



Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. - Méthodes optiques d'observation et d'enregistrement

Henri Bénard

► **To cite this version:**

Henri Bénard. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide. - Méthodes optiques d'observation et d'enregistrement. J. Phys. Theor. Appl., 1901, 10 (1), pp.254-266. <10.1051/jphystap:0190100100025400>. <jpa-00240502>

HAL Id: jpa-00240502

<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00240502>

Submitted on 1 Jan 1901

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LES TOURBILLONS CELLULAIRES DANS UNE NAPPE LIQUIDE. — MÉTHODES OPTIQUES D'OBSERVATION ET D'ENREGISTREMENT ;

PAR M. HENRI BÉNARD.

Dans une nappe mince de liquide qui est, en régime permanent, le siège de la circulation décrite dans un précédent article⁽¹⁾, les vitesses des courants sont assez considérables pour que les surfaces isobares ne puissent plus être regardées comme des plans horizontaux. En particulier, la surface libre n'est pas plane; elle présente d'ailleurs exactement les mêmes éléments de symétrie que la circulation interne. Le sens des dépressions superficielles est facile à prévoir, d'après le sens des courants : il faut un excès de pression pour que l'afflux centripète des couches inférieures, au voisinage de la paroi du fond, puisse avoir lieu, malgré la viscosité du liquide : aux centres de cellules correspondront donc des centres de dépression.

Des méthodes optiques très précises sont nécessaires pour mettre en évidence ces différences de niveau, qui restent extrêmement faibles (de l'ordre de 1μ au plus pour une épaisseur de 1 millimètre de spermaceti à 100°). Mais leur petitesse même rend intéressante l'application à cette surface liquide des procédés optiques employés pour étudier les petites déformations des surfaces solides polies.

Les méthodes principales qui ont servi soit à l'observation directe, soit à l'enregistrement photographique, vont être passées rapidement en revue, chacune d'elles ayant une valeur d'information particulière.

D'une façon générale, l'appareil permet de faire tomber sur la nappe liquide un faisceau de lumière rigoureusement parallèle et vertical, et d'étudier soit le faisceau réfléchi par la surface libre, soit le faisceau transmis. Dans ce but, une grande partie du fond plan de la cuve a été simplement dépolie et noircie : dans la partie correspondante du champ, la lumière est uniquement réfléchie par la surface libre du liquide. Mais, au centre de la cuve, un miroir circulaire d'acier, optiquement plan, a été encastré dans le bloc de

(1) *J. de Ph.*, 3^e série, t. IX, p. 313-324; 1900.

fonte, son plan coïncidant rigoureusement avec celui du reste de la cuve; ce miroir réfléchit, sous l'incidence normale, le faisceau transmis par la nappe liquide. Dans la portion correspondante du champ, on a donc superposition du faisceau simplement réfléchi par la surface libre, et du faisceau transmis par la nappe, réfléchi sur le miroir d'acier et réfracté de nouveau à la sortie; mais, ce dernier étant de beaucoup le plus intense, la superposition des deux faisceaux n'offre aucun inconvénient quand on veut observer ou photographier le second. Dans une des méthodes, on les utilise d'ailleurs tous les deux pour les faire interférer.

On ne peut songer à décrire ici les dispositifs particuliers à chacune de ces méthodes. Toutes comportent les parties essentielles suivantes :

1° Un système convergent à axe optique horizontal, qui concentre la lumière d'une source intense, monochromatique ou blanche, suivant les cas, sur un très petit prisme à réflexion totale, isocèle, rectangle, diaphragmé par un écran dont l'ouverture, circulaire, a moins de 1 millimètre de diamètre.

2° Une lentille achromatique, à long foyer (60°) dont l'axe optique est rigoureusement vertical. Le petit prisme a sa face horizontale diaphragmée située dans le plan focal de cette lentille, et le centre du petit trou est à 0°,15 de son axe optique. Le faisceau parallèle incident forme donc avec la verticale un angle de quelques minutes seulement : si la réflexion avait lieu sur un miroir plan horizontal, l'autocollimation donnerait une image conjuguée située dans le même plan focal, à 0°,30 seulement du petit trou lui-même.

3° Le faisceau réfléchi, soit par la surface libre du liquide, soit par le miroir d'acier, repasse par la lentille collimatrice. Suivant la position d'un second prisme à réflexion totale, placé au-dessus du plan focal et mobile entre glissières, on peut le recevoir soit dans une lunette à axe optique horizontal, dont l'oculaire a une très grande course, soit dans une chambre photographique dont l'objectif a son axe optique vertical.

Enfin un troisième système optique récepteur, dont l'axe est horizontal, permet l'étude du faisceau réfléchi, sans le faire repasser par la lentille collimatrice : c'est alors une lame à faces parallèles, inclinée à 45°, placée au-dessous de cette lentille, qui renvoie horizontalement le faisceau à étudier sur l'axe d'un banc d'optique; mais la glace a l'inconvénient de doubler les images.

Première méthode. — *Franges d'interférence à grande différence de marche dans l'air entre la surface libre du liquide et une surface plane horizontale.* — Cette méthode, qui n'utilise que la lumière réfléchiée par la surface libre, donne directement les courbes de niveau de cette surface. En employant une des sources intenses monochromatiques de l'arc électrique jaillissant dans le vide entre deux électrodes de mercure (longueur d'onde : $0\mu,4358$), tel que l'emploient MM. Pérot et Fabry (1), on a pu arriver à concilier les conditions d'intensité lumineuse et de bonne visibilité des franges, de façon à les photographier, malgré leur mobilité que toutes les précautions ne peuvent supprimer complètement, et cela avec une durée de pose de $0^s,2$ environ.

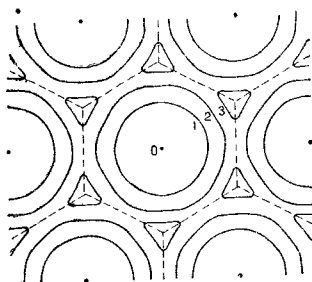


FIG. 1.

La *fig. 1* donne les courbes de niveau dessinées dans le cas où le régime permanent limite (hexagonal régulier) est supposé établi. La description des formes que présente cette surface peut se résumer à l'aide des expressions usitées en topographie :

Le centre de chaque hexagone cellulaire est un *ombilic* concave, *centre de dépression*. Chaque sommet ternaire commun à trois polygones est un *sommet* topographique (presque un trièdre). Le réseau polygonal est constitué de *lignes de faite*, séparant les uns des autres les différents *bassins*; la surface libre de chaque cellule forme chacun de ces bassins hexagonaux. Une *ligne de thalweg* joint deux à deux les ombilics concaves contigus; ce thalweg est d'ailleurs très peu dessiné et s'évanouit complètement aux ombilics.

(1) *C. R.*, t. CXXVIII, p. 1156; 1899; — et *J. de Phys.*, 3^e série, t. IX, p. 369; 1900.

Lignes de thalweg et lignes de faite se coupent à angle droit aux *cols*, qui sont les milieux des côtés de l'hexagone : en ces points, la courbe de niveau présente un point double. Les lignes de faite sont, — relativement, — de véritables crêtes, séparant deux *versants* presque plans au voisinage immédiat de la crête ⁽¹⁾.

Tous les points homologues étant sur la même courbe de niveau, on voit que la seule définition de cette surface, même si l'on ne savait rien de la circulation interne, conduirait, dans le régime permanent limite, à définir les mêmes éléments de symétrie et la même périodicité sur trois directions de rangées à 60° l'une de l'autre.

Deuxième méthode. — Foyers et lignes focales remarquables. — La surface libre formant miroir, on peut obtenir en particulier, en mettant convenablement au point, dans chaque cas, le système optique récepteur :

1° Les foyers en quinconce des miroirs concaves que forment les ombilics;

2° Le réseau polygonal de lignes focales, que donnent les crêtes fonctionnant comme miroirs cylindriques convexes.

Si l'on utilise la lumière transmise par la nappeliquide et réfléchi par le miroir d'acier, on obtient :

3° Les foyers en quinconce des lentilles concaves que forment les ombilics (lentilles plan-concaves, doublées par le miroir d'acier);

4° Le réseau polygonal donné par les crêtes fonctionnant comme lentilles cylindriques convexes.

On peut calculer les rayons de courbure correspondants d'après la mise au point de la lunette réceptrice, mais ces mesures manquent de précision, car la mise au point optimum est mal définie : les aberrations sont inévitables, chaque bassin cellulaire se comportant à peu près, dans sa partie centrale, comme un miroir hyperbolique; on ne peut songer à diaphragmer toutes les cellules, pour n'utiliser que les miroirs sphériques osculateurs aux ombilics concaves.

Les foyers ponctuels (1° et 3°) donnent un mode d'enregistrement purement optique du quinconce formé par les centres de cellules. — Les lignes focales (2° et 4°) enregistrent le réseau de polygones. — Le quatrième procédé est particulièrement avantageux pour la pho-

(1) Dans la région du champ occupée par le miroir d'acier, ces crêtes forment donc de véritables diprismes : on obtient en effet les franges correspondantes, parallèles à la crête.

tographie : on obtient le réseau dessiné par un trait lumineux intense, régulier et fin, comme tracé au tire-ligne. — C'est le procédé qui a

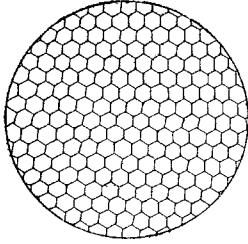


FIG. 2. — Grandeur naturelle (calqué sur une photographie).
Température : 60°. Épaisseur : 640 μ .



FIG. 3. — Grandeur naturelle.
Température : 88°. Épaisseur : 753 μ .

été seul utilisé pour les mesures définitives des dimensions transversales des cellules (*fig. 2 et 3 reproduites en négatif*).

Troisième méthode. — Relief exagéré de la surface libre (lumière réfléchie, ou lumière transmise). — On connaît la méthode admirable de Foucault pour rendre visibles, en les exagérant des milliers de fois, les moindres défauts des miroirs de télescopes. Un procédé analogue permet d'observer les plus petites inégalités d'une surface presque plane, par rapport au plan parfait. Il suffit, dans le dispositif décrit, de déplacer un petit écran dans le plan focal de la lentille

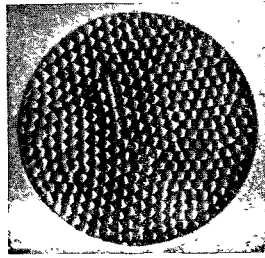


FIG. 4. — Grandeur naturelle.
Température : 90°. Épaisseur : 430 μ .

collimatrice, de façon à intercepter, dans la portion la plus rétrécie du faisceau de retour, les rayons les plus inclinés dans une certaine direction. La lunette ou la chambre photographique qui reçoit le

reste du faisceau est mise au point sur la surface libre elle-même : on obtient un relief énormément exagéré de cette surface, qui paraît éclairée en lumière parallèle oblique. Ce procédé convient surtout en lumière transmise. La *fig. 4* montre le résultat obtenu : comme tous les reliefs, il faut savoir dans quel sens l'interpréter : avec l'exagération qu'il donne, les crêtes paraissent des arêtes vives, bien que le rayon de courbure minimum réel soit encore de 15 centimètres. La sensibilité de ce procédé a permis de déceler des différences de niveau inférieures à 0^m,01 correspondant à des pentes de $\frac{1}{500.000}$ par rapport au plan horizontal.

Quatrième méthode. — *Franges d'interférence entre les deux faces de la lame liquide elle-même.* — Le dispositif général est le même : on utilise la région du champ occupée par le miroir d'acier ; mais la source employée est l'arc au mercure dans le vide. On a, en lumière monochromatique, les franges d'interférence entre le faisceau réfléchi par la surface libre et le faisceau réfléchi par le miroir d'acier. Elles donnent les courbes d'égale différence de marche, et leurs formes tiennent à la fois à la répartition des épaisseurs et à la répartition des températures internes de la nappe liquide, c'est-à-dire des indices de réfraction. Comme on connaît, par les méthodes précédentes, les courbes de niveau de la surface libre, la méthode actuelle renseigne donc sur la distribution des isothermes moyens, la moyenne étant faite sur chaque verticale. L'axe de chaque cellule est d'ailleurs la droite verticale la plus chaude ; le résultat de la comparaison donne donc l'ordre de grandeur des écarts extrêmes des températures des divers points de la nappe liquide. Ces différences sont très faibles, de l'ordre de 1° au plus⁽¹⁾.

Les franges données par la lame liquide ont tout à fait les formes dessinées *fig. 4* ; si le miroir d'acier est bien plan et rigoureusement horizontal, leur régularité est parfaite : le même motif se répète indéfiniment ; mais leur mobilité et le peu d'opposition entre les

(1) Une expérience d'un tout autre genre renseigne sur les isothermes superficiels. On laisse refroidir très lentement le liquide jusqu'à sa température de solidification : les isochrones de solidification sont identiques à ce que seraient les isothermes superficiels, en régime rigoureusement permanent : la solidification commence aux sommets et les courbes en question ont des formes analogues aux courbes de niveau de la *fig. 1*. L'hétérogénéité des températures de la nappe a donc suffi dans ce cas à créer des cloisons inter-cellulaires solides.

maxima et les minima, dû à la grande inégalité des faisceaux interférents, les rend bien difficiles à photographier.

ÉTUDE QUANTITATIVE DU RÉGIME PERMANENT.

Les mesures effectuées ont été d'ordre géométrique, cinématique, thermométrique et dynamique. J'indiquerai d'abord le principe des méthodes et la précision de chaque espèce de mesures.

1° *Mesures d'ordre géométrique.* — Les épaisseurs de la nappe liquide sont mesurées avec une erreur probable de 2μ environ, soit une erreur relative de $\frac{1}{250}$ à $\frac{1}{300}$. Le procédé consiste à amener une pointe fine, visée par un microscope à long foyer, en contact avec son image donnée par réflexion sur la surface liquide; le déplacement vertical de la pointe est amplifié par un levier portant une croisée de réticule que l'on vise à l'aide d'un cathétomètre.

Les différences de cotes des divers points de la surface libre sont mesurées à $0^{\text{m}},02$ près, sur les clichés de franges.

Les dimensions latérales des cellules s'obtiennent en comptant, sur les photographies du réseau polygonal, le nombre d'hexagones qui couvrent une surface donnée, celle du miroir d'acier circulaire. Ce dénombrement a été effectué, en projection, sur une centaine de clichés analogues à ceux que reproduisent les *fig. 2* et *3*: il est nécessaire, cela va sans dire, d'évaluer la valeur des fractions de cellules qui se trouvent coupées par le cercle limitant le champ. Les valeurs qu'on en déduit pour la distance entre les centres des cellules contiguës, distance qu'on désignera désormais par λ , ont une précision relative très grande, du même ordre que celle des mesures d'épaisseur $\left(\frac{1}{200}$ à $\frac{1}{300}\right)$.

2° *Mesures d'ordre cinématique.* — Ce sont des mesures de périodes. A l'aide de la lunette horizontale décrite, on suit, en projection horizontale, les oscillations isochrones d'une particule solide incorporée, qui se détache en noir sur le fond lumineux brillamment éclairé que limite le disque d'acier; on mesure la durée des oscillations à l'aide d'un chronomètre à pointeur. Pour rendre visibles les contours des cellules, il suffit de provoquer en même temps, par la troisième méthode optique, le relief de la surface libre: on peut donc évaluer la longueur des filets projetés horizontalement.

3° *Mesures d'ordre thermique* (flux de chaleur et températures). — Le bloc cylindrique de fonte précédemment décrit, qui sépare la nappe liquide de l'étuve à 100°, est parfaitement protégé contre toute déperdition latérale : de cette façon, les isothermes sont des plans horizontaux, et le flux de chaleur vertical est uniforme dans tout le plan. On s'en assure à l'aide de couples thermo-électriques très sensibles (fer-constantan), et l'on calcule ce flux vertical en mesurant la différence des températures en deux points de l'axe du cylindre situés à 5 centimètres de distance verticale. Pour avoir une précision relative de $\frac{1}{20}$ sur les mesures de flux, il a fallu étudier, pour les couples et le galvanomètre, les dispositifs les plus sensibles, donnant la différence des deux températures à 0°,005 près.

A défaut de procédé thermométrique direct pour déterminer la température moyenne de la nappe liquide, on a pris la température du fond de la cuve, déduite des mesures thermo-électriques effectuées en différents points sur l'axe du bloc. La quatrième méthode optique (franges formées par la lame liquide elle-même) a justifié cette assimilation, puisque la couche liquide n'a certainement pas, entre ses divers points, de différences de température dépassant 1°.

Pour étudier l'influence de la température sur les dimensions transversales, on a provoqué une variation continue, mais très régulière et extrêmement lente des conditions thermiques ; pour cela, le bloc, préalablement chauffé à 100°, est abandonné à lui-même, protégé contre toute déperdition latérale ou inférieure. La chaleur emmagasinée ne peut s'écouler que par convection à travers la nappe liquide. Avec ce dispositif, la variation des conditions thermiques est assez lente pour offrir toute sécurité au point de vue des lois du régime permanent. La vitesse de refroidissement est d'abord, au voisinage de 100°, de 0°,006 par seconde ; elle n'est plus que de 0°,001 par seconde, au voisinage de 50°. Le refroidissement de 100° à 50° dure quatre heures. On obtient, en prenant des clichés à intervalles égaux et effectuant des lectures simultanées au galvanomètre, autant de données numériques qu'on le désire. Aucune étuve à température fixe ne donnerait une constance plus parfaite. Des expériences effectuées avec des vitesses de refroidissement tout à fait différentes ont donné, pour la loi des dimensions en fonction de la température, des courbes exactement superposées, ce qui

justifie la méthode, en prouvant que les dimensions des cellules s'accoutument, sans retard appréciable, aux conditions thermiques lentement variables ⁽¹⁾.

LOIS NUMÉRIQUES.

I. — *Lois des dimensions transversales.*

1° *Influence de l'épaisseur.* — La loi grossièrement approchée, qu'ont révélée les premières mesures, est la proportionnalité des dimensions transversales à l'épaisseur. Autrement dit, les prismes cellulaires restent semblables quand l'épaisseur croît ⁽²⁾. Les mesures précises ont montré l'existence d'écarts systématiques et notables. Les nombres suivants sont extraits d'une série effectuée avec du spermaceti à 100° par la méthode des dépôts pulvérulents (troisième méthode mécanique, p. 208) :

| Épaisseur e . | Rapport $\frac{e}{\lambda}$. |
|----------------------|-------------------------------|
| 0 ^{mm} ,440 | 0,296 |
| 0 ,570 | 0,291 |
| 0 ,644 | 0,286 |
| 0 ,700 | 0,274 |
| 0 ,853 | 0,247 |

On trouvera plus loin les résultats définitifs à diverses températures.

2° *Influence du flux de chaleur.* — A l'ordre de précision des mesures, le flux de chaleur variant, la distance stable λ entre deux centres d'ascension contigus ne varie pas, la température restant la même; toutefois, il faut faire quelques réserves : les variations du flux étaient peu considérables.

3° *Influence de la température.* — La *fig. 5* résume les résultats : on a porté en abscisses les températures du liquide, de 100° à 50°,

(1) Cet article se rapportant exclusivement au régime permanent, on ne décrira pas ici le mécanisme de multiplication des cellules et de leur résorption. On trouvera tous les renseignements relatifs à l'état variable des courants dans deux articles parus dans la *Revue générale des Sciences* (13 et 30 décembre 1900).

(2) M. GUÉBARD avait trouvé la même loi pour son tachetage des plaques voilées abandonnées sous une couche mince de bain développeur (*Séances de la Soc. de Ph.*, 1897, p. 110).

et en ordonnées les valeurs du rapport $\frac{e}{\lambda}$. On voit l'ordre d'approximation de la loi $\frac{e}{\lambda} = \text{constante}$, aux diverses épaisseurs.

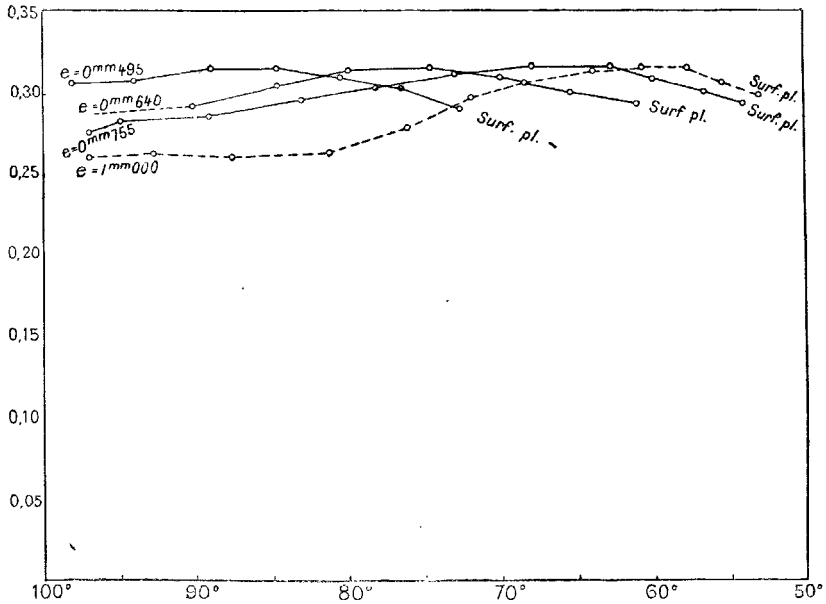


FIG. 5.

a) De 100° à 50°, le rapport $\frac{e}{\lambda}$, pour une épaisseur déterminée croît, passe par un maximum, puis décroît jusqu'à disparition des courbures superficielles (*Surf. pl.* sur les courbes). Il y a donc, entre 100° et 50°, une température pour laquelle les cellules passent par une dimension minimum. La température de ce minimum est, d'ailleurs, plus élevée aux faibles épaisseurs qu'aux grandes. Il a lieu :

| | | |
|----------|------|-----------------------|
| Vers 89° | pour | $e = 0\text{mm},50$ |
| Vers 60° | pour | $e = 1\text{mm},00$. |

b) D'une façon générale, les variations relatives du rapport $\frac{e}{\lambda}$ sont d'autant plus faibles, à température variable, que l'épaisseur est plus faible.

c) Quelle que soit l'épaisseur, tous les maxima de $\frac{e}{\lambda}$ sont égaux, à $\frac{1}{500}$ près, c'est-à-dire à l'ordre même de précision des expériences, l'épaisseur variant du simple au double⁽¹⁾.

Entre 100° et 50°, la surface du polygone cellulaire de spermaceti passe par un minimum. Pour ce minimum, quand l'épaisseur varie du simple au double, la similitude des prismes hexagonaux est rigoureuse.

d) Les courbes montrent que la même similitude, avec une autre valeur du rapport $\frac{e}{\lambda}$, a lieu, pour toutes les épaisseurs étudiées, quand la surface libre devient plane au degré de précision de l'appareil.

e) Enfin, relativement à la durée du régime variable initial, on peut remarquer que, plus l'épaisseur est faible, plus le régime permanent limite (hexagonal régulier) s'établit vite et facilement. A ce point de vue, il y a une différence énorme entre les épaisseurs de 0^{mm},5 et 1 millimètre.

II. — Résultats relatifs aux différences de cotes de la surface libre.

a) Pendant le refroidissement de 100° à 50°, les dépressions diminuent d'abord très vite, puis de plus en plus lentement; leurs variations sont de même sens que celles du flux de chaleur, mais plus rapides;

b) À épaisseur croissante, les dépressions relatives vont en croissant notablement;

c) Aux épaisseurs faibles, la surface libre est plane bien plus tôt qu'aux épaisseurs plus considérables. Les courbes de la *fig. 5* confirment tout à fait ce résultat;

d) Les mesures absolues les plus précises donnent :

Spermaceti : épaisseur, 1 millimètre. État permanent à 100° (avec flux de chaleur maximum).

Différence de cote entre un ombilic concave et un sommet. 0^u,96

Différence entre un ombilic concave et un col..... 0^u,75

⁽¹⁾ En réalité, une correction négligée déforme très légèrement les courbes et rend l'égalité des maxima moins rigoureuse; elle subsiste à $\frac{1}{50}$ près seulement: tous les maxima sont compris entre 0,299 et 0,306.

III. — *Lois des périodes et des vitesses.*

1° *Distribution des périodes dans chaque azimut.* — Les filets infiniment courts qui entourent le point immobile ont la période minimum, et la période croît d'abord très peu, puis plus rapidement, quand on passe sur des filets plus longs. Par suite de la viscosité du liquide, le mouvement est surtout ralenti dans la portion inférieure de chaque trajectoire, par suite de l'adhérence à la paroi du fond, ce qui crée une dissymétrie notable entre les deux portions de chaque trajectoire : la *fig. 1* du précédent article (p. 204) indique cette dissymétrie. Mais ce n'est que sur les filets tout à fait extérieurs que la période s'allonge énormément (la longueur inscrite est évaluée en projection horizontale en prenant comme unité la plus longue).

| Longueur du filet. | Période. | Vitesse ang. moy. | Vitesse linéaire moy. (cm par s) |
|--------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|
| < 0,1 | 1 ^s ,50 | 4,19 | " |
| 0,1 | 1,59 | 3,95 | 0,04 |
| 0,2 | 1,90 | 3,31 | 0,07 |
| 0,3 | 1,98 | 3,17 | 0,10 |
| 0,5 | 2,32 | 2,70 | 0,14 |
| 0,9 | 2,92 | 2,14 | 0,20 |

On voit que, si la vitesse angulaire moyenne décroît légèrement, à partir du point immobile, les vitesses linéaires continuent à croître très notablement.

2° *Influence de l'épaisseur.* — Il n'y a guère que les périodes minimum qu'on puisse comparer avec quelque précision.

On a trouvé la période minimum très sensiblement proportionnelle à l'épaisseur, en régime permanent à 100°. On en conclurait comme loi approchée, pour les filets les plus courts, l'égalité des vitesses linéaires en des points homologues, si le frottement, contre la paroi du fond, ne s'opposait à la similitude rigoureuse des formes des filets et des vitesses, quand l'épaisseur varie.

3° *Influence du flux de chaleur.* — Les mesures simultanées de périodes minimum et de flux de chaleur à travers la nappe, effectuées pendant le refroidissement, ont donné la loi approchée suivante, dans une étendue très considérable de variations :

La période minimum varie, à épaisseur égale, en raison inverse du flux total transporté.

On en conclut que *le flux est proportionnel aux vitesses en un point donné*. Ici encore, ce résultat ne peut être qu'approché : on mesure les vitesses sur les filets intérieurs, tandis que les échanges de chaleur s'effectuent, en réalité, surtout sur les filets extérieurs.

On peut d'ailleurs énoncer autrement les résultats expérimentaux : *la quantité de chaleur rayonnée par la surface libre est proportionnelle à la vitesse avec laquelle cette surface se renouvelle, grâce aux courants*.

4° *Ordre de grandeur du flux de chaleur transporté par convection*. — A 100°, dans l'appareil construit, une cellule de spermaceti de 1 millimètre d'épaisseur, transporte environ 10^{-2} joules par seconde, sous forme de chaleur. Il y a environ huit de ces cellules par centimètre carré. L'énergie cinétique de la cellule, en régime permanent, est 10^9 fois plus faible. Au point de vue énergétique, un milliardième de seconde suffirait à la mise en marche des courants, en supposant que le liquide ait déjà sa température moyenne identique à celle qu'il aura en régime permanent. Le rapprochement est artificiel, car l'état variable tient à de tout autres causes ; mais il montre l'énormité de la chaleur transportée, grâce aux courants de convection, renouvelant constamment les couches superficielles, qui rayonnent vers l'atmosphère extérieure.