

VIII^e Congrès de l'A.I.R.H., Montréal, août 1959

La question des courants de densité

Density currents

PAR J. VALEMBOIS

CHEF DE LA DIVISION « RECHERCHES » DU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE

Les courants de densité ont donné lieu à la présentation, au 8^e Congrès de l'A.I.R.H. à Montréal, de 15 mémoires traitant différents aspects de la question. M. VALEMBOIS présente ici une analyse de ces différents travaux, en les replaçant dans le cadre des études antérieures sur les mêmes sujets.

On a évoqué, au cours de ce congrès :

- les problèmes posés par l'aspiration dans une des couches d'un fluide stratifié;
- la propagation d'un front d'onde de densité, qui a fait l'objet de trois communications, dans lesquelles on trouve des informations intéressantes sur la similitude du phénomène;
- le problème de l'écoulement laminaire ou turbulent en canal;
- Le calcul du mouvement graduellement varié et du mouvement non permanent du courant de fond dans un réservoir;
- les procédés expérimentaux d'études sur modèle.

Plusieurs mémoires enfin présentent les résultats de mesures et d'observations sur place (courants de fond dans un réservoir, coin salé dans un estuaire, courants de densité dans la mer Morte).

Fifteen papers covering different aspects of the problem of density currents were presented at the 8th Congress of the I.A.H.R. in Montreal. The author analyses these papers and situates them against the background of previous work on the same subjects.

The following questions were touched upon during the Congress:

- Problems connected with the drawing off of a layer of stratified liquid.*
- The problem of density wave fronts, which was dealt with in three papers which gave interesting data concerning the similitude of the phenomenon.*

The problem of laminar or turbulent flow in canals.

Computation of gradually varied and unsteady motion of a bed current in a reservoir.

Experimental methods for model studies.

Several papers were concerned with the results of field observations and measurements concerned with bed currents in reservoirs, salt wedges in estuaries and density currents in the Dead Sea.

INTRODUCTION

Les courants de densité étaient déjà à l'ordre du jour du Congrès de l'A.I.R.H. de 1953, à Minneapolis. Sept mémoires les représentaient.

Pour son 8^{ème} Congrès, qui s'est tenu à Montréal du 24 au 29 août 1959, l'A.I.R.H. avait reçu 15 mémoires sur la question.

C'est dire l'intérêt croissant qui s'attache à ce sujet, qui fait actuellement l'objet de recherches dans de nombreux laboratoires. Cependant, le domaine en est si vaste et si varié que les progrès réalisés sont relativement minces, si on les compare à l'effort accompli, et l'ingénieur est

encore loin d'avoir la réponse à toutes les questions que lui posent les écoulements stratifiés de fluides de densités différentes.

Pour bien faire le point, il faudrait pouvoir se reporter à un exposé général qui indiquerait clairement et rapidement quels sont les problèmes, et quelles sont les solutions actuellement disponibles. KEULEGAN [1] a présenté en 1949 dans « Engineering Hydraulics » un résumé de l'état de la question à cette époque. Elle a évolué depuis, et il aurait été souhaitable que l'un des mémoires présentés au dernier Congrès fût

une remise à jour de cet exposé (*). Ce vœu pourrait d'ailleurs s'appliquer à chacune des questions à l'ordre du jour. L'A.I.R.H. le satisferait en faisant préparer, pour chacun des sujets qu'elle retient pour ses congrès, un rapport général concernant l'état actuel de la question.

L'objet du présent exposé est plus limité, et l'on s'efforcera surtout de situer les travaux pré-

(*) Il faut signaler à ce propos l'article publié en 1955 par LANE et CARLSON [2], où les divers aspects de la question sont passés en revue, et qui comporte une importante bibliographie.

sentés à Montréal par rapport aux travaux antérieurs. Cependant il n'est peut-être pas inutile de commencer en définissant rapidement ce qu'on entend habituellement par « courants de densité ».

Après cela, nous examinerons les différents mémoires, dans l'ordre suivant :

- Ecoulement permanent sans frottement;
- Propagation d'un front d'onde;
- Ecoulements avec frottement;
- Procédés expérimentaux d'étude sur modèle;
- Observations sur place.

COURANTS DE DENSITÉ

1. Lorsque deux fluides de densité légèrement différente se trouvent en présence, ils peuvent, dans certaines conditions, rester en équilibre ou s'écouler l'un au-dessus de l'autre sans se mélanger. Ces écoulements sont généralement appelés « courants de densité ». De la même façon qu'à la surface libre d'un liquide, des ondes (ondes internes) peuvent se propager à la surface de séparation (interface). On peut aussi avoir affaire à plus de deux fluides, ou à un fluide dont la densité varie de façon continue.

Le terme lui-même est controversé. C'est la traduction littérale de l'expression anglo-saxonne « density currents ». Il est certain qu'il vaudrait mieux appeler « écoulements stratifiés » les phénomènes qu'on lui fait habituellement désigner. Mais l'habitude est prise, et pourvu que l'on spécifie bien de quoi il s'agit, il n'y a aucune raison d'en changer.

Le cas le plus généralement considéré est celui de deux couches d'un même fluide, dont toutes les caractéristiques physiques (viscosité, etc.) sont identiques, mais qui présentent une légère différence de densité. Ces deux couches sont séparées par une *interface*, en général voisine de l'horizontale.

2. La plupart des études théoriques et expérimentales effectuées jusqu'à maintenant concernant des phénomènes à deux dimensions et les expériences ont presque toutes été effectuées dans des canaux rectangulaires de longueur importante par rapport aux dimensions de la section droite.

Les paramètres sont alors (fig. 1) :

- Les épaisseurs y_1 et y_2 des deux couches;
- Eventuellement, lorsque l'interface n'est pas nette, l'épaisseur δ de la zone dans laquelle la variation de densité s'effectue de façon progressive;

La différence relative de densité (ou de masse spécifique) $\Delta\rho/\rho$ entre les deux couches.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{(\rho_1 + \rho_2)/2}$$

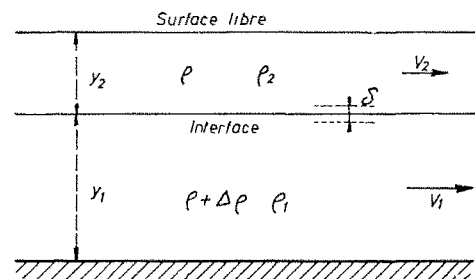


FIG. 1

Cette différence est en général faible. Elle provient le plus souvent de différences de température ou de salinité ou de la présence de matières en suspension. Par exemple, entre l'eau de mer et l'eau douce, la différence est de l'ordre de 3 ‰; entre l'eau qui entre dans une prise d'eau d'usine thermique et celle qui est rejetée à 7 °C de plus, elle est de l'ordre du millième.

- Les vitesses moyennes V_1 et V_2 d'écoulement des deux couches;
- La viscosité cinématique ν , supposée la même pour les deux couches (dans certains cas, on considère les deux viscosités ν_1 et ν_2).

Divers types de *forces* interviennent. Ce sont :

- *Les forces de gravité*, qui, à l'interface, agissent comme si l'accélération de la pesanteur était réduite dans le rapport $\Delta\rho/\rho$. La notation habituelle pour cette *gravité réduite* est :

$$g' = g \Delta\rho/\rho;$$

- Les forces d'inertie pour lesquelles on peut généralement considérer les masses spécifiques des deux couches comme identiques;
- Les forces de frottement, dues à l'action de la viscosité aux parois et à l'interface, ainsi qu'à la turbulence quand elle est présente, soit dans le corps des deux couches, soit au voisinage de l'interface, lorsque celle-ci est instable et qu'elle est le siège de phénomènes de *mélange*;
- Les forces dues à la *tension superficielle* à l'interface.

3. Assez souvent, les différences de densité agissantes sont dues à une seule cause : salinité, suspension ou température. Mais il arrive que l'on rencontre à la fois salinité et suspension, par exemple dans les estuaires à marée, et même que les variations de température ajoutent leur effet. La plupart des études théoriques et expérimentales ont porté jusqu'à maintenant sur le cas le plus simple où une seule cause intervient. Mais les observations dans la nature font souvent ressortir l'influence simultanée de deux ou trois facteurs dont il est difficile de séparer les effets.

ÉCOULEMENT PERMANENT SANS FROTTEMENT

On ne peut négliger les forces de frottement dans les écoulements stratifiés que lorsqu'on étudie des phénomènes qui se produisent sur de très courtes distances. En effet, les forces de gravité sont très faibles, puisqu'elles sont réduites dans le rapport $\Delta\rho/\rho$, et les frottements, dont l'importance relative est par conséquent beaucoup plus grande que dans les écoulements habituels, n'ont pas besoin d'agir très longtemps pour que leur influence devienne sensible.

Un des problèmes les plus importants qui entrent dans ce cadre est la détermination du débit limite que l'on peut soutirer dans une des couches sans aspirer le fluide des autres couches. La valeur de ce débit dépend naturellement de la géométrie du dispositif envisagé. Tant qu'on ne fait pas intervenir les frottements, les problèmes de ce genre peuvent être étudiés par les méthodes utilisées pour les écoulements à potentiel d'un seul fluide. De nombreux cas ont été étudiés théoriquement et expérimentalement depuis que Craya et Gariel [3] ont ouvert la voie avec l'étude de l'aspiration par une fente horizontale située sur une limite verticale. Le rapport analysé ci-dessous entre dans ce cadre.

10-C. — Selective withdrawal from a vertically stratified fluid (*Aspiration sélective dans un fluide stratifié*), par Donald R. F. HARLEMAN, Robert L. MORGAN et Robert A. PURPLE.

On trouvera dans ce rapport une revue des différents cas qui ont été étudiés antérieurement, ainsi que la bibliographie correspondante. Le Pr. Harleman, du Massachusetts Institute of Technology, nous a signalé deux études à ajouter à cette liste, l'une de W.R. DEBLER (*Proceedings A.S.C.E.*, juillet 1959), l'autre de D.G. HUBER, qui paraîtra prochainement dans la même revue.

Dans le cas présent (fig. 2), il s'agit de la détermination du débit limite d'aspiration d'un orifice circulaire de diamètre D situé au fond d'un

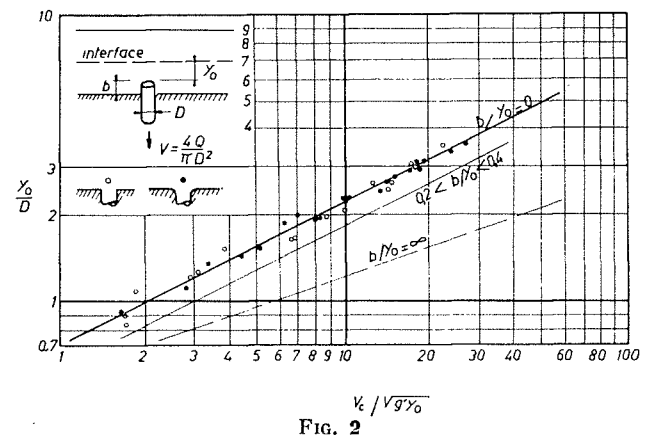


Fig. 2

réservoir, la couche inférieure plus dense ayant une épaisseur y_0 . C'est un problème à symétrie axiale. On a étudié aussi l'influence d'un dépassement b du tube d'aspiration vers le haut. La figure 2 rassemble les résultats obtenus.

Comme dans toutes les études de ce genre, on obtient une vitesse critique d'aspiration V_c proportionnelle à une valeur de la forme $\sqrt{g'L}$, g' étant la gravité réduite $g \Delta\rho/\rho$ et L une longueur caractéristique du dispositif envisagé. Ici, le coefficient de proportionnalité dépend de D/y_0 , rapport du diamètre de l'orifice à l'épaisseur de la couche, et de b/y_0 , rapport du dépassement du tube à l'épaisseur de la couche. Dans le cas de l'orifice arasé au fond, l'expérience donne :

$$V_c / \sqrt{g'y_0} = 2,05 (y_0/D)^2$$

Un autre cas du même problème est étudié dans le rapport suivant :

7-C. — L'écoulement sur déversoir de deux liquides superposés de densités différentes,
par A. SCHLAG, professeur à l'Université de Liège.

Dans cette communication, l'auteur expose le

début de recherches destinées à permettre de déterminer, pour un déversoir rectangulaire de largeur l installé dans un canal de largeur L , la valeur limite du rapport h_1/h_2 à partir de laquelle il n'y a plus déversement du liquide le plus dense (h_1 est la hauteur de la surface libre au-dessus de l'arête du déversoir et h_2 la hauteur de l'arête au-dessus de l'interface).

PROPAGATION D'UN FRONT D'ONDE

Le cas le plus étudié (fig. 3) est celui de la propagation dans les deux sens de l'interface entre deux liquides immobiles de densité légèrement différentes, lorsqu'on enlève brusquement la barrière qui les sépare. Ce problème a surtout été étudié en canal rectangulaire, pour les liquides initialement au même niveau de repos.

Keulegan [1] en fait une analyse d'où il ressort que la vitesse initiale du front d'onde est proportionnelle à $\sqrt{g'y}$. Les expériences de Yih [4] ont permis de déterminer cette constante, et conduisent à la formule :

$$V_0 = 0,45 \sqrt{g'y}$$

cette vitesse étant aussi bien celle du front d'onde du liquide lourd (underflow) et celle du front d'onde du liquide léger (overflow).

Cependant la viscosité a une influence sur cette vitesse initiale, et Keulegan [5] donne une relation faisant intervenir dans V_0 un nombre de Reynolds $V_0 y / \nu$. Il indique aussi qu'il doit y avoir une certaine dissymétrie entre l'overflow et l'underflow.

Ces divers points, ainsi que l'influence de la viscosité sur le parcours ultérieur de l'onde, étudiée aussi par Keulegan, font l'objet des essais exposés dans la communication suivante.

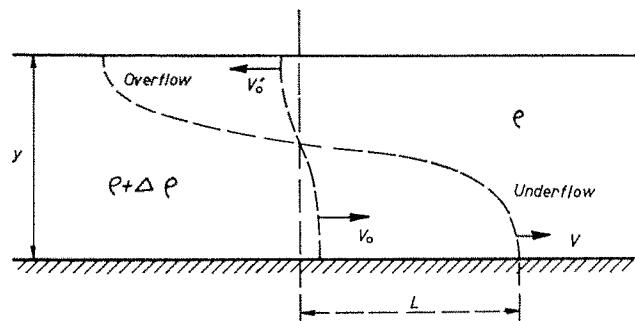


FIG. 3

6-C. — Some observations of small scale thermal density currents (*Observations à petite échelle de courants de densité thermiques*), par D.I.H. BARR.

Les recherches présentées ont été effectuées au laboratoire du « Royal College of Science and Technology » de Glasgow, dans un canal à parois lisses de 45 cm de large.

Des expériences avec de l'eau salée, pour des profondeurs allant de 5 cm à 30 cm environ, et des $\Delta\rho/\rho$ allant de 10^{-4} à 3.10^{-2} ont permis de vérifier pour l'underflow la formule de Keulegan, donnant la relation entre $V_0/\sqrt{g'y}$ et $V_0 y / \nu$, et d'estimer à 12 % environ la sur vitesse de l'overflow par rapport à l'underflow. Ces expériences ont été répétées pour des fronts d'ondes de densités thermiques, et conduisent à des résultats identiques. Dans les deux cas, $V_0 y / \nu$ a varié de $0,5.10^3$ à 50.10^3 environ.

On a étudié aussi la diminution de vitesse du front d'onde au cours du trajet pour l'underflow, ce qui conduit à une relation entre la distance relative L/y , au bout de laquelle la vitesse est devenue une certaine fraction de V_0 et le nombre $V_0 y / \nu$. L'application de ces résultats à l'étude de la similitude de ces phénomènes conduit à utiliser une faible distorsion des $\Delta\rho/\rho$ et une distorsion des hauteurs, toutes deux fonction de l'échelle en plan. Des expériences basées sur ces principes et concernant des courants de densité thermiques avec mouvement de la couche supérieure, ont conduit à modifier un peu la loi $L/y (V_0 y / \nu)$ donnée par Keulegan.

Un point important est l'influence, dans les études sur modèle avec différences de température, de la tension superficielle entre les deux couches, et la nécessité de son élimination.

Le même problème est un des sujets de la communication.

16-C. — Density currents and siltation in docks and tidal basins (*Courants de densité et envasement dans les bassins à flot et à marée*), par F. H. ALLEN et W. A. PRICE.

Il s'agit d'études effectuées au Laboratoire de Wallingford, dont F.H. Allen est directeur.

Le premier problème envisagé est celui de l'ensablement d'un bassin à flot relié par une écluse à l'estuaire de la Mersey.

Au moment où l'on ouvre la porte reliant l'écluse au bassin, l'eau de l'écluse est plus dense d'environ $2 \cdot 10^{-3}$ que l'eau du bassin, principalement à cause de sa salinité. C'est le cas que nous avons envisagé plus haut. *Les mesures sur place et sur modèle* au $1/60^{\circ}$ concordent avec ce que l'on sait de la phase initiale du mouvement. Toutefois, dans la nature, le phénomène est un peu compliqué par la présence, au fond de l'écluse, d'une couche chargée de vase. Des considérations théoriques simples rendent bien compte du rôle perturbateur de cette couche.

L'intérêt de la deuxième étude exposée, qui concerne le remplissage et la vidange avec la marée d'un bassin situé aux bords de la Tamise, est de montrer l'influence que peut avoir sur les courants à l'entrée du bassin une faible différence de densité entre la rivière et le bassin, bien

qu'il s'agisse de courants relativement turbulents.

Un autre rapport traite d'un problème analogue :

13-C. — Propagation of gasoline wave through water inclined circular annulars (*Propagation d'une onde d'essence à travers l'eau dans un anneau circulaire incliné*), par G. L. BATA.

Il s'agit ici d'un liquide se propageant sous forme de front d'onde au-dessus d'un liquide plus lourd. La géométrie du dispositif est relativement compliquée, l'essence étant introduite à la partie supérieure d'un tore circulaire un peu incliné et plein d'eau. Une onde d'essence se propage de chaque côté de l'adduction, l'eau étant évacuée à la partie basse. Les résultats de cet essai sont comparés à ceux des essais de Schoklitsch, Trifonov et Lévin concernant les ondes positives qui se propagent sur fond sec à la suite de la rupture d'un barrage, et à ceux de Yih mentionnés plus haut.

ÉCOULEMENTS AVEC FROTTEMENT

Quand une des couches s'écoule par rapport à l'autre, la viscosité ou le frottement turbulent empêchent qu'il se produise une discontinuité de vitesse à l'interface.

1. Écoulement laminaire.

Il a été étudié antérieurement :

- Par Keulegan [6] et Lock [7] pour des couches d'épaisseur très grande, l'une d'elles ayant un mouvement en bloc à la vitesse U à l'infini par rapport à l'autre. Il se développe alors de chaque côté de l'interface une couche limite qui s'enfonce de plus en plus au sein de chaque couche au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'endroit où les couches prennent contact. Dans le cas où les viscosités des deux couches sont égales, la vitesse à l'interface est $0,59 U$.
- Par Ippen et Harleman [8], dans le cas de l'écoulement d'une couche inférieure d'épaisseur finie par rapport à une couche supérieure de grande épaisseur. Les couches limites issues du fond et de l'interface se rejoignent dans le fluide le plus dense, et l'on aboutit à un régime établi. Le coefficient de frottement correspondant à ce régime a été déterminé; il est intermédiaire entre celui

qui correspond à l'écoulement entre deux plaques parallèles fixes et celui d'un écoulement à surface libre (il s'agit toujours d'écoulements laminaires). Une loi de répartition des vitesses universelles relie la vitesse U/V_{\max} (rapportée à la vitesse maximum) à la cote au-dessus du fond Z/d (rapportée à l'épaisseur de la couche inférieure) (fig. 4).

Le même problème est repris dans le rapport suivant :

12-C. — Frictional resistance at the interface of density currents (*Résistance de frottement à l'interface de courants de densité*), par G. L. BATA.

Ce travail, dont l'auteur, de l'Institut J. Cerni, de Belgrade, a effectué une partie à l'Institut de Recherches Hydrauliques d'Iowa, concerne l'écoulement laminaire, mais considère aussi bien le cas du régime en cours d'établissement que celui du régime établi. Les calculs sont alors effectués par les méthodes habituelles de calcul des couches limites laminaires (Shvets, Polhausen, Blasius, Hartree). Le coefficient de résistance à l'interface dépend dans ce cas, non seulement du rapport des densités et du rapport des viscosités des deux couches, mais aussi des longueurs relatives (rapportées à leurs épaisseurs) des deux couches.

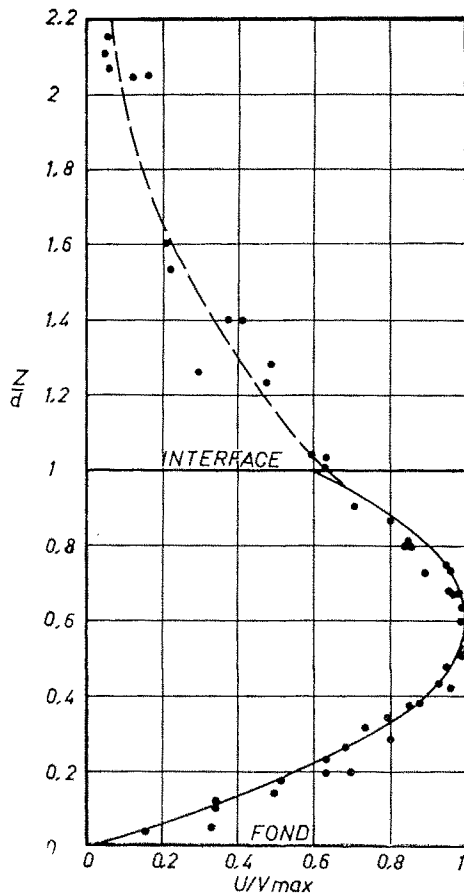


FIG. 4

2. Ecoulement turbulent.

La stabilité de l'interface a été étudiée par Keulegan [9] et Ippen et Harleman [8]. Elle fait intervenir à la fois la gravité et la viscosité, et l'on peut mettre les résultats obtenus sous la forme suivante (pour deux fluides de même viscosité cinématique ν) :

$$U_c = (1/\theta) (\nu g \Delta \rho / \rho)^{1/3}$$

U_c étant la vitesse critique moyenne de la couche en mouvement à partir de laquelle l'interface est instable, θ étant une fonction du nombre de Reynolds $\mathcal{R} = U_c y / \nu$ où y est l'épaisseur de la couche (pour $\mathcal{R} > 450$, $1/\theta$ est de l'ordre de 7).

Lorsque la vitesse est supérieure à U_c , il y a mélange, et Keulegan [9] a déterminé expérimentalement une loi simple régissant ce mélange. Tout se passe comme si l'interface était le siège d'un débit d'une couche vers l'autre, les vitesses normales à l'interface étant :

$$U_m = K (U - 1,15 U_c)$$

K est de l'ordre de $3 \cdot 10^{-4}$.

Ce mélange conduit à une tension tangentielle τ

à l'interface, le coefficient de frottement C_f correspondant ($\tau = C_f \rho U^2 / 2$) étant égal à $2 U_m / U$.

Une étude du mouvement turbulent dans l'ensemble de l'écoulement, pour un cas plus complexe, est faite dans le mémoire suivant :

14-C. — Etude des courants de densité en canal, par R. BONNEVILLE et J. GODDET.

Les auteurs y décrivent une série d'expériences effectuées au Laboratoire National d'Hydraulique de Chatou entre 1952 et 1955. Les résultats n'avaient pas encore fait l'objet d'une publication.

Les essais ont été réalisés en utilisant une suspension de kaolin ou de boues (diamètre moyen de 10 à 15 microns) coulant sous l'eau claire dans deux canaux, l'un de $0,8 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ (profondeur) $\times 20 \text{ m}$, l'autre de $1 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ (profondeur) $\times 100 \text{ m}$. On a mesuré les répartitions verticales de vitesse, de concentration et de température dans plusieurs sections, le fond du canal étant lisse ou rugueux, et la pente du fond variant de 0,3 à 3,6 %. Les débits ont varié de 0,4 à 23 l/s et la concentration de 1 à 25 g/l.

L'utilisation d'une suspension et l'introduction d'une eau à température différente de l'eau du canal ont beaucoup compliqué les phénomènes, car à la variation de vitesse suivant la verticale s'ajoutaient des variations de concentration et de température. De très nombreux résultats expérimentaux ont été rassemblés et des interprétations partielles ont pu en être données.

3. Ecoulements divers.

A propos du courant de fond d'eau chargée de matières en suspension dans un réservoir de barrage, le rapport ci-dessous étudie l'écoulement *graduellement varié*, la stabilité de ce courant et le mouvement non permanent.

8-C. — Theory of underflow in storage reservoirs (Théorie du courant de fond dans une retenue), par I. I. LEVI.

Il s'agit d'une série d'études effectuées par un groupe de chercheurs du Laboratoire d'Hydraulique Fluviale de Leningrad. Le réservoir est schématisé par un canal rectangulaire à pente constante.

L'équation de base de l'écoulement *graduellement varié* dans le cas présent fait ressortir la valeur de la vitesse critique $V_c = (g'y_e/\beta)^{1/2}$, y étant l'épaisseur de l'underflow et β le coefficient de quantité de mouvement. Elle montre qu'il n'y a pas d'épaisseur normale possible, mais une épaisseur minimum. Des expériences ont permis de déterminer le coefficient de frottement à admettre dans cette équation. Il est fonction du nombre de Reynolds (défini comme précédemment).

L'étude de la *stabilité* de l'underflow fait apparaître la valeur minimum de la concentration pour laquelle le courant conserve son individualité, en fonction du rapport I_0/λ_0 de la pente du fond au coefficient de frottement, de $\Delta\rho/\rho$ et de q^2/gH^3 , q étant le débit par unité de largeur de l'underflow et H la profondeur de la retenue.

Une méthode pour le calcul des *écoulements non permanents* (crues, front d'onde se réfléchissant sur le barrage) est exposée.

Connaissant les lois de débit et de concentration en fonction du temps à l'entrée du réservoir, l'ensemble de ces résultats doit permettre un calcul *a priori* de l'écoulement du courant de fond, la détermination des surcharges supportées par le barrage lors de la réflexion du front d'onde,

et l'étude du processus d'envasement du réservoir.

Un problème de *jet* est étudié dans le rapport :

2-C. — Two properties of the stratified density currents at a river mouth (*Deux propriétés du courant de densité à l'embouchure d'une rivière*), par TOKUICHI HAMADA.

Il s'agit ici de l'étude théorique et expérimentale d'un jet d'eau douce débouchant en mer depuis une rivière schématisée par un canal rectangulaire. Les expériences ont porté sur la détermination des répartitions de densité dans diverses sections parallèles au rivage à diverses distances de celui-ci.

PROCÉDÉS EXPÉRIMENTAUX D'ÉTUDES SUR MODÈLE

Certains mémoires analysés plus haut, en particulier celui de Barr, donnent des indications sur les difficultés expérimentales que l'on rencontre lors de l'étude au laboratoire des courants de densité, et sur les procédés utilisés. Le mémoire suivant est entièrement consacré à ces problèmes.

15-C. — Stable clay suspensions as substitute for seawater in model tests on density currents (*Suspensions stables d'argile pour l'utilisation dans les modèles de courants de densité au lieu d'eau salée*), par G. ABRAHAM et J.G.H.R. DIEPHUIS.

C'est la dépense quelquefois considérable entraînée par l'utilisation d'eau salée qui a con-

duit le Laboratoire de Delft à essayer d'utiliser des suspensions d'argile. Mais il fallait éviter les inconvénients inhérents à ce matériau, plus particulièrement la tendance au dépôt, qui conduit à des variations de la concentration d'un point à un autre.

L'intérêt de ce rapport est qu'il donne dans le détail tous les éléments nécessaires à la préparation de solutions d'argile stables et à leur utilisation dans les modèles. Les suspensions préparées suivant les procédés décrits peuvent être réutilisées plusieurs fois, car on règle la vitesse de sédimentation à une valeur telle que, pratiquement, aucun dépôt ne se produise pendant l'essai, mais que la reconcentration de la suspension pour un essai ultérieur ne dure pas trop longtemps.

OBSERVATIONS ET MESURES SUR PLACE

1. Courant de fond dans une retenue.

Des observations sur place de ce phénomène sont rapportées dans le mémoire :

3-C. — Density currents in an impounding reservoir (*Courants de densité dans une retenue*), par TAKESHI GODA.

Les mesures ont été effectuées pendant un an environ, en quinze stations disposées dans la retenue de Sengari, au Japon. Des échantillons

d'eau étaient prélevés une à deux fois par mois pour en déterminer la température, la turbidité, la couleur, le pH et la teneur alcaline. Les données relevées sont discutées au cours de l'exposé.

2. Coin salé.

Deux rapports traitent de ce problème. On sait que, sous l'eau douce d'une rivière qui débouche dans une mer salée, un coin d'eau salée peut remonter sur le fond jusqu'à une certaine dis-

tance. Le problème du coin salé dans une rivière qui débouche dans une mer sans marée a été traité très à fond par Keulegan [10] pour une rivière schématisée par un canal rectangulaire. On retrouve naturellement la notion de vitesse limite à partir de laquelle l'interface n'est plus stable, et, à mesure que le débit de la rivière augmente, on passe du coin salé avec mélange négligeable au coin salé avec mélange modéré, puis au coin salé avec mélange intense [11]. L'amplitude de la marée est naturellement un facteur important, ainsi que la configuration plus ou moins régulière de l'estuaire.

5-C. — On the density currents in an estuary (*Sur les courants de densité dans un estuaire*), par K. AKIKUSA, S. SATO, H. KIKKAWA, T. KISHI et M. TOMINAGA.

Ce rapport décrit des mesures effectuées au Japon dans un estuaire où la marée est de 1 à 2 m, et qui est le siège d'un mélange modéré. Une méthode pratique de calcul est proposée pour ce cas, et semble en bon accord avec les données d'observation.

4-C. — Density currents in a tidal mouth with a small tidal range (*Courants de densité dans un estuaire à marées de faible amplitude*), par K. OTSUBO et H. FUKUSHIMA.

Il s'agit d'un cas analogue au précédent, discuté à partir de la formule de mélange de Keu-

legan. La forme du coin salé est étudiée théoriquement, sans tenir compte de la marée, ainsi que les efforts tangentiels à l'interface.

3. Cas divers.

1-C. — Density currents in the dead-sea (*Courants de densité dans la mer Morte*), par A. de LEEUW.

La mer Morte, dont la salinité varie avec la profondeur, est séparée en deux zones où l'évaporation est différente, ce qui conduit à un courant de surface de l'une vers l'autre pour compenser les pertes, et à un courant de fond dû aux différences de densité ainsi créées. Le mémoire donne le détail des mesures effectuées sur place.

11-C. — The effect of density currents on Deas Island tunnel sinking operations (*L'effet des courants de densité sur les opérations de mouillage du tunnel de Deas Island*), par H. R. KIVISILD.

L'auteur met l'accent sur les difficultés rencontrées au Canada au cours du mouillage des éléments d'un tunnel dans un estuaire à marée, en raison des variations de densité de l'eau au cours du cycle de marée. La complication apportée aux travaux par cet élément perturbateur n'était pas négligeable, puisque le ponton-grue a dû être renforcé pour pouvoir supporter un effort supplémentaire de l'ordre de 500 tonnes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. G. H. KEULEGAN : Wave motion: internal waves, pp. 756-766 de "Engineering Hydraulics", par H. ROUSE.
Wiley and Sons, 1950.
2. E. W. LANE et E. J. CARLSON : Quelques aspects des courants de densité du point de vue de l'hydraulique appliquée.
Traduction (n° 2162) d'un article paru dans le bulletin 1955 de l' "International Commission on Irrigation and Drainage".
3. A. CRAYA : Recherches théoriques sur l'écoulement de couches superposées de fluides de densités différentes.
La Houille Blanche, n° 1, 1949, pp. 44-55.
P. GABRIEL : Recherches expérimentales sur l'écoulement de couches superposées de fluides de densités différentes.
La Houille Blanche, n° 1, 1949, pp. 56-64.
4. C.-S. YIH : On the flow of a stratified fluid.
Proc. Third U.S. Nat. Congress of Applied Mech., Brown University, juin 1958, pp. 857-861.
5. G. H. KEULEGAN : An experimental study of the motion of saline water into fresh water channels.
Rapport non publié du National Bureau of Standards, U.S.A.
6. G. H. KEULEGAN : Laminar flow at interface of two fluids.
Journal of Res. of Nat. Bureau of Standards, 32, p. 303 (1944).
7. R. C. LOCK : The velocity distribution in the laminar boundary layer between parallel streams.
Quart. J. Mech. and App. Math., mars 1951.
8. A. T. IPPEN and R. F. HARLEMAN : Steady state characteristics of surface flow. — Gravity waves.
National Bureau of Standards, Circular 521.
9. G. H. KEULEGAN : Interfacial instability and mixing in stratified flow.
Journal of Research of Nat. Bureau of Standards 43, p. 487 (1949).
10. G. H. KEULEGAN : Rapports 4142 et 4267 du *National Bureau of Standards* (1955).
11. H. STOMMEL : The role of density currents in estuaries.
Proc. Minnesota Int. Hydraulics Convention, p. 305, 1953.

DISCUSSION

Président : M. CHAPOUTHIER

M. le Président remercie M. VALEBOIS de l'effort fructueux qu'il a fait pour rendre son exposé parfaitement accessible à tous.

M. le Président souligne ensuite l'intérêt de l'étude de la propagation d'un front d'onde, où tout au départ dépend des forces de gravité, la viscosité et les frottements qu'elle entraîne intervenant par la suite.

M. BONNEFILLE intervient pour préciser que les essais

réalisés à Chatou ont bien mis ces phénomènes en évidence, les frottements faisant passer progressivement du front d'onde, ou « tête » du courant de densité, au régime d'écoulement établi.

M. le Président estime que lorsqu'on en sera à l'étude des régimes transitoires, les résultats de ces expériences seront d'un grand intérêt, et pourront apporter des précisions intéressantes sur l'hydraulique classique.

NOTRE FRONTISPICE

(Cf. p. 440)

HUBERT ENGELS (1854-1945)

On peut dire d'Engels qu'il fut le père du laboratoire d'hydraulique fluviale, utilisant les modèles réduits; il fut l'un des premiers à explorer les ressources de la similitude en vue des problèmes posés par les ouvrages hydrauliques.

Né le 25 janvier 1854, à Mülheim sur la Ruhr, élève de la vieille Académie d'Architecture de Berlin, puis de l'Ecole Technique Supérieure de Munich, Hubert Engels commença sa remarquable carrière d'hydraulicien dans les travaux de construction du port de Kiel, sous les ordres de G. Franzius, puis dans la régularisation de la Havel à Postdam, dans la correction de la Weser inférieure, sous les ordres de L. Franzius, à Brême, et du cours du Rhin à Düsseldorf, enfin dans la construction d'ouvrages maritimes à Pillau et à Memel.

Les années 1883-1887 le voient professeur d'hydraulique et de constructions hydrauliques à l'Ecole Technique Supérieure de Brunswick, puis à celle de Dresde, où, en 1891, il commença à expérimenter dans l'« observatoire hydraulique » de son prédécesseur Zeuner, élève de Weisbach.

C'est en 1913 que la construction d'un nouveau laboratoire d'hydraulique fluviale — qui fut dénommé en 1941 « Laboratoire Hubert Engels » —, lui permit de poursuivre sur une plus large échelle ses études sur la régularisation des cours d'eau.

Engels, aussi bon musicien et violoncelliste qu'hydraulicien expert et d'un vaste savoir, jouissant d'un grand prestige dans son pays et à l'étranger, fut aussi l'un des fondateurs de l'A.I.R.H. et l'un de ses premiers membres d'honneur. Il mourut à Jéna le 29 octobre 1945.

It can be said of Engels that he was the father of river hydraulics laboratories using scale models for he was one of the first to apply the concept of similitude to solve problems arising in connection with hydraulic structures.

Born on January 25th 1854, in Mülheim on the Ruhr, Engels was educated at the old Berlin Architectural Academy and then at the Munich Technical University. He began his remarkable hydraulic engineering career by participating in the construction of the port of Kiel, where he worked under G. Franzius. He was subsequently concerned with regularizing the Havel at Postdam, with training the Lower Weser at Bremen under L. Franzius, with training the Rhine at Düsseldorf and finally with the construction of harbour structures at Pillau and Memel. From 1883 to 1887 he was Professor of Hydraulic Structures at the Brunswick Technical University and then at the Dresden Technical University where, in 1891, he began his experimental work in the "hydraulic observatory" founded by his predecessor Zeuner, who was one of Weisbach's students.

The construction in 1913 of the new river hydraulics laboratory, known since 1941 as the Hubert Engels Laboratory, made it possible for him to pursue his investigations on a larger scale.

Engels, who was a good musician and cellist, as well as being an expert hydraulic engineer with a vast knowledge of his subject, enjoyed great prestige, both in his own country as well as abroad. He was one of the founders of the I.A.H.R. and one of its first honorary members. He died on October 29th 1945 in Jena.