleur limitée et indépendante du temps, mais il n'est guère applicable pour la mesure d'un courant de chaleur, soit pour la mesure d'une quantité de chaleur qui dépend du temps.

Dans son appareil, M. Berget surmonte le réservoir à glace du calorimètre *Bunsen* d'une couche de mercure de 20<sup>cm</sup> environ et de 9<sup>cm</sup> de diamètre; en

<sup>1</sup> LUNDQUIST. Upsala Universitats arsskrift, 1869.

<sup>2</sup> LORBERG. Wied. Ann. 14, p. 291, 1881.

<sup>3</sup> CHRISTIANSEN. Wied. Ann. 14. p. 13, 1881.

<sup>4</sup> A. BERGET. Thèse inaug., Paris, 1887.

<sup>5</sup> CH.-H. LESS. Proc. Roy. Soc., 62, p. 286, 1898.

même temps il prolonge l'éprouvette du tube central, au delà de cette couche de mercure. Le haut du mercure est chauffé par un courant de vapeur d'eau, le plan limite inférieur du mercure est refroidi par de la glace; un courant de chaleur s'établit et se maintient de haut en bas le long du mercure jusqu'au fond de l'éprouvette et, au travers d'elle, jusqu'à la glace du calorimètre. M. *Berget* suppose alors que la température du mercure dans l'éprouvette et dans le plan horizontal, où commence la grande masse de mercure, soit zéro degré, et que la température au haut du mercure soit  $0^{\circ},3$  à  $0^{\circ},4$  au-dessous de la température de la vapeur d'eau bouillante, déduite de l'observation du baromètre. Il arrive ainsi dans les quatre séries à des différences de température, à introduire dans la formule pour  $k$ , variant de  $99^{\circ},5$  à  $100^{\circ},1$ . Or, ces différences sont trop grandes; car la température inférieure surtout n'est pas la température adoptée de zéro degré, et la température supérieure serait, d'après mes expériences, plus basse que celle déterminée et corrigée par M. *Berget*. J'estime que pour les deux causes la différence de température est de plusieurs degrés inférieure à  $99^{\circ},5$ . Il n'y a, en effet, pas de doute que l'eau en contact intime avec la glace du réservoir à glace du calorimètre a zéro degré, mais en ces couches de contact seulement. La couche qui suit sera déjà plus chaude, parce qu'elle fournit la chaleur nécessaire à la fusion de la glace; ainsi, de couche en couche d'eau, la température monte vers la paroi de l'éprouvette, vers le mercure dans l'éprouvette, dans ce mercure même jusqu'au plan limite horizontal de la grande masse de mercure, et plus loin. Donc la température du mercure dans l'éprouvette au niveau de ce plan horizontal sera

nécessairement supérieure à zéro degré. Quant au nombre de degrés qu'il faut, il dépend évidemment des dimensions relatives du calorimètre, et aussi de l'eau, du verre et du mercure ; je le crois, ensuite de mes très nombreuses expériences variées, de plusieurs unités. Pour des raisons analogues et à cause de la résistance au passage, je croirais plus grande la correction à apporter à la température de la vapeur d'eau que celle faite et mesurée par M. *Berget*. Mais, si la différence de température est trop grande, la valeur de  $k=0,02015$  est trop petite.

Il y a une autre partie de l'appareil qui me paraît occasionner une erreur ; cette fois avec l'effet de diminuer la valeur de  $k$ . La chaleur est amenée au calorimètre avec beaucoup de soins depuis en haut et au travers du mercure ; elle doit agir sur la glace et le mercure du calorimètre, c'est l'effet voulu. Mais, très probablement, une autre quantité de chaleur a été amenée au calorimètre une fois par le tube latéral rempli de mercure et venant de la température de l'air ambiant, et puis par le bas de l'appareil, par le bloc en bois, par le tube horizontal rempli de mercure, c'est l'effet non voulu. D'après le dessin donné par M. *Berget*, il n'est pas possible de juger d'une manière absolue. La quantité de chaleur amenée ou non amenée dépend de la manière en laquelle l'expérience a été conduite, puis des dimensions et de la nature des pièces constituant la partie inférieure de l'appareil. Cette dernière quantité de chaleur ferait augmenter la quantité de glace fondue, et le coefficient serait trop petit.

Puisque les deux effets signalés agissent en sens contraire sur la valeur de  $k$ , il est toujours possible que la valeur indiquée par M. *Berget* soit juste.