

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉCOULEMENT DE COUCHES SUPERPOSÉES DE FLUIDES DE DENSITÉS DIFFÉRENTES ⁽¹⁾

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE FLOW OF NON-HOMOGENOUS FLUIDS

par **Paul GARIEL**

Ingénieur de l'École Centrale des Arts et Manufactures
Ingénieur aux Etablissements NEYRPIC

English Synopsis p. 7

L'aspiration à grande profondeur dans une mer tropicale d'un débit d'eau important pose un problème d'hydraulique très particulier : celui de l'écoulement dans un milieu dont la densité varie en fonction de la profondeur. C'est ce problème que l'Organisme d'étude d'une station d'énergie thermique des Mers en Côte d'Ivoire a été amené à résoudre à propos du projet d'une centrale thermique utilisant la différence des températures des couches superficielles et des couches profondes d'une mer tropicale.

Il était essentiel de savoir si, lorsqu'on aspire à 500 mètres de profondeur, cote à laquelle la température est de 7°, la température de l'eau aspirée serait bien de 7° alors qu'elle croît jusqu'à 28° à la surface libre. Ne risque-t-on pas d'aspirer de l'eau des couches supérieures qui viendront réchauffer l'eau aspirée jusqu'à une température telle que le rendement de la centrale devienne inacceptable ?

D'un côté on pouvait espérer que l'augmentation de densité qui accompagne la diminution de température en fonction de la profondeur serait suffisante pour créer une stratification telle que l'on n'aspire que dans une couche très mince, mais une telle couche peut-elle exister et se maintenir en équilibre ?

Elle paraît devoir impliquer l'existence d'une discontinuité des vitesses à ses deux limites ; or, on sait que celle-ci entraîne une instabilité des surfaces limites qui se traduit par des tourbillons d'interface et des mélanges avec les couches voisines, donc l'aspiration se ferait sentir dans une couche plus épaisse que celle envisagée. C'est tout le problème de la stabilité des interfaces qui est posé, problème ardu à en juger par les travaux de plusieurs auteurs et en particulier

de G. I. Taylor sur la recherche d'un critérium de mélange, de Prandtl, de Bjerknes en météorologie.

D'un autre côté, comme la variation totale de densité de 0 à 600 mètres de profondeur due à la variation de la température et de la salinité n'excède pas 6/100 environ ⁽²⁾, on peut se demander si l'écoulement ne sera pas le même que si l'eau était homogène, sans aucune stratification, c'est-à-dire n'intéressera pas toute la masse de l'eau jusqu'en surface, auquel cas on pourrait craindre que l'eau aspirée ne soit à une température trop élevée.

Il était difficile de répondre à ces questions sans une étude approfondie.

Une étude théorique se heurte à quelques difficultés : quels facteurs faut-il introduire pour faire un calcul s'appliquant à la réalité ? La viscosité joue-t-elle un rôle suffisant pour qu'il faille en tenir compte, ce qui rend les calculs rapidement plus ardu ? Il est délicat de répondre à ces questions sans faire appel à l'expérience.

C'est au Laboratoire Dauphinois d'Hydraulique à Grenoble que nous avons poursuivi l'ensemble de cette étude ⁽³⁾. Nos travaux ont porté plus particulièrement sur la partie expérimentale de ces recherches et ont fourni des bases certaines qui ont servi de guide à l'étude théorique faite par M. Craya. Les résultats théoriques et expérimentaux se sont trouvés en très bon accord.

(1) Communication présentée au VI^e Congrès International de Mécanique Appliquée. Septembre 1946, Paris.

(2) On montre aisément qu'on n'a pas à tenir compte des 2,7/1000 de variation de densité due à la compressibilité de l'eau qui n'influent pas sur la stabilité de l'équilibre. Celui-ci serait indifférent s'il n'y avait pas une variation de température due à une cause extérieure, car la valeur du gradient adiabatique pour l'eau est très faible.

(3) Les résultats de cette étude ont été acquis au cours des années 1943 et 1944.

RECHERCHE DES LOIS D'ÉCOULEMENT DE FLUIDES PESANTS DE DENSITÉS DIFFÉRENTES

L'attaque mathématique directe du cas où la densité varie d'une façon continue est délicate. Pour cette raison, nous avons commencé par étudier d'abord le cas plus simple de 2 couches superposées plus abordable par le calcul, ensuite celui de plus de 2 couches constituant une transition avec celui de la variation continue de densité expérimenté pour terminer.

Comme en définitive les phénomènes de densité apparaissent comme fondamentaux indépendamment de la cause des variations de densité, nous avons fait les expériences avec des eaux de salinités différentes plus faciles à manier que des eaux à des températures différentes.

INSTALLATION D'ESSAIS

L'installation que nous avons utilisée pour les expériences comportait essentiellement ⁽¹⁾ un canal vitré et ses organes d'alimentation.

Le canal vitré de 6 mètres de longueur, 0 m. 30 de largeur et 0 m. 60 de profondeur, était alimenté par une manche quadruple permettant d'obtenir 4 couches superposées d'eaux de densités différentes, l'une des couches étant de l'eau douce.

Le reste de l'installation consistait en des bassins à eau salée et des pompes de circulation. A l'aval on aspirait l'eau du canal au moyen d'une fente horizontale de quelques millimètres de hauteur pratiquée dans la face amont d'une boîte solidaire d'un siphon à débit réglable pouvant atteindre normalement 2 litres/sec.

ÉCOULEMENT DANS LE CAS DE 2 COUCHES DE DENSITÉS DIFFÉRENTES

En prenant des précautions, on arrive très bien à introduire dans le canal vitré deux couches de densités différentes sans les mélanger d'une façon excessive. Elles sont alors séparées par une interface extrêmement nette et bien visible si l'une des couches est colorée. La netteté est telle que le passage de l'eau douce à l'eau salée s'effectue en moins de 1/2 mm. d'épaisseur immédiatement après la préparation de l'essai. Après un temps plus ou moins long, l'interface perd sa netteté en raison de la diffusion moléculaire et des tourbillons de convection qui

viennent buter sur l'interface et entraîner dans l'une des couches des particules de l'autre. Dans la présente étude, la diffusion est trop faible pour être gênante et elle peut être négligée complètement. Les phénomènes de convection ont une importance un peu plus grande, sans toutefois devenir franchement gênante.

Le débit entrant dans le canal doit être supérieur au débit aspiré par la fente de façon que le niveau libre soit toujours à peu près à la cote des déversoirs de trop plein. Suivant les débits relatifs d'eau douce et d'eau salée on constate qu'il peut exister deux sortes d'écoulement très différents :

- un écoulement d'ensemble des deux couches qui sont aspirées simultanément par la fente ;
- un écoulement d'une seule des deux couches : celle au niveau de laquelle se trouve la fente d'aspiration.

Nous allons examiner maintenant plus en détail les caractéristiques essentielles de chacun de ces types d'écoulement.

ÉCOULEMENT D'ENSEMBLE DES 2 COUCHES

Cette sorte d'écoulement se produit quand on alimente les deux couches ; lorsque le régime permanent est atteint, il présente les caractéristiques suivantes :

L'interface peut se trouver soit au-dessus (fig. 1), soit au-dessous (fig. 2) du plan horizontal de la fente suivant que la proportion d'eau salée est nettement plus forte ou plus faible que celle de l'eau douce dans le débit total extrait. Loin en amont de la fente, l'interface est sensiblement horizontale ; elle se recourbe plus ou moins fortement au voisinage immédiat de la fente.

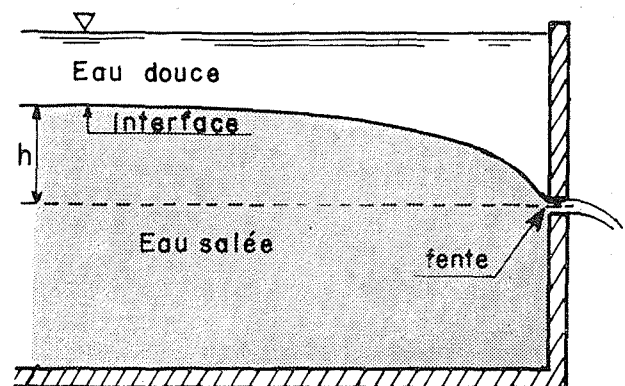


fig. 1

(1) Cf. Compte rendu à l'Académie des Sciences, séance du 4 mars 1946.
C. R. A. S., 1^{er} semestre 1946, p. 720.

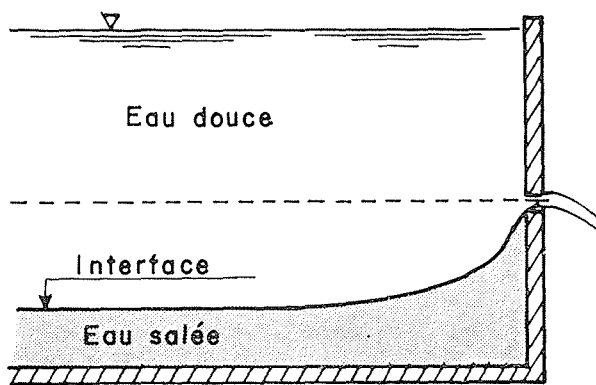


fig. 2

Quand l'interface se trouve suffisamment au-dessus de la fente, la proportion d'eau salée dans le mélange aspiré est supérieure à celle de l'eau douce ; c'est le contraire qui se produit quand l'interface est en dessous de la fente.

Pour un débit donné et une répartition donnée des débits d'eau douce et d'eau salée et en régime permanent, l'interface occupe une position bien déterminée. La distance verticale h du niveau de la fente à l'interface est d'autant plus grande que la différence des densités des deux couches est plus faible. Dans les essais, h atteignait généralement 5 à 6 centimètres.

On note en général une discontinuité des vitesses à l'interface ou tout au moins un gradient de vitesse qui peut être assez élevé, car le plus souvent les deux couches ne coulent pas à la même vitesse moyenne. Elle ne nuit pas à la stabilité de l'écoulement qui est, tout au moins sur 2 ou 3 mètres en amont de la fente, parfaite au point que, s'il n'y avait pas de particules en suspension, on pourrait croire le liquide immobile. Il est vrai que les vitesses sont de l'ordre de quelques centimètres par seconde seulement.

Tant que les débits ne sont pas trop forts l'interface n'est pas animée de mouvements ondulatoires, sauf à la sortie de l'organe d'alimentation tout à l'amont du canal. Par contre, ces mouvements existent souvent à l'entrée du canal pour les fortes discontinuités de vitesses entre les deux couches, surtout quand les différences de densités sont faibles, et ils sont accentués par les tourbillons introduits par les coudes de l'organe d'alimentation. Tant que les différences des densités sont assez fortes ou que les vitesses sont assez faibles, ils n'entraînent pas de mélanges et ne sont donc pas très gênants. Toutefois, ils obligent à déterminer une position

moyenne de l'interface dès qu'il y a ondulation. Quand ils sont assez forts pour provoquer le mélange, l'interface se trouble et fait place à une zone où la densité varie, ce qui rend impossible des mesures précises.

Observant maintenant ce qui se passe à l'aval au voisinage immédiat de la fente, nous observons que l'interface, harmonieusement courbée, se tient parfaitement immobile dans un état d'équilibre qui paraît absolu, et se trouve comme avalée par la fente. Ce n'est qu'en regardant de plus près que l'on observe aux deux extrémités de la fente, tout contre les deux parois vitrées du canal, deux tourbillons marginaux situés à l'interface. Ils tournent sur eux-mêmes d'un mouvement lent plus ou moins régulier en provoquant localement un léger mélange des deux couches qui est aussitôt absorbé par la fente.

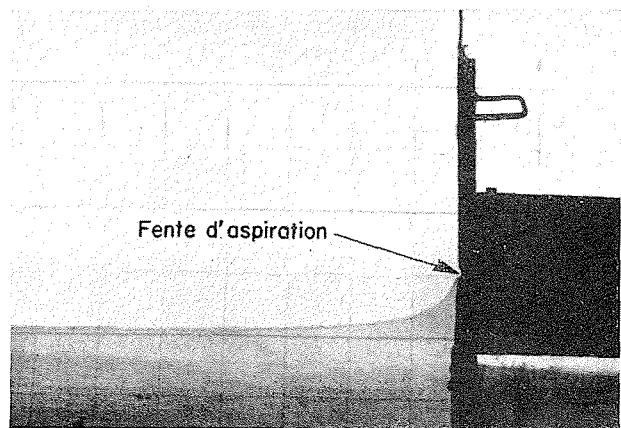


fig. 3

L'eau douce et l'eau salée sont aspirées simultanément.

On peut tirer de ces observations la conclusion qu'il est possible, avec une fente située initialement dans une couche (fig. 3), d'aspirer non seulement le liquide de cette couche, mais encore celui d'une couche plus dense, située en dessous, ou moins dense au-dessus et assez éloignée. Les deux couches s'écoulent parallèlement, sans se mélanger avant d'avoir pénétré simultanément dans la fente. Il ne se produit sensiblement pas de mélanges à l'interface au voisinage de l'aspiration, mais il peut y en avoir immédiatement à la sortie de l'organe d'alimentation ; c'est un autre phénomène qui n'est nullement attribuable à l'aspiration.

D'autres expériences faites en aspirant avec un petit orifice circulaire, ont montré que l'on obtenait aussi bien dans ce cas l'aspiration simultanée des deux couches avec les mêmes caractères généraux.

ÉCOULEMENT D'UNE SEULE COUCHE

Si maintenant, alors que les deux couches sont aspirées, nous annulons le débit d'alimentation de l'eau salée par exemple, l'écoulement prend un autre aspect. Parce que la couche d'eau salée n'étant plus alimentée se vide, l'interface s'abaisse progressivement et ne tarde pas à se stabiliser. Recommencant plusieurs fois cette dernière expérience, on voit toujours l'interface revenir sensiblement à la même position limite à partir de laquelle l'eau salée n'est plus aspirée. Si à partir de cette position nous élevons un peu la fente, l'eau salée n'est pas davantage aspirée; elle l'est au contraire si nous l'abaïssons un peu. Il existe donc une hauteur limite d'aspiration de la couche salée quand la fente est dans l'eau douce et de la couche d'eau douce quand la fente est dans l'eau salée. Cette hauteur critique sépare les deux régimes d'écoulement; elle joue donc un rôle fondamental dans l'écoulement de deux couches superposées de densités différentes.

Il nous a paru essentiel de déterminer à quelles lois cette hauteur limite obéit et c'est sur ce point particulier qu'ont porté plusieurs séries d'essais au cours desquels nous avons fait varier les débits et les densités.

Nous avons fait des mesures d'une part en écoulement plan en aspirant avec une fente tenant toute la largeur du canal, d'autre part en écoulement à trois dimensions en aspirant avec un orifice circulaire percé dans une paroi verticale.

DÉTERMINATION DE LA LOI DE LA HAUTEUR LIMITE D'ASPIRATION

En réalité, le phénomène n'est pas aussi net que nous venons de l'indiquer en raison de la miscibilité des deux couches et de l'absence de tension interfaciale. On constate toujours un abaissement lent de l'interface qui décèle une petite aspiration de la couche d'eau salée, d'où une petite difficulté à définir exactement la hauteur limite d'aspiration. Cette petite aspiration provient de ce que l'écoulement est tourbillonnaire en dessous de la fente parce que c'est

une zone d'écoulement divergent pour l'eau douce. Nous avons mentionné plus haut l'existence de deux tourbillons marginaux: ce sont eux qui sont en partie responsables de l'aspiration d'un peu d'eau salée. En outre, comme on est à la limite de l'aspiration, l'interface est instable et il suffit de très peu de chose pour qu'elle s'élève un instant jusqu'à la fente.

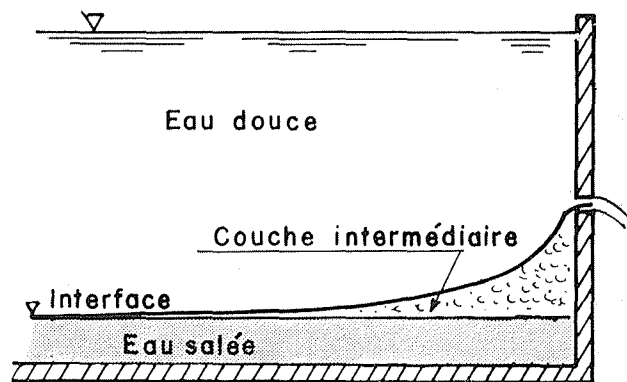


fig. 4

Cette instabilité donne lieu (fig. 4) à la formation, sur l'interface, d'une curieuse couche assez mince, dont la densité est intermédiaire entre celles de l'eau douce et de l'eau salée utilisées. Elle prend précisément naissance près d'une fente dans la zone tourbillonnaire où se fait un mélange des deux couches initiales: une partie de ce mélange est aspiré dans la fente, l'autre s'étale sur l'interface primitive en une mince couche qui remonte vers l'amont constituant un courant rétrograde facile à mettre en évidence avec un colorant.

D'autres essais faits avec des liquides non miscibles et présentant une tension interfaciale non négligeable nous ont montré qu'il existe une hauteur limite bien définie qu'aucun phénomène de mélange ne vient masquer.

Pour avoir des mesures bien comparables de la hauteur limite dans les essais faits avec l'eau salée, nous l'avons définie comme la distance verticale h du plan horizontal de la fente au plan de l'interface assez en amont au moment où l'on n'aspire plus que 1 % d'eau salée dans le mélange.

Pour un essai on mesurait le débit aspiré Q , la densité de l'eau salée $\rho + \Delta\rho$, celle de l'eau douce étant ρ et on traçait la courbe de h en fonction du temps à partir du moment où l'on

annulait le débit d'eau salée. On déterminait aisément sur cette courbe la valeur de h pour laquelle on n'aspire plus que 1 % d'eau salée.

Les expériences ont porté sur des débits allant jusqu'à 2 l./sec. et des densités d'eau salée comprises entre 1,0057 et 1,1450.

Des considérations théoriques permettent de penser que si la pesanteur est le seul facteur physique entrant en ligne de compte à l'exclusion de la viscosité et de la tension interfaciale, la loi liant le débit, les densités et la hauteur limite d'aspiration est de la forme :

$$g \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{h^3}{q^2} = C^{te}$$

où :

- g est l'accélération de la pesanteur,
- $\Delta \rho$ la différence des densités entre les deux couches,
- ρ densité de la couche située au niveau de la fente,
- q le débit par unité de largeur de la fente,
- h la hauteur limite d'aspiration.

Comme dans les essais considérés ρ est égal à l'unité et g une constante, cette loi peut s'écrire sous la forme simple suivante :

$$h = k \left(\frac{Q}{\sqrt{\Delta \rho}} \right)^{2/3}$$

Pour voir si cette loi était vérifiée, nous avons porté tous les points expérimentaux sur un graphique (fig. 5) en h et $\frac{Q}{\sqrt{\Delta \rho}}$; or, ils se sont

bien groupés autour d'une courbe unique ayant l'équation ci-dessus où $k = 7,91$, Q étant le débit de toute la fente de 30 cm. de largeur et non le débit par unité de largeur.

Dans ces conditions, la loi de la hauteur limite d'aspiration s'écrit :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{h^3}{q^2} = 0,43$$

Il se trouve que ceci est en excellent accord avec la théorie, puisqu'un des schémas étudiés théoriquement assignait précisément à la constante la valeur 0,43 ci-dessus.

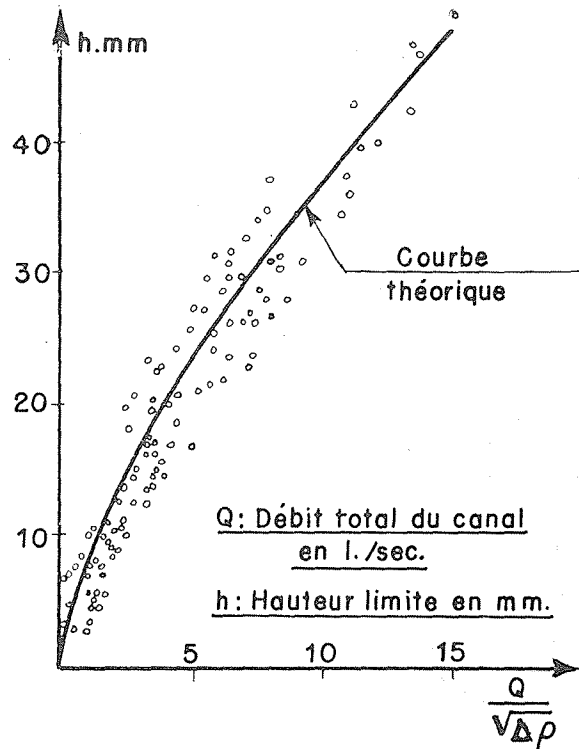


fig. 5

Il existe bien une certaine dispersion des points, mais elle est faible si l'on tient compte des erreurs d'expérience et du fait que la hauteur limite véritable est un peu masquée par les phénomènes de mélange qui se produisent inévitablement au voisinage de la fente avec de l'eau salée.

La concordance est très satisfaisante (1) et l'on peut énoncer la loi physique suivante :

« Dans l'écoulement plan en puits de deux couches homogènes superposées, il existe une hauteur limite d'aspiration au delà de laquelle le liquide inférieur n'est plus aspiré. Cette hauteur limite est proportionnelle à la puissance 2/3 du débit et inversement proportionnelle à la racine cubique de la différence de densité qui existe entre les deux couches ».

Poussant plus loin nos investigations, nous avons fait des essais d'aspiration dans l'espace à trois dimensions avec un petit orifice circulaire percé dans une paroi verticale. Il existe encore une hauteur limite d'aspiration de l'interface et

(1) Compte rendu à l'Académie des Sciences, séance du 25 mars 1946. C. R. A. S., 1^{er} semestre 1946, p. 781.

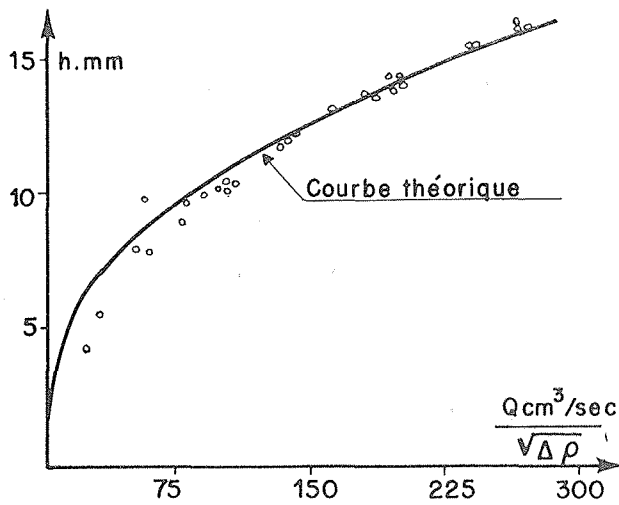


fig. 6

les points expérimentaux se situent bien par rapport à une courbe (fig. 6) d'équation :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} g \frac{h^5}{Q^2} = 0,154$$

Ceci constitue une excellente vérification de la théorie qui a permis d'établir cette même valeur de la constante.

Ces lois nous permettent donc maintenant de calculer les conditions dans lesquelles on aspirera une ou deux couches simultanément connaissant le débit et les densités dans tous les cas où la pesanteur joue un rôle prépondérant. Elles constituent la première étape de notre recherche, mais ne permettent pas de dire exactement ce qui se passera dans le cas de plusieurs couches ou d'une variation continue de densité.

ÉCOULEMENT DANS LE CAS DE PLUS DE DEUX COUCHES DE DENSITÉS DIFFÉRENTES

La préparation d'un essai avec quatre ou cinq couches de densités différentes est délicate en raison des mélanges qui peuvent se produire aux interfaces. Néanmoins, on arrive assez bien à superposer quatre ou cinq couches sans trop les mélanger aux interfaces qui restent alors assez nettes.

Pour un très petit débit, seule est aspirée la couche dans laquelle se trouve la fente avant tout écoulement. On note encore ici des mouvements tourbillonnaires au voisinage de la fente qui provoquent la formation de couches intermédiaires aux deux interfaces encadrant la couche aspirée. On met facilement en évidence, avec du

colorant, la répartition des vitesses sur une verticale, ce qui permet de déceler les deux petits courant rétrogrades.

Si nous augmentons le débit, à un certain moment l'une des interfaces est happée et une seconde couche commence à être aspirée. La vitesse y est beaucoup plus faible que dans la couche centrale. La couche intermédiaire est alors reportée à l'interface suivante. A mesure qu'augmente le débit, le nombre des couches aspirées augmente. L'écoulement se présente donc toujours sous la forme d'un courant horizontal formé de plusieurs couches allant à des vitesses différentes comprises entre des couches immobiles ; aux limites supérieure et inférieure du courant au voisinage de la fente, on trouve toujours des couches intermédiaires.

Loin de la fente, les interfaces présentent une très légère pente en raison des pertes de charge de frottement ; elles sont très fortement incurvées près de la fente et présentent partout une excellente stabilité, sauf bien entendu les interfaces limites au voisinage immédiat de la fente.

Pour une variation convenable des densités et des épaisseurs des couches, on obtiendrait un écoulement symétrique par rapport au plan horizontal de la fente.

L'expérimentation étant malheureusement trop délicate avec plusieurs couches pour permettre des mesures suffisamment précises, nous avons dû passer immédiatement à l'étude de l'écoulement avec variation continue de densité qui paraissait initialement compliquée.

ÉCOULEMENT DANS LE CAS D'UNE VARIATION CONTINUE DE DENSITÉ (1)

A priori il ne paraît pas simple de réaliser un milieu où la densité varie de façon continue. Une des grosses difficultés des expériences était de disposer d'un milieu présentant une variation continue de densité en fonction de la profondeur où l'on pourrait réaliser un écoulement quasi permanent. Il fallait en outre, pour que les résultats des expériences fussent comparables entre eux et aussi simples que possible à interpréter, une loi simple de variation de densité : nous avons choisi la loi linéaire.

Le procédé qui nous a donné les meilleurs résultats est le suivant :

(1) C. R. A. S., séance du 17 juin 1946, 3^e trimestre 1946, p. 70.

On superposait une couche d'eau douce et une couche d'eau salée et on les agitait convenablement ; il se produisait alors des mélanges ; les eaux se classaient par densité et revenaient au repos. On parvenait ainsi, après quelques agitations complémentaires, à réaliser très correctement la loi linéaire.

On aspirait dans ce milieu avec une fente de 2 mm. de hauteur et de 50 mm. de longueur pratiquée dans une boîte d'aspiration insérée entre deux glaces verticales distantes de 50 mm., de 1 m. 20 de longueur plongées dans le canal. De cette façon, on arrivait à obtenir entre ces deux glaces un écoulement beaucoup plus proche du régime permanent que si l'on avait aspiré sur toute la largeur du canal qui alors se serait vidé beaucoup trop vite.

Pour observer l'écoulement on jetait des grains assez fins de colorant entre les deux glaces ; en tombant, ils laissaient derrière eux une trace colorée très stable, verticale initialement, qui se déformait progressivement sous l'effet des courants.

Après quelques instants, la déformation met nettement en évidence un courant principal s'écoulant en direction de la fente (fig. 7 et 8), encadré de deux petits courants rétrogrades diri-

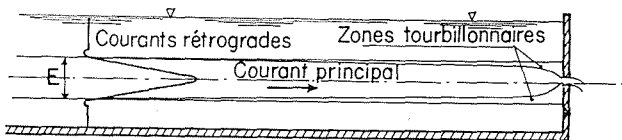


fig. 7

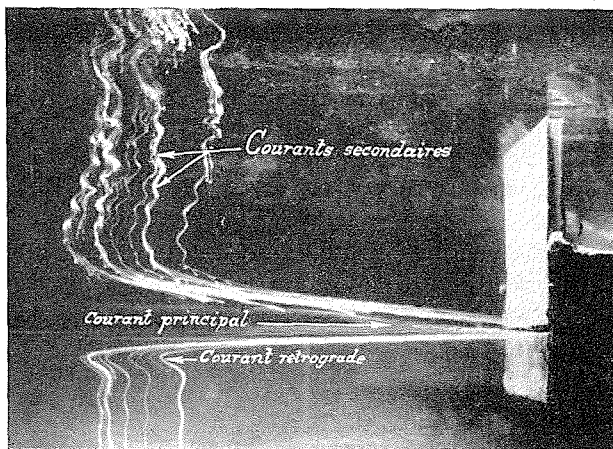


fig. 8

La déformation d'une verticale colorée (fluorescéine) met en évidence le fait que le liquide n'est aspiré que dans une faible épaisseur au niveau de la fente.

gés vers l'amont. On note en outre la présence de petits courants d'importance tout à fait secondaire.

Le courant principal est d'une épaisseur qui peut être très importante, puisqu'elle a atteint 40 cm. dans certaines expériences. Pour une répartition linéaire de densité, il est symétrique par rapport au plan horizontal de la fente. La répartition des vitesses sur une verticale est d'allure parabolique avec maximum de vitesse au niveau de la fente. On observe aussi nettement que les vitesses sont très faibles au voisinage des parois : la répartition des vitesses dans un plan horizontal est aussi d'allure parabolique, ce qui met en évidence le frottement visqueux contre les parois. Etant donné les faibles débits utilisés, l'écoulement dans le courant principal se faisait sans turbulence, ce qui est normal pour les faibles nombres de Reynolds réalisés.

Au voisinage immédiat de la fente, les filets liquides présentent de fortes courbures ; la stabilité de l'écoulement y est excellente à l'intérieur du courant principal, mais elle disparaît au delà de certaines limites pour faire place au-dessus et au-dessous de celles-ci à un mouvement tourbillonnaire plus ou moins bien organisé, comme nous l'avons déjà rencontré à propos de la couche intermédiaire. Le courant principal (fig. 9) est donc encadré de deux couches tourbillonnaires où semblent prendre naissance les deux petits courants rétrogrades mentionnés plus haut.

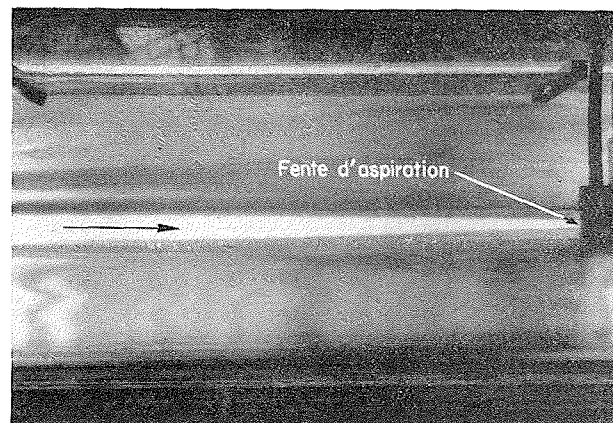


fig. 9

L'aspiration dans un liquide dont la densité croît de haut en bas détermine la formation d'un courant d'épaisseur limitée (5 centimètres, en blanc sur la figure) situé à la hauteur de l'orifice d'aspiration, le reste du liquide (en sombre) restant immobile. Au voisinage de l'orifice le courant est compris entre deux couches tourbillonnaires (en grisé).

Les mesures que nous avons faites ont eu pour objet de déterminer comment varie l'épaisseur du courant principal en fonction des deux facteurs que nous pouvons faire varier à volonté : le débit et la valeur du gradient de densité.

On mesurait aisément au cathétomètre l'épaisseur du courant principal à 1 m. 50 en amont de la fente. Notons que cette épaisseur n'était pas partout rigoureusement la même : elle allait en croissant très légèrement vers l'amont ; ceci est attribuable en partie aux pertes de charge causées par la viscosité. Cette variation d'épaisseur étant malgré tout relativement faible, nous nous sommes bornés à mesurer l'épaisseur du courant dans une seule section verticale du canal.

Appelons :

Q le débit par unité de longueur de la fente,

E l'épaisseur du courant principal,

H une hauteur caractéristique de la variation de densité,

ρ la densité en un point,

ν le coefficient de viscosité cinématique,

g l'accélération de la pesanteur,

H étant défini par la relation :

$$H = \rho_m \frac{\Delta h}{\Delta \rho}$$

où Δh est la hauteur sur laquelle ρ_m varie de $\Delta \rho$

Si en première analyse nous considérons comme négligeable le rôle de la viscosité, des considérations d'analyse dimensionnelle nous conduisent à représenter le phénomène par une relation de la forme :

$$\frac{E}{H} = f \left(\frac{Q}{H \sqrt{gH}} \right) \quad (1)$$

où le seul facteur physique intervenant est la pesanteur. Si l'épaisseur du courant obéit à cette loi, les points expérimentaux portés sur un graphique en $\frac{E}{H}$ et $\frac{Q}{H \sqrt{gH}}$ doivent se grouper

autour d'une courbe unique. Nous avons porté ces points sur un graphique logarithmique (fig. 10) et ils se sont groupés autour de plusieurs droites sensiblement parallèles qui diffèrent suivant les valeurs de H. Il n'y a donc pas une courbe unique, par conséquent, on est conduit à penser que la viscosité joue un rôle non négligeable et que ce facteur doit être introduit dans la loi de

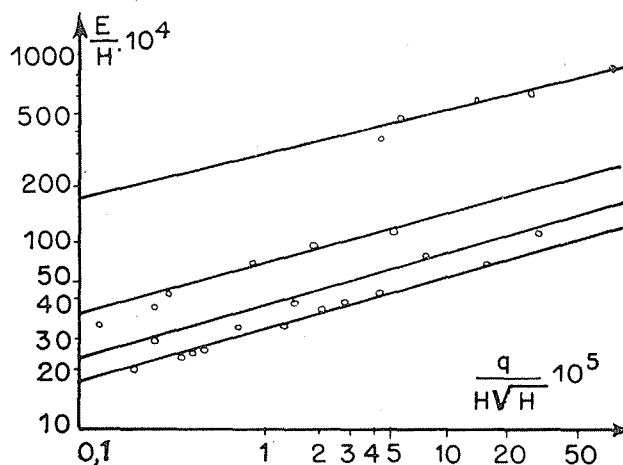


fig. 10

l'écoulement par l'intermédiaire d'un nouveau paramètre sans dimensions. La loi d'écoulement serait donc plutôt de la forme :

$$\frac{E}{H} = f \left(\frac{Q}{H \sqrt{gH}}, \frac{\nu}{H \sqrt{gH}} \right) \quad (2)$$

En fait, les résultats expérimentaux peuvent se traduire par la relation simple :

$$\frac{E}{H} = K \left(\frac{Q}{H \sqrt{gH}} \right)^{0,27}$$

où K varie en sens inverse de H. Dans nos essais où H a varié de 2 m. 18 à 45 m. 60, K varie respectivement de 1,62 à 0,195 et paraît tendre vers une valeur constante plus faible que ce dernier chiffre pour les grandes valeurs de H. Il semble donc que lorsque les écoulements prendront de grandes dimensions (grandes valeurs de H et écartement plus grand des parois), le rôle de la viscosité s'atténuera pour laisser la prépondérance à la pesanteur que nous avons vu être infiniment plus importante que la viscosité dans le phénomène de la hauteur limite d'aspiration pour deux couches.

Les lois trouvées pour la hauteur limite d'aspiration dans le cas de deux couches pour l'écoulement plan et celui dans l'espace jointes aux résultats que nous venons d'énoncer pour le cas de l'écoulement plan avec variation de densité permettent de conclure que, dans le cas de l'aspiration dans la mer tropicale considérée, il se formerait un fleuve interne d'une centaine de mètres d'épaisseur au maximum, symétrique par rapport à la cote du débouché du tunnel et à une température moyenne égale à celle que l'on escomptait.

CONCLUSION

La présente étude expérimentale nous a permis de faire un pas nouveau dans la connaissance des conditions d'écoulement des fluides hétérogènes pesants.

Dans le cas de deux couches nous avons mis en évidence le phénomène fondamental de la hauteur limite d'aspiration. Nous en avons trouvé les lois dans les cas des écoulements plan et à trois dimensions. Elles ne font intervenir que la pesanteur qui apparaît comme le facteur physique fondamental ; la viscosité ne joue qu'un rôle accessoire que l'étude théorique a permis de préciser. Il s'en suit que le phénomène d'aspiration limite obéit à une similitude de Froude analogue à celle que respectent les écoulements à surface libre ordinaires, mais où la pesanteur est

remplacée par une pesanteur réduite à $g \frac{\Delta \rho}{\rho}$.

Dans le cas de la variation linéaire de densité, nous avons mis en évidence l'existence d'une épaisseur limite d'aspiration, pour un débit et un gradient de densité déterminés : l'écoulement n'intéresse pas toute la masse, mais reste compris dans une couche d'épaisseur limitée que les résultats des essais permettent d'évaluer avec une assez bonne approximation.

Ici la viscosité a une action beaucoup plus marquée et on ne peut la négliger pour les écoulements de petites dimensions comme ceux que nous avons utilisés dans nos essais, mais elle doit tendre à s'atténuer devant celle de la pesanteur pour des écoulements de grandes dimensions.

Signalons enfin, parmi les problèmes connexes auxquelles les présentes recherches peuvent s'appliquer, celui de l'évacuation des matériaux en suspension qui cheminent dans les lacs artificiels.

