



HAL
open science

Étude expérimentale des courants de convection dans une nappe liquide. - Régime permanent : tourbillons cellulaires

Henri Bénard

► **To cite this version:**

Henri Bénard. Étude expérimentale des courants de convection dans une nappe liquide. - Régime permanent : tourbillons cellulaires. J. Phys. Theor. Appl., 1900, 9 (1), pp.513-524. 10.1051/jphystap:019000090051300 . jpa-00240469

HAL Id: jpa-00240469

<https://hal.science/jpa-00240469>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES COURANTS DE CONVECTION
DANS UNE NAPPE LIQUIDE. — RÉGIME PERMANENT : TOURBILLONS CELLULAIRES ;

Par M. HENRI BÉNARD.

Le transport de chaleur par convection a été fort peu étudié d'une façon systématique. Il semble qu'on ne s'en soit préoccupé que pour l'éviter, lors des mesures de conductibilité thermique des liquides, en particulier dans les méthodes où l'on emploie un *mur* liquide horizontal, traversé par un flux de chaleur vertical uniforme, dirigé de haut en bas.

Des conditions uniformes dans le plan horizontal indéfini sont aussi les plus simples qu'on puisse réaliser pour étudier les courants de convection dans une nappe liquide horizontale : seulement ce sera dans toute l'étendue de la surface de niveau inférieure qu'agira la source chaude ; cette paroi horizontale du fond sera en même temps la face supérieure d'un mur métallique épais, à faces parallèles, traversé de bas en haut par un flux de chaleur vertical uniforme.

Quant à la surface de niveau supérieure de la nappe liquide, on est obligé, pour pouvoir observer les mouvements produits dans cette nappe, de la laisser libre, en contact avec l'atmosphère ambiante. C'est alors en partie grâce aux courants de convection de l'air lui-même que s'effectuent les échanges thermiques entre le liquide et l'atmosphère. Ce choix de conditions aux limites n'est pas le plus simple, car il crée une dissymétrie entre le mécanisme du gain de chaleur par la paroi du fond et celui de la déperdition par la surface libre. De plus, le liquide adhère à la paroi du fond et n'offre de vitesses horizontales finies qu'à une distance finie de cette paroi, tandis que la surface libre présente des vitesses horizontales finies.

L'uniformité des conditions aux limites offre ceci de remarquable qu'elle n'impose, *a priori*, aucune distribution particulière de mouvements ascendants et descendants ⁽¹⁾. Il est évident que le plus léger excès local de température suffit à créer un centre d'ascension, les

(1) Le cas actuel diffère donc complètement de celui que l'on a souvent réalisé, en plaçant une source chaude ponctuelle immergée dans une nappe liquide (en particulier, P. Czermak, *Wied. Ann.*, t. L, p. 329, 1893, etc.). Les courants liquides ont alors les formes bien connues du champignon à volutes multiples obtenu aussi (Oberbeck, 1877) par écoulement de liquide sous pression à l'extrémité d'un tube cylindrique immergé.

filets ascendants étant d'ailleurs compensés quelque part par des filets descendants d'égal débit ; mais ce que rien ne permet de prévoir, c'est qu'un régime permanent stable soit réalisable. Un tel centre d'ascension, une fois créé par une inégalité locale infiniment petite, c'est-à-dire par le hasard, persistera-t-il au même endroit, ou bien se déplacera-t-il sans loi définie, sans tendre vers une position limite ? L'expérience seule pouvait répondre à ces questions.

En fait, la viscosité seule semble intervenir dans cette question de stabilité ; quand le coefficient de frottement interne est très faible, de l'ordre de celui de l'éther à la température de 15°, la circulation tourbillonnaire qui se produit, sous l'action d'un flux de chaleur notable, est extrêmement instable. La distribution des mouvements varie alors continuellement ; elle s'effectue suivant un type trop compliqué pour être décrit ici, que j'ai enregistré par des procédés chronophotographiques, mais qui est le même pour tous les liquides à température suffisamment élevée ; la volatilité, dans ce cas, intervient d'ailleurs par le refroidissement superficiel et la variation progressive d'épaisseur qu'elle provoque.

Mais, à température suffisamment basse, qui est la température ordinaire pour la plupart des liquides usuels (alcools, hydrocarbures), les mouvements tourbillonnaires produits tendent rapidement vers un état limite remarquablement simple, régime permanent stable, où non seulement les centres d'ascension sont parfaitement localisés, mais où ces centres, régulièrement distribués, sont tous rigoureusement identiques. Ce sont les lois de ce régime stable que j'ai plus particulièrement étudiées.

Description de la circulation stable en régime permanent. — La distribution des mouvements tourbillonnaires dans la nappe liquide réalise, dans ce cas, la *structure cellulaire parfaitement régulière*. Ce sont les surfaces sans rotation instantanée (*surfaces de tourbillon nul*), qui correspondent aux *cloisons* de ces cellules ; ces surfaces sont des plans verticaux, divisant la masse entière en prismes égaux à base polygonale, dont le type le plus parfait est l'assemblage de prismes à bases d'hexagones réguliers égaux.

Dans chacun de ces prismes, que j'appellerai *cellules* :

1° Toutes les trajectoires des particules liquides sont des courbes fermées planes, et tous les plans de ces courbes sont verticaux ; toute trajectoire se projette donc horizontalement suivant un segment de droite ;

2° Toutes ces droites sont concourantes, c'est-à-dire que les plans verticaux en question sont les différents azimuts passant par l'axe vertical de la cellule ;

3° Dans chaque azimut, les filets ont la forme représentée *fig. 1* ;

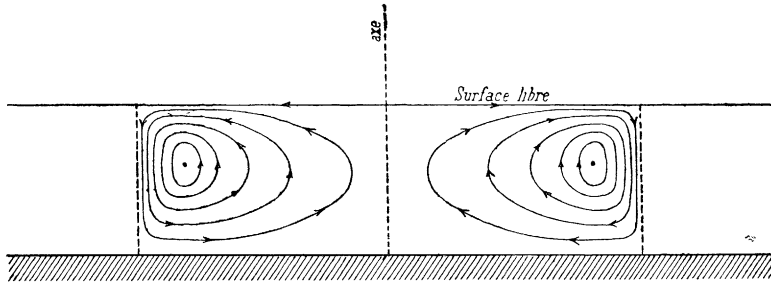


FIG. 1.

les flèches y indiquent le sens de la circulation : ascension du liquide chaud par les parties axiales, refroidissement dans les parties horizontales supérieures, où les filets sont centrifuges, puis descente brusque par la périphérie, près de la cloison cellulaire sans rotation, enfin afflux centripète le long de la paroi solide du fond et de nouveau ascension. Ces filets entourent un point de vitesse linéaire nulle et ont, d'autre part, un rectangle comme enveloppe extérieure. Le lieu des points immobiles forme la *ligne de tourbillon* fondamentale autour de laquelle tournent toutes les trajectoires. Cette ligne a la forme d'un polygone à sommets arrondis, à symétrie hexagonale, dans le cas parfaitement régulier ; elle épouse la forme du polygone cellulaire, en s'approchant d'ailleurs très près de la paroi sans rotation, mais ce n'est pas nécessairement une courbe plane.

Sur chaque filet, le mouvement périodique est parfaitement isochrone. Les filets infiniment petits ont la période minimum. A partir de ce point immobile, la période croît, mais lentement, c'est-à-dire que la vitesse angulaire moyenne va en décroissant légèrement. De plus, sur les filets les plus longs, le frottement du liquide contre la paroi du fond crée une inégalité notable entre les durées de parcours des deux moitiés de la trajectoire ; la moitié inférieure est parcourue bien plus lentement. Cette dissymétrie se traduit nettement sur la *fig. 1* : le point immobile est plus près de la surface libre que de la paroi du fond ; les filets figurés, à peu près équidis-

stants dans leur partie supérieure, sont de plus en plus écartés dans la portion inférieure du trajet.

Régime variable. — Établissement progressif du régime permanent limite. — Le régime parfaitement régulier, où toutes les cellules sont des prismes hexagonaux réguliers, égaux et alignés, n'est qu'un état limite; mais il semble qu'on puisse s'en approcher autant que l'on veut, au point de vue expérimental, en maintenant assez longtemps l'uniformité rigoureuse des conditions d'épaisseur (liquide non volatil), de température et de flux de chaleur. Dans ce cas, en effet, on constate que les variations du mouvement, en particulier les déplacements et déformations des cloisons cellulaires sans rotation, deviennent de plus en plus lentes, et que toutes ces variations tendent à la plus grande régularité du système. Pour préciser, on obtiendra, au début, très rapidement, en quelques secondes, la division en cellules polygonales à peu près égales, mais de formes très différentes. On en trouvera surtout à quatre, cinq, six ou sept côtés. C'est le cas de tous les clichés reproduits dans cet article. Mais de plus en plus les cellules s'égaliseront, ainsi que les côtés et les angles; les sommets quaternaires accidentels du début disparaîtront, pour donner des sommets ternaires; on pourra suivre, par exemple à l'aide de clichés effectués à intervalles réguliers, la progression constante du nombre d'hexagones. Enfin il n'y aura plus que des hexagones; les déformations seront alors devenues extraordinairement lentes: le régime sera presque rigoureusement permanent; mais cependant les hexagones eux-mêmes continueront à se régulariser et à s'aligner en rangées parallèles sur une étendue de plus en plus considérable de la nappe liquide.

Pour résumer ce qui précède, on peut énoncer les lois suivantes:

LOI DE L'ÉTAT VARIABLE INITIAL. — Avec des conditions uniformes dans le plan, invariables dans le temps, le régime hydrodynamique varie de plus en plus lentement, et toujours par accommodation progressive au régime de stabilité maximum.

LOIS DE L'ÉTAT PERMANENT LIMITE. — Dans tout plan horizontal de la nappe liquide, tous les éléments du mouvement, vitesse, tourbillon, température, etc., sont distribués périodiquement sur trois directions de rangées, à 60° l'une de l'autre, la distance entre deux nœuds étant la même, λ , sur toutes les rangées et dans tous les plans

horizontaux. Pour connaître la loi du mouvement dans la nappe entière, il suffit de la connaître dans un prisme ayant pour base une des mailles du réseau, et même, à cause des six plans de symétrie de l'hexagone, seulement dans un prisme ayant pour base $1/12$ de la surface de l'hexagone régulier.

La plus grande partie des mesures effectuées a eu pour but de déterminer les lois qui régissent λ , c'est-à-dire la distance stable de deux centres d'ascension contigus.

Les clichés obtenus par des procédés purement optiques, qui seront décrits dans un second article, montreront avec quelle précision, au point de vue expérimental, il a été possible d'atteindre cet état limite, *créant dans un milieu liquide une symétrie tout à fait comparable à celle d'un milieu cristallisé*.

Choix du liquide et des conditions expérimentales. — Le régime cellulaire régulier est réalisé, à la température ordinaire, par la plupart des liquides légèrement volatils (alcools, hydrocarbures, etc.), avec des flux de chaleur extrêmement faibles. Mais, pour éviter d'avoir une épaisseur lentement variable, du fait même de la volatilité, on a préféré opérer à des températures plus élevées, allant de 50° à 100° , avec des corps de volatilité pratiquement nulle à ces températures. C'est le cas d'un certain nombre de corps fusibles vers 50° (corps gras, éthers élevés, hydrocarbures, etc.). Toutes les mesures ont été effectuées, finalement, avec du spermaceti (palmitate de cétyle pur), dans des limites de température allant du point de fusion (vers 46°) jusqu'à 100° .

Méthodes d'enregistrement d'ordre purement mécanique. — La circulation décrite dans ses traits les plus généraux, a été étudiée par deux sortes de méthodes : les unes sont simplement mécaniques et reposent sur l'emploi de poussières solides ; les autres sont purement optiques et seront exposées dans un deuxième article. Je décrirai d'abord les propriétés mécaniques utilisées⁽¹⁾.

PREMIÈRE MÉTHODE. — *Particules solides insubmersibles* (de densité inférieure à celle du liquide). — Cette méthode utilise les vitesses finies de la surface libre. Dans chaque hexagone, les filets superficiels sont les rayons, parcourus horizontalement du centre vers la périphérie (*fig. 2*). Un grain de poussière très léger, tombant sur cette surface libre en A, suit d'abord, jusqu'en B, avec la

(1) La description détaillée des appareils et des mesures sera publiée ailleurs.

vitesse même du liquide, le filet superficiel sur lequel il est tombé; arrivé sur le contour du polygone en B, il abandonne le filet liquide plongeant, pour décrire le côté même BC de l'hexagone, mais bien

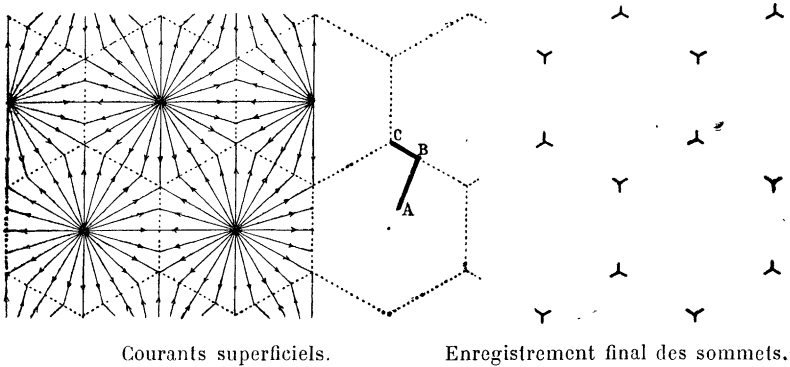


FIG. 2.

plus lentement, la résultante des deux vitesses superficielles concourantes en B étant désormais seule efficace. Enfin le grain de poussière s'arrête en C, sommet ternaire commun à trois cellules: c'est sa position d'équilibre stable.

On utilise ce parcours en ligne brisée comme il suit: on projette sur le liquide un nuage pulvérulent (lycopode); puis, une courte fraction de seconde après, on prend une photographie instantanée de la surface libre. Les grains encore dans l'air ne sont pas au point sur le cliché; ceux qui en sont à la première partie, AB, de leur trajet sur la surface liquide, restent pour ainsi dire invisibles, parce qu'ils sont disséminés sur toute la surface; mais ceux qui en sont à la seconde partie, BC, sont tous réunis sur un lieu composé de lignes et dessinent sur le cliché le contour polygonal par un trait d'une grande finesse (fig. 3). On a donc ainsi l'enregistrement du réseau polygonal.

Si l'intervalle écoulé depuis l'instant où l'on a projeté le nuage de poussière a été trop long (1 seconde, par exemple), tous les grains sont arrivés aux sommets ternaires; on n'a plus que l'enregistrement des sommets ternaires du réseau de polygones par les petits tas de lycopode, désormais immobiles en ces sommets.

DEUXIÈME MÉTHODE. — *Particules solides incorporées participant à la circulation* (de densité égale à celle du liquide). — Des grains

de poussière, de densité peu différente de celle du liquide, auquel ils ont été incorporés, décrivent les filets fermés avec des vitesses qu'on peut regarder comme identiques à celles des éléments liquides eux-mêmes. C'est par ce procédé que toutes les mesures d'ordre cinématique ont été effectuées ; on incorpore assez peu de corpuscules (quelques-uns au plus par cellule) pour qu'on puisse les suivre individuellement en projection horizontale sans confusion possible. Dans le dispositif adopté, les grains se détachent en noir sur un fond lumineux, et, de plus, une des méthodes purement optiques,

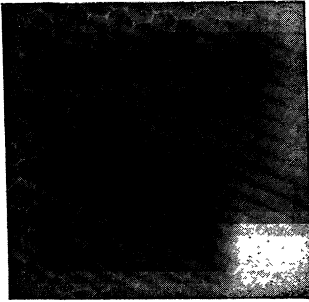


FIG. 3. — Grandeur naturelle.
Épaisseur : $0^{\text{mm}},950$.

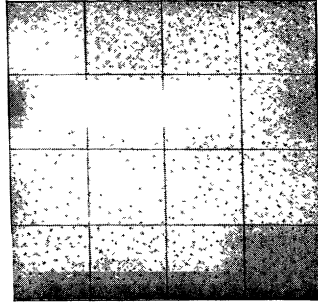


FIG. 4. — Grandeur naturelle.
Épaisseur : $0^{\text{mm}},440$.

qui seront décrites dans un second article, permet de rendre visible en même temps le réseau polygonal. On peut donc suivre, chronographe en main, les périodes sur les filets de différentes longueurs. Chaque grain oscille en projection horizontale, avec un isochronisme parfait. Cet isochronisme et l'immobilité du segment de droite décrit, dans le champ de la lunette par rapport à des repères fixes, montrent à quel point la permanence du régime a pu être réalisée dans ces recherches ; dans un cas, par exemple, plus de 3.000 périodes, c'est-à-dire une heure environ, se sont écoulées, sans déplacement appréciable du segment de droite décrit.

Il est évident qu'avec un grossissement et un éclairage convenables cette méthode se prêterait, s'il était nécessaire, à l'analyse détaillée du mouvement en projection horizontale, par enregistrement chronophotographique.

TROISIÈME MÉTHODE. — *Particules solides déposées* (plus denses que le liquide). — Cette méthode utilise les vitesses horizontales

centripètes au voisinage de la paroi du fond. Des particules solides plus denses que le liquide, primitivement incorporées, peuvent rester très longtemps en suspension, en participant à la circulation; mais le grain lourd, tout en restant dans le même azimut, passe peu à peu sur les filets de plus en plus longs, de sorte qu'une trajectoire en spirale se substitue au filet fermé décrit par un élément liquide. Arrivé sur les filets extérieurs, à forme limite rectangulaire, le grain, dans la partie inférieure de son trajet, est de plus en plus ralenti par le frottement contre la paroi du fond, jusqu'à ce qu'enfin il s'arrête et ne remonte plus. L'afflux centripète qui balaie la paroi horizontale finira par entraîner le grain au centre même de la cellule. On a donc ainsi l'enregistrement de chaque centre de cellule par un petit tas de poussière ponctuel, parfaitement net (fig. 4).

Si le réseau cellulaire est bien régulier, les petits tas ponctuels sont disposés en quinconces à symétrie senaire; tous les points équidistants se trouvent alignés sur trois directions de rangées à 60° l'une de l'autre. On voit que ce procédé convient parfaitement à la mesure de λ . Pour avoir la surface moyenne de chaque cellule, il suffit de compter sur les clichés le nombre de dépôts ponctuels contenus, par exemple, dans 1 centimètre carré. Quelques grains de poussière dans chaque cellule suffisent (1).

QUATRIÈME MÉTHODE. — *Particules solides impalpables en suspension.* — *Inégalité de distribution.* — Dans les méthodes précédentes, on emploie des corpuscules solides, visibles à l'œil nu ou au moins avec un faible grossissement, qui, suivant leur densité, servent à

(1) Un certain nombre de faits, anciennement signalés et restés inexplicés, sont en relation directe avec ce mécanisme de dépôt et résultent immédiatement de la circulation tourbillonnaire jusqu'ici insoupçonnée. J'en citerai un seul, qui est caractéristique : c'est le dépôt de *globulites* liquides, obtenu par évaporation d'un dissolvant sursaturé, en couche mince, par exemple de globulites de soufre dans l'essence de térébenthine. La régularité anciennement signalée des alignements de ces sphérules (Voir notamment : FRANKENHEIM, *Pogg. Ann.*, t. CXI, 1860; — BEHRENS, *Die Krystalliten*, 1874; — O. LEHMANN, *Molekularphysik*, etc.) résulte, comme celle des dépôts de poussières amorphes, de la régularité des tourbillons cellulaires de la nappe liquide. Ces alignements n'ont, en fait, aucune espèce de relation avec les directions cristallographiques des cristaux de soufre, qui se déposent en même temps ou par la suite. Vogelsang (*Pogg. Ann.*, 1871, t. CXLIII, p. 621) avait cru voir en ces globulites microscopiques les véritables particules de l'édifice cristallin du soufre. J'ai pu obtenir des globulites énormes, de quelques dixièmes de millimètre de diamètre, séparés par des intervalles réguliers de l'ordre de 1 millimètre.

indiquer les vitesses superficielles, intérieures, ou bien tangentes à la paroi du fond. La propriété qui reste à décrire est d'une interprétation moins immédiate : c'est l'inégale distribution des particules solides, extrêmement fines, en suspension sur les filets d'une masse liquide ou gazeuse, siège de courants de convection. Un très petit nombre de faits de cette nature avaient été observés jusqu'à ce jour, se rapportant presque tous aux gaz ⁽¹⁾. Lodge, cependant, a montré leur généralité et a fait quelques expériences sur les liquides. Celles que j'ai réalisées moi-même sur les liquides troubles m'ont donné des résultats identiques. On peut les énoncer comme il suit :

1° Au contact immédiat d'un corps solide, plus chaud que la masse fluide qui l'entoure, celle-ci forme une *gaine, absolument dénuée de particules solides* ;

2° Cette gaine est particulièrement tranchée et nette, quand les courants de convection sont tangents à la surface du solide ;

3° Quand les filets chauds ascendants quittent le contact de la paroi solide, ceux de ces filets, qui formaient la gaine sans particules, continuent leur route, en régime permanent ou non, également sans particules, dans tout leur parcours. Cette dernière propriété résulte simplement de ce que les particules extrêmement fines se meuvent *avec* le gaz ou le liquide et non pas à travers ce gaz ou ce liquide ; un filet fluide, *filtré* en un point quelconque de son trajet, reste filtré par la suite de son parcours à travers le milieu trouble. Ce prolongement de la gaine forme, par exemple, un *plan* vertical sans particules, au-dessus d'une tige chaude ou d'un objet quelconque chaud ayant une arête supérieure rectiligne. C'est ce plan qui a été observé en premier lieu (en le visant dans la direction de l'arête) par Tyndall. C'est à Lodge qu'on doit d'avoir reconnu la gaine dont il n'est que le prolongement ⁽²⁾.

Ces faits rappelés, sans insister sur leur explication, qui ne peut être donnée, comme l'a montré Lodge, que par les théories ciné-

(1) TYNDALL, *Proc. Roy. Inst.*, VI, p. 4; 1870; — LORD RAYLEIGH, *Proc. Roy. Soc.*, 21 déc. 1882; et *Nature*, XXVIII, p. 439; 1882; — O.-J. LODGE et J.-W. CLARK, *Proc. Phys. Soc. of London*, VI, p. 4; 1884; et *Phil. Mag.*, [5], XVII, p. 214; 1884; — J. AITKEN, *Proc. Roy. Soc. of Edimb.*, 21 janv. 1884, etc.

(2) Les auteurs cités, ayant surtout opéré sur des gaz illuminés par un faisceau intense, qui rend lumineuses seulement les particules solides, emploient les expressions de gaine sombre, de plan sombre (*dark plane*). Dans mes expériences avec les liquides troubles, observés par transparence, la gaine seule est translucide; c'est donc une gaine claire, le reste étant opaque. L'expression *gaine sans particules solides* me semble éviter toute ambiguïté.

tiques, c'est-à-dire, en réalité, en faisant intervenir les forces thermiques de Maxwell, les mêmes qui, aux très basses pressions, produisent les mouvements des ailettes des radiomètres, je me bornerai, à l'aide des faits établis eux-mêmes, à prévoir ce que donnera la circulation tourbillonnaire décrite, dans le cas d'un liquide rendu trouble à l'aide de particules en suspension extrêmement fines.

1° Le fond de la cuve, formant paroi chaude, balayée par des courants qui lui sont parallèles, sera tapissé d'une gaine liquide, mince et très nette, dénuée de particules ;

2° Les courants permanents entraîneront cette gaine ; les filets fermés qui la constituent dans la portion horizontale inférieure de leur trajet resteront sans particules sur tout leur parcours.

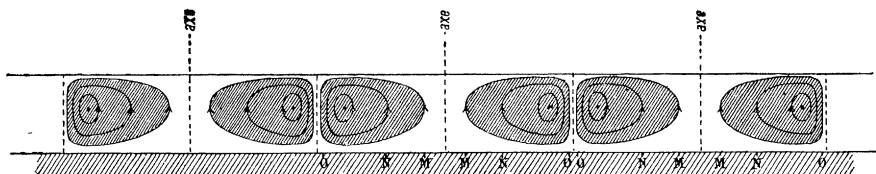


FIG. 5.

C'est bien, en effet, ce que l'on constate par le seul mode d'observation possible, c'est-à-dire *par transparence en projection horizontale* : la *fig. 5* montre, en coupe verticale, la distribution de matières pulvérulentes (*fig. 5*). On voit qu'on observera par transmission, en allant de l'axe vers la périphérie, un centre clair (MM), qui va en se dégradant lentement (MN), puis une zone (NO) d'opacité maximum à peu près constante, enfin, avec une transition brusque, un liseré étroit transparent (OO) traçant le contour polygonal. De plus, les azimuts de la cellule se différencient très nettement ; le *noyau* central transparent est étoilé, les prolongements étant dirigés vers les sommets du polygone.

La *fig. 5* résume un résultat expérimental, indépendant de toute hypothèse. Mais il m'a paru intéressant de rattacher cette inégalité de condensation pulvérulente aux quelques faits antérieurement connus.

Cette observation par transparence n'a pu être faite commodément qu'avec une cuve à fond de verre, chauffée et éclairée uniformément par en dessous. La division cellulaire subsiste ; mais, à cause de la

mauvaise conductibilité du verre et des inégalités de conditions thermiques qui en résultent, les formes observées sont beaucoup plus irrégulières qu'avec une cuve métallique ⁽¹⁾ (*fig. 6*).

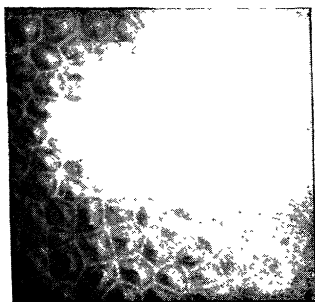


FIG. 6. — Grandeur naturelle.
Épaisseur : 1^{mm},2 environ.

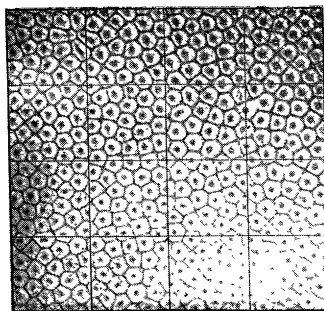


FIG. 7. — Grandeur naturelle.
Épaisseur : 0^{mm},810.

CINQUIÈME MÉTHODE. — *Relief des filets internes.* — *Particules brillantes.* — L'inégalité de condensation des matières solides en suspension peut être utilisée, avec une cuve à fond métallique, d'une façon tout à fait différente, mais avec des particules solides de propriétés spéciales ; les conditions qu'elles doivent remplir sont d'être de forme lamellaire et de réfléchir vivement la lumière (graphite, aluminium en poudre). Les lamelles s'orientent de façon à ce que leur plus grande surface soit parallèle aux filets qui les entraînent ; elles tapissent donc tous les filets couverts de hachures (*fig. 5*), et, si l'on admet que la transition avec les filets sans particules s'effectue brusquement, on voit que la lumière incidente, parallèle ou diffuse, se réfléchira sur la surface limite comme sur un miroir métallique dépoli. Il en résulte un véritable *modelé* de cette

(¹) A ce procédé par transparence se rattache la seule observation ancienne sur les tourbillons cellulaires que j'aie retrouvée. En 1835, E.-H. WEBER (*Pogg. Ann.*) a décrit très minutieusement la division polygonale microscopique, mise en évidence par des particules solides en suspension, qui se forme dans un mélange d'alcool et d'eau s'évaporant en couche très mince sur la lamelle porte-objet d'un microscope. Chose étrange, E.-H. Weber s'est trompé sur le sens même de la circulation sur les filets liquides. O. Lehmann, qui rapporte son observation dans sa *Molekularphysik* (t. I, p. 250), a bien vu l'origine thermique du phénomène et rétabli le sens de la rotation. Quant à Weber lui-même, il n'hésitait pas à attribuer une origine électrique à cette circulation.

surface (1) : le cratère ascendant central forme un cône d'ombre, dessiné dans ses moindres détails, étoilé grâce à la différenciation des azimuts ; les parties horizontales supérieures réfléchissent vivement la lumière ; enfin la partie descendante abrupte, près de la cloison sans rotation, forme, entre les deux cellules contiguës, comme une coupure étroite, brutale, qui dessine le réseau polygonal par un trait d'ombre extrêmement net. La *fig. 7*, mieux que toute description, montre le relief saisissant qui en résulte ; mais la photographie ne peut rendre l'impression du mouvement même que donne l'observation directe : on voit la surface modelée métallique traduire exactement le mouvement permanent de l'espèce de tore étoilé qu'elle revêt.

Les méthodes mécaniques permettraient déjà une étude extrêmement détaillée de la circulation tourbillonnaire, mais n'offrent pas, pour l'étude des formes et des dimensions de cellules, la précision et la sécurité des méthodes optiques qui me restent à décrire. Ces dernières ont seules été employées dans les mesures définitives de dimensions effectuées avec des liquides purs. Seules les mesures de périodes ont été faites à l'aide de grains de poussière incorporés, le nombre de grains étant, d'ailleurs, réduit au strict minimum. Après l'exposition des méthodes optiques, j'indiquerai les résultats numériques.
