

EFFETS DES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURE ET DE DENSITÉ DANS LES CIRCUITS EXTERNES DE REFROIDISSEMENT DES CENTRALES THERMIQUES

PAR
L. MANDELBROT *

Introduction

Dans presque toutes les usines génératrices d'énergie électrique d'origine thermique, le refroidissement des condenseurs est assuré par un circuit d'eau. Il s'agit quelquefois d'un circuit fermé, la même eau servant de nouveau après refroidissement au contact avec l'air atmosphérique.

Nous avons été amenés récemment à étudier (voir réf. [1]) les problèmes d'écoulement liés avec ces circuits d'eau. Nous nous préoccupons, ci-dessous, plus particulièrement de ceux des problèmes qui sont dus à la différence de densité entre l'eau prélevée à la prise et l'eau rejetée par l'usine après échauffement.

Principaux types de circuits d'eau de refroidissement

Nous rappelons brièvement les types principaux des circuits d'eau de refroidissement :

— CIRCUITS COMPLÈTEMENT OUVERTS.

Nous ne considérerons le circuit comme complè-

tement ouvert que lorsque la masse d'eau dans laquelle on puise et celle dans laquelle on rejette sont matériellement séparées. Ce type de circuit ne pose évidemment pas de problème du point de vue qui nous occupe. Il est cependant exceptionnel.

— CIRCUITS UTILISANT UN COURS D'EAU.

L'eau est prélevée dans le lit du cours d'eau et y est rejetée, en règle générale, en aval de la prise. Il n'y a pas de séparation matérielle entre les eaux d'amont et d'aval.

— CIRCUITS UTILISANT UN RÉSERVOIR, naturel ou artificiel : lac, étang, retenue de barrage, dans lequel le courant de renouvellement de l'eau est faible par rapport au débit prélevé pour l'usine.

— CIRCUITS MIXTES.

Comportant un plan d'eau important mais le débit traversant le réservoir n'est pas négligeable.

— CIRCUITS UTILISANT UN BASSIN MARITIME.

Problèmes de stratification par densité apparaissant dans les circuits de refroidissement

L'eau rejetée par une centrale thermique est échauffée d'environ 7 °C. La densité a donc varié d'environ 1 millième par rapport à la densité à la

* Département Mécanique des Fluides, C.R.E.C., Chatou.

prise. La mise en contact de deux masses d'eau à températures différentes s'accompagne de phénomènes de stratification et de phénomènes de mélange. Dans la plupart des exemples cités ci-après, le mélange est négligé, le calcul dans l'hypothèse de la stratification étant seul réalisable dans beaucoup de cas.

Chacun des types de circuits donne lieu à un certain nombre de problèmes. Nous allons les énumérer, puis les grouper suivant leur nature.

— CIRCUITS OUVERTS : cités pour mémoire.

— CIRCUITS UTILISANT UN COURS D'EAU :

a) L'eau chaude du rejet constitue un jet qui a tendance à s'étaler en surface par action des forces d'Archimède : *problème de l'étalement d'un jet*;

b) Dans la zone comprise dans le lit du cours d'eau entre le rejet et la prise, il y a tendance à formation d'une couche chaude en surface et d'une couche froide au fond. Il y a donc lieu d'étudier le *problème de l'interface de séparation et de l'écoulement dans chacune des couches*;

c) La prise d'eau s'effectue dans une zone de superposition de deux couches. On cherche à rendre minimale l'aspiration de l'eau chaude. C'est le *problème du soutirage sélectif*.

— CIRCUITS UTILISANT UN RÉSERVOIR NATUREL OU ARTIFICIEL :

a') Problème de l'étalement du jet;

b') Problème de l'écoulement entre le rejet et la prise;

c') Problème du soutirage sélectif à la prise d'eau;

d) Lorsque l'interface est définie, et dans tous les cas où le mélange n'est pas complet, les pentes de la surface libre induites par l'action du vent se traduisent par des pentes amplifiées pour l'interface ou la zone de transition. Si la cause cesse de se manifester, le retour à l'équilibre s'effectue par une suite d'oscillations. C'est le *problème du basculement et des oscillations de l'interface*.

— CIRCUITS UTILISANT UN BASSIN MARITIME :

a'') b'') c'') d'') (pour mémoire);

e'') Si le bassin est soumis à l'action de la marée, il conviendra d'en étudier l'effet sur l'existence et la position de l'interface;

f'') S'il s'agit d'un bassin à flot, la dénivellation périodique avec le niveau de la mer provoque des infiltrations ou des fuites.

Etude de l'étalement en surface d'un jet de liquide léger

Le régime transitoire est celui de l'étalement d'une nappe de liquide léger après le début d'émission; le régime permanent consiste à suivre le trajet d'une particule émise à un moment quelconque

dans un fonctionnement continu, ou du moins, à déterminer la nature du fluide et les grandeurs dynamiques en tout point du volume liquide.

En fait, ce qui a été le plus étudié, c'est le régime transitoire en absence de mélange, c'est-à-dire la propagation d'un front de séparation des deux fluides. Par exemple : tel est le cas de l'étude d'Abbott [2] et des études de Barr [3]. Abbott étudie la propagation du front de séparation des fluides en absence de dissipation, par une méthode de caractéristiques. Barr étudie le même phénomène de façon expérimentale et l'interprète de façon empirique. Ayant introduit un nombre de Reynolds et un nombre de Froude interne :

$$\mathcal{R} \equiv \frac{uh}{\nu} \quad \mathcal{F}_i^2 \equiv \frac{u^2}{(\Delta\rho/\rho) \cdot g \cdot h} \quad (1) (2)$$

il élimine la vitesse entre eux pour obtenir un nombre sans dimensions qu'il appelle « Froude-Reynolds densimétrique ». Remarquons que pour des variations de densité d'origine thermique :

$$“\mathcal{F}_\Delta \mathcal{R}” \equiv \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{gh^3}{\nu^2} = \frac{\Delta T}{T} \frac{gh^3}{\nu^2} \equiv \mathcal{G} \quad (3)$$

nous retrouvons identiquement le nombre de Grashof, ce qui est normal dans un problème où des forces visqueuses équilibrent des forces d'Archimède. Du fait que la variation relative de densité $\Delta\rho/\rho$ n'intervient que par ce nombre de Grashof, Barr déduit une possibilité de faire des modèles avec distorsion de l'échelle de $\Delta\rho$. En admettant g et ν conservés, c'est-à-dire $[g] = [\nu] = 1$:

$$\left[\frac{\Delta\rho}{\rho} \right] = [h]^{-3} \quad (4)$$

Comme nous avons admis que $\Delta\rho/\rho$ doit rester petit, la variation de l'échelle de h ainsi autorisée est très faible.

Il en résulte que la méthode est rarement utilisable dans un cas réel pour assurer la réalisation simultanée d'un modèle en similitude de Froude (interne) et de Reynolds. De plus la distorsion de $\Delta\rho/\rho$ fait que la similitude de Froude externe n'est pas assurée, et les courants d'ensemble ne sont plus représentés en modèle. La méthode n'est donc applicable que pour l'étude de fragments d'écoulement pour une connaissance qualitative des propriétés du mouvement réel.

Récemment, Chin [4] a fait une étude théorique à partir des équations de base du mouvement. Il montre la difficulté d'obtenir une solution ayant des propriétés de similitude, c'est-à-dire invariante dans un système de coordonnées réduites, lorsque les limites de l'écoulement sont données.

En conclusion, il semble que le problème de l'émission continue d'un jet supporté par les forces d'Archimède nécessite encore des études tant théoriques qu'expérimentales, avant d'être considéré comme pratiquement résolu.

L'importance d'une telle solution apparaîtra mieux en rapprochant le problème de la position de l'interface du jet avec celui de l'aspiration sélective évoqué ci-dessous.

Etude de la stratification dans le lit d'une rivière entre la prise d'eau et le rejet

Lorsque le rejet d'une usine thermique s'effectue dans le lit du cours d'eau dans lequel s'effectue également la prise, il y a lieu de craindre un recyclage inutile, c'est-à-dire que, même pour un débit de prélèvement inférieur au débit de la rivière, une partie du débit arrivant soit perdue, et remplacée dans le débit aspiré par de l'eau remontant depuis le rejet.

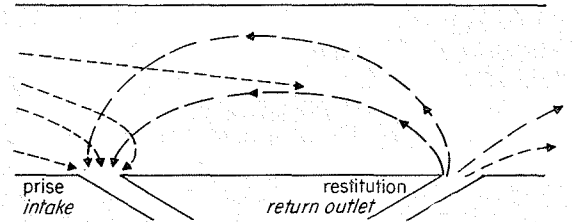
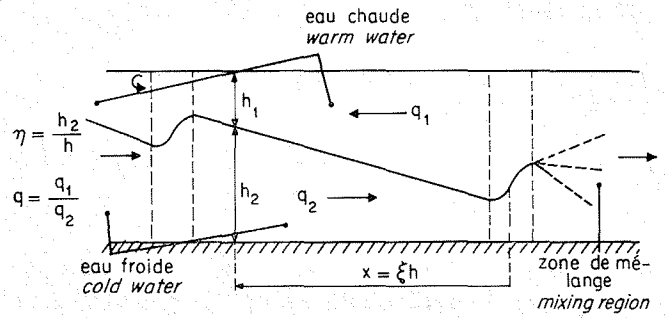
Les conditions limites de fonctionnement qui évitent cet inconvénient ont été étudiées dans de nombreux cas en schéma d'écoulement potentiel, par analogie électrique notamment. Cette méthode a rendu service, en particulier lorsque le lit du cours d'eau a une forme en plan compliquée : variations de largeur, îles, courbes, etc. Elle est bidimensionnelle, l'écoulement étant admis homogène et uniforme sur toute sa profondeur et en tout point. Elle détermine donc la séparation de l'eau d'amont, froide, et de l'eau de rejet, chauffée par une surface réglée à génératrices verticales. Une telle séparation est instable.

De nombreux chercheurs ont donc traité le problème de la surface de séparation entre les deux masses d'eau. Mais ils ont dû en général recourir à une schématisation, eux aussi. En règle générale, l'étude est conduite pour le cas d'un lit rectangulaire de largeur constante, de profondeur faible par rapport à la largeur. La distance entre la prise d'eau et le rejet est supposée suffisamment grande pour que l'on puisse ne tenir compte des phénomènes propres à leur voisinage, qu'en tant que termes correctifs et pour définir les conditions aux frontières des différentes zones d'écoulement. En dehors de ces zones, l'écoulement est supposé uniforme sur toute la largeur du lit, et formé de deux couches superposées avec interface définie. La vitesse est admise uniforme sur toute la profondeur de chaque couche. Les frottements sur les surfaces du lit et sur l'interface sont pris en compte par des coefficients de perte de charge λ_f et λ_i .

Le problème a été traité par différents auteurs : Schijf et Schönfeld [5] et surtout Bata [6]. Le traitement de ce dernier est particulièrement complet et adapté au cas des centrales thermiques. La figure 1 résume le schéma de Bata. La zone d'eau chaude provenant, suivant les conditions aval, soit du rejet soit du mélange en aval de celui-ci, remonte vers la prise d'eau et réalise en amont de la prise une nappe stagnante. L'eau chaude pénètre ainsi dans la prise d'eau (effectuée sur toute la profondeur). La figure 1 rappelle l'équation différentielle définissant la position de la séparation entre les nappes d'eau chaude et froide. La condition d'expulsion d'une nappe d'intrusion de surface (chaude) ou de fond (froide) s'écrit :

$$\mathcal{F}_i \equiv \frac{u_0}{\sqrt{(\Delta\rho/\rho)gh}} \geq 1 \quad (5)$$

en introduisant le nombre de Froude interne de l'écoulement amont. La condition critique pour l'in-



--- trajectoires dans eau chaude
flow paths in warm water
- - - trajectoires dans eau froide
flow paths in cold water

1/ Schéma de Bata. Prise et rejet en rivière avec écoulement stratifié.

Bata's diagram for a river intake and outlet with layered flow.

Equation de l'interface (Interface equation) :

$$\frac{d\xi}{d\eta} = \frac{-(1/F^2) + (1/\eta^3) [q/(1-\eta)^3]}{\alpha \cdot [(1-\eta + q\eta)/(1-\eta)^3] + 1} \cdot \eta^3$$

$$\alpha = \frac{\lambda_i \text{ p. de ch. d'interface (interface loss)}}{\lambda_f \text{ p. de ch. de fond (bed loss)}}$$

Condition d'expulsion d'une intrusion de surface ou de fond (Condition for expulsion of a surface or bed intrusion) :

$$F_{i0} \geq 1$$

Condition de profondeur critique (Critical depth condition) :

$$\frac{1}{F^2} = \frac{q^2}{(1-\eta_c)^3} + \frac{1}{\eta_c^3}$$

	Prise sur un mur vertical Intake in a vertical wall	Prise dans un plan horizontal Intake in a horizontal plane
	$\mathcal{F}_i^2 = \frac{Q^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g H^3 L^2}$	$\mathcal{F}_i^2 = \frac{Q^2}{\frac{\Delta\rho}{\rho} g H^5}$
$\frac{b}{H} = 0$	$\mathcal{F}_i^2 = 0,25 \left[1 - \left(\frac{a}{H} \right) \right]$ $\mathcal{F}_i^2 = 0,205$ pour $\frac{a}{H} = 0$?
$\frac{b}{H} = \infty$	$\mathcal{F}_i^2 = \frac{1 - \frac{a}{H}}{0,342 - 0,246 \frac{a}{H}}$ $\mathcal{F}_i^2 = 2,31$ pour $\frac{a}{H} = 0$	$\mathcal{F}_i^2 = 2,59$ $0,25 < \frac{d}{H} < 1,25$ $\mathcal{F}_i^2 = 20 \frac{d}{H}$ $0,25 < \frac{d}{H} < 100$

2/ Aspiration sélective.
Selective suction.

terface s'obtient en annulant le numérateur de $d\xi/d\eta$ dans :

$$\frac{\lambda_f d\xi}{8 d\eta} = \frac{1}{\mathcal{F}_i^2} + \frac{1}{\eta^3} + \frac{q^2}{(1-\eta)^3} \cdot \eta^3 \cdot (1-\eta)^3 \quad (6)$$

d'où :
$$\frac{1}{\mathcal{F}_i^2} = \frac{1}{\eta^3} + \frac{q^2}{(1-\eta)^3} \quad (7)$$

avec les notations de la figure 2. L'équation (7) donne deux racines réelles pour chaque valeur de q et \mathcal{F}_i , qui correspondent à une position critique basse et haute de l'interface. Bata admet comme condition à la frontière aval de la zone médiane la réalisation de la position critique basse de l'interface. La forme de celle-ci s'en déduit par intégration de (6) vers l'amont. Les points de l'exposé de Bata qui semblent demander une étude détaillée sont : les conditions d'évolution de l'écoulement au droit de la prise et du rejet, la définition de la tension d'interface et le rôle du mélange entre les deux couches.

Cet exposé a été repris, systématisé et complété dans un mémoire de Daubert, malheureusement non publié. Il est repris, avec des notations différentes, par Spiess [7] dans une thèse destinée à former une méthode pratique de calcul des circuits de refroidissement sur rivière.

Problème du soutirage sélectif dans une masse liquide à stratification de densité

La localisation, dans une couche de surface, des eaux chaudes présente un grand intérêt en rendant possible la réalisation de prises d'eau sélectives puisant dans la seule couche froide de fond. Il peut en pratique s'agir soit de canalisations débouchant en profondeur, soit de prises de forme et emplacement quelconques protégées de l'intrusion de l'eau chaude par un écran ou barrage de surface, fixe ou flottant.

Les premières études importantes de cette question ont été faites par Craya [8] et Gariel [9]. La première fait la théorie de l'aspiration vers un puits latéral ponctuel ou linéaire. La deuxième en est la vérification expérimentale. Il résulte de ces études des expressions du débit maximal que l'on peut prélever avant que le rabattement de l'interface entraîne un puisage non sélectif. Avec les notations de la figure 2 ces conditions s'expriment, au moyen de nombres de Froude internes :

$$\mathcal{F}_i^2 = \left(\frac{Q^2}{H^4} \right) / \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \cdot g \cdot H \right) \leq 6,5 \quad (8)$$

dans le cas de la prise ponctuelle et :

$$\mathcal{F}_i^2 = \left(\frac{Q^2}{L^2 \cdot H^2} \right) / \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} g H \right) \leq 2,31 \quad (9)$$

dans le cas de la prise linéaire bidimensionnelle de longueur L. De nombreux autres cas ont depuis été

étudiés. On trouvera dans un article de Daubert [10] un tableau synoptique rassemblant les résultats et une bibliographie. La figure 2 résume une partie de la planche de Daubert.

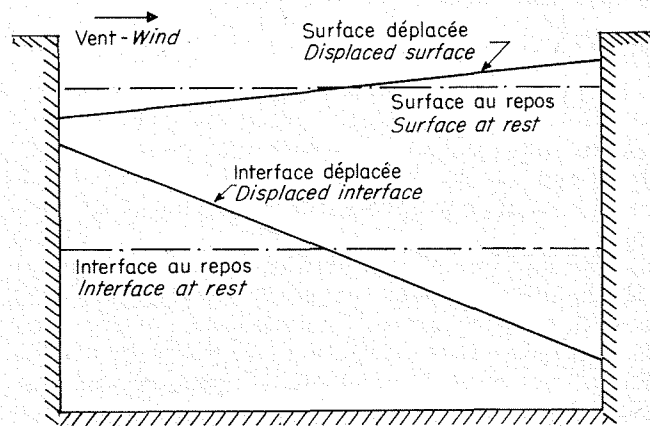
Plusieurs études de caractère théorique et expérimental se sont occupées récemment d'un problème en quelque sorte inverse : éviter la formation de zones de stagnation, lors d'un soutirage en fluide stratifié. Nous nous contenterons de citer la référence [11].

Nous pouvons admettre que, pour les applications pratiques, on dispose de solutions, du moins dans le cas où les vitesses existant dans la masse fluide, autres que celles induites par le soutirage, peuvent être négligées, et où le schéma à deux couches est acceptable.

Problèmes de l'inclinaison et des oscillations de l'interface

La prévision de l'étude de soutirage sélectif peut en pratique être mise en défaut par suite d'une inclinaison (basculement) ou d'oscillations de l'interface. Lorsqu'on étudie l'équilibre de la masse stratifiée, on montre que, en première approximation, la pente de l'interface est égale à celle de la surface libre, divisée par $(\Delta\rho/\rho)$. Une telle pente de la surface libre est induite par la tension tangentielle du vent. Le problème a été étudié de façon complète par Keulegan [12] et surtout Hellström [13].

Lorsque le vent qui a causé une forte inclinaison de l'interface cesse, le retour à l'équilibre se fait, comme dans le cas de la surface libre, par une suite d'oscillations. Dans le cas d'un lac de longueur L, formée de deux couches homogènes (figure 3), une formule de Stokes donne la période des



3 a/ Inclinaison de l'interface. Interface slope.

$$\begin{aligned} \text{pente d'interface} \# & \frac{\text{pente de surface}}{-\Delta\rho/\rho} \\ \text{interface slope} \# & \frac{\text{surface slope}}{-\Delta\rho/\rho} \end{aligned}$$

oscillations uninodales (longueur L égale à une demi-longueur d'onde) :

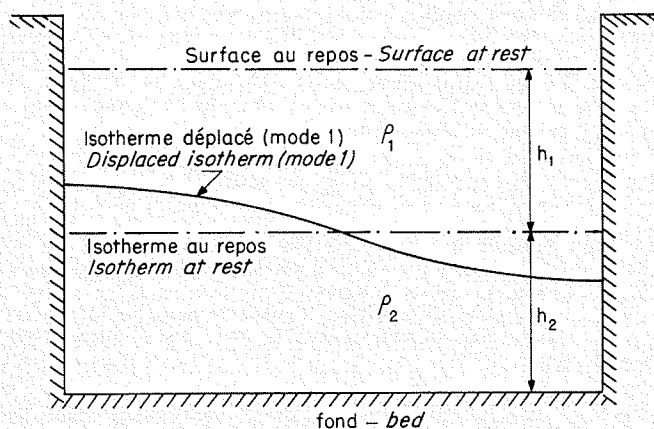
$$T = 2L \left[\left(\frac{\rho_1}{h_1} + \frac{\rho_2}{h_2} \right) / g(\rho_1 - \rho_2) \right]^{1/2} \quad (10)$$

Cette formule a été expérimentalement vérifiée par Mortimer [14]. L'étude théorique de Heaps [15] est basée sur un modèle de stratification à trois couches, avec gradient constant de densité dans chaque couche, le plus fort gradient se produisant dans la couche intermédiaire. Ce calcul confirme et généralise les résultats de Mortimer. Pour un lac de 6,6 km de long, avec gradient maximal entre 6 et 10 m de profondeur, l'oscillation uninodale interne a une période de 18,1 heures (l'oscillation ou seiche de surface a une période de 0,181 heure).

Une telle oscillation peut donc perturber gravement le fonctionnement de la prise d'une centrale. Elle peut être la suite d'un fort vent d'orage. Pratiquement, pour éviter le risque d'alimentation en eau chaude par suite du basculement de l'interface, il convient d'éviter de placer la prise dans la direction sous le vent dominant. L'oscillation ne peut cependant pas être évitée.

Problèmes propres à l'utilisation de bassins maritimes

L'utilisation de bassins à marée pose le problème de l'expulsion de l'eau chaude en présence d'un phénomène de marée. Un deuxième problème est celui du mélange sous l'influence de la marée. Ces problèmes sont mal connus. Les études analogues relatives aux estuaires ne sont pas applicables, car le principal paramètre est, dans ce type d'études, le débit de la rivière qui, dans le cas qui nous intéresse, est nul. On peut songer à une évaluation des



3 b/Oscillations de l'interface et des isothermes.
Interfaces and isotherm oscillation.

Formule de Stokes (Stokes' formula) :

$$T = 2L \left[\frac{(Q_1/h_1) + (Q_2/h_2)}{g(Q_1 - Q_2)} \right]^{1/2}$$

coefficients de transfert turbulent par la théorie de Kolmogorof, mais cela nécessite la connaissance de l'énergie turbulente dissipée et de l'échelle des tourbillons responsables du transfert, ce qui ne fait que déplacer la difficulté. Il sera donc difficile de prévoir théoriquement si un tel bassin sera stratifié ou mélangé.

Conclusion

Nous avons passé en revue divers types de problèmes liés à la stratification de l'écoulement dans les eaux servant aux circuits de refroidissement des centrales thermiques.

Plusieurs de ces problèmes ont reçu une solution satisfaisante pour les besoins de la pratique. Ce qui reste difficile, c'est l'association, dans des cas réels, des différents éléments en vue d'une solution particulière à ces cas, les phénomènes en cause ne pouvant pas être considérés comme additifs.

Bibliographie

- [1] MANDELBROT (L.). — *Bulletin du C.R.E.C.*, n° 7 (1964).
- [2] ABBOTT (M.B.). — On the spreading of one fluid over another. *La Houille Blanche*, n° 5 (1961).
- [3] BARR (D.I.H.). — Spread characteristics of a buoyant miscible discharge. *Congrès de l'A.I.R.H.*, Londres, 1963.
- [4] CHIN (J.H.). — Spreading of liquid surface jets supported by buoyancy forces. *A.I.A.A. Journal*, Vol. 1, n° 8.
- [5] SCHJEF (J.B.) et SCHONFELD (J.C.). — Theoretical considerations on the motion of salt and fresh water. *Congrès de l'A.I.R.H.*, Minneapolis, 1953.
- [6] BATA (G.L.). — Recirculation of cooling water in rivers and canals. *Journ. of the Hydraul. Div. A.S.C.E.*, Vol. 83, HY 3.
- [7] SPIESS (K.H.). — Hydraulische und thermodynamische Vorgänge in offenen Gerinnen beim Kühlwasserkreislauf von Dampfkraftwerken. 151. *Arbeit. Th-Rehbock Flussbaulabor.*, Karlsruhe, 1963.
- [8] CRAYA (A.). — Recherches théoriques sur l'écoulement de couches superposées de fluides de densités différentes. *La Houille Blanche* (janv.-fév. 1949).
- [9] GARIEL (P.). — Recherches expérimentales sur l'écoulement de couches superposées de fluides de densités différentes. *La Houille Blanche* (janv.-fév. 1949).
- [10] DAUBERT (A.). — Le soutirage sélectif dans deux couches de liquides superposées. *Bulletin du C.R.E.C.*, n° 4 (1963).
- [11] YIH CHIA SHUN, O'DELL (W.) et DEBLER (W.R.). — Prevention of stagnation zones in flows of a stratified or rotating fluid. *4th U.S. Nat. Congr. of Appl. Mechanics*, Berkeley, 1962.
- [12] KEULEGAN (G.). — Wind tides in small closed channels. *Jour. of Res. of the N.B.S.*, Vol. 46, n° 5 (1951).
- [13] HELLSTROM (B.). — Wind effect on lakes and rivers. *Inst. of Hydr. of the Roy. Inst. of Technol.*, Stockholm, 1941.
- [14] MORTIMER (Cn.). — Water movements in stratified lakes. *Un. Geodes. et Geoph. Intern.*, Bruxelles, 1951.
- [15] HEAPS (N.S.). — Seiches in a Narrow Lake, Uniformly Stratified in Three Layers. *Geoph. Journ. Roy. Astr. Soc.*, Vol. 5, n° 2.

Discussion

Président : M. Halbronn

M. le Président remercie M. MANDELBROT de son important exposé synthétique et souligne la complexité du problème étudié en rappelant les méthodes d'approche qui lui sont applicables :

- la recherche des nombres sans dimension, assez décourageante, parce qu'ils sont très nombreux;
- la schématisation du problème par le traitement mathématique des cas uni- ou bidimensionnels, extrêmement importante parce qu'elle permet de voir l'ordre de grandeur de l'influence des différents paramètres sans dimension et d'en éliminer un certain nombre;
- la méthode expérimentale : études de base ou études sur modèles réduits, la possibilité de celles-ci étant déterminée suivant le nombre des paramètres prépondérants que le traitement mathématique précipité permet de discerner.

A propos des études de Barr, M. le Président signale qu'il avait tiré des études de Spelding et Ricou la conclusion que, dans ces cas d'intrusion de jet, le paramètre R et le paramètre de Froude interne jouaient effectivement, mais que, dans les cas industriels le paramètre de Reynolds ne jouait pratiquement pas et que les résultats vérifiaient bien une similitude de Froude interne. Cette dernière conclusion était d'ailleurs favorable à l'expérimentation sur modèle, qui ne serait pas possible dans le cas de l'introduction du nombre de Grashof.

M. le Président ajoute une autre méthode que M. MANDELBROT n'a pas souligné; c'est celle qui consiste à changer de fluide, solution possible dans certains cas, mais pas très souple, car on ne dispose pratiquement que d'air et d'eau.

M. MANDELBROT répond que la similitude partielle proposée par Barr ne s'applique, de l'avis même de son auteur, qu'à des morceaux d'écoulement : il cherche à voir ce qui se passe sur un jet, sans considérer l'écoulement d'ensemble de la masse dans laquelle il rejette, ce qui aurait nécessité une similitude de Froude et n'aurait pas permis de jouer sur la variation de densité.

D'autre part, si l'on prend, pour le modèle, une échelle linéaire de l'ordre de 10, cela fait, sur h^3 , 1 000 et il faudrait soit vouloir représenter des effets de ΔQ , qui sont extrêmement faibles au départ et qui, multipliés par 1 000, seraient encore acceptables sans distorsions trop marquées, soit accepter un $\Delta Q/Q$ assez important; mais, dans ce cas, on ne peut plus admettre que la seule façon dont le rapport $\Delta Q/Q$ intervient soit le nombre de Froude interne.

M. le Président remarque que la limitation de l'étude de Barr au seul jet paraît enlever beaucoup d'intérêt à la représentation et qu'on se heurte aussi à un problème de puissance à dissiper sur le modèle.

Sur la demande de M. le Président, M. ABRAHAM donne son avis sur la similitude de Barr :

Quand on représente verticalement un jet dans une masse de fluide limitée par des surfaces libres, on peut distinguer deux zones (fig. 1) :

- dans la première, l'eau monte, l'énergie cinétique initiale du jet est prépondérante; dans cette zone, on ne doit pas considérer l'influence du nombre de Reynolds et on peut employer le nombre de Froude;
- dans la seconde, l'eau coule dans un sens horizontal, l'influence de l'énergie cinétique est plus faible et on doit considérer spécialement, dans un modèle à l'échelle, l'influence de la viscosité, comme l'indique Barr.

M. le Président est bien d'accord avec M. ABRAHAM, mais remarque que, dans la nature, le nombre de Reynolds dépasse le seuil de 10^3 et, dans un modèle, pas trop réduit, il faut se placer dans des zones de l'ordre de 10^4 , sinon, on ne peut plus faire un modèle d'ensemble.

M. MANDELBROT rappelle, toutefois, que le cas étudié par M. ABRAHAM dans lequel il y a une émission en profondeur, avec remontée du jet, soit à la verticale avec étalement, soit suivant une courbe, avec diffusion et étalement, est légèrement différent du cas du thermique, où il n'y aura pas cette distinction entre deux zones, l'émission se faisant en surface.

M. le Président pense que l'énergie cinétique est aussi prépondérante dans un jet en surface que dans un jet en profondeur.

M. MANDELBROT remarque, toutefois, que, dans le cas du jet vertical en profondeur, les effets de la force d'Archimède s'exercent dans le sens vertical, qui est le sens de l'écoulement de l'ensemble, donc se remarqueront assez peu; alors que, dans le cas d'un jet émis en surface, une estimation des effets de la force d'Archimède, faite par M. MANDELBROT, montre que l'effet d'aplatissement du jet se fait sentir très vite et les vitesses transversales à l'écoulement qui en résultent influent sensiblement sur la forme en surface de la zone occupée par le jet.

M. le Président ne croit pas que le sens de la force d'Archimède joue un rôle, car les études montrent que c'est bien le nombre de Froude qui est prépondérant, indépendamment de la température du jet.

M. ABRAHAM juge utile de rappeler les expériences de Barr (*) parce qu'elles indiquent une valeur limite séparant le cas où il y a l'influence du nombre de Reynolds de celui où il n'y a pas cette influence (fig. 3). Dans un écoulement représenté par la figure 2, Barr a mesuré la vitesse v à une distance variable de la paroi et il a tracé, dans un plan L/h en fonction de R_0 (fig. 3) une famille de courbes qui ont pour paramètre caractéristique les valeurs v/v_0 , v_0 étant la vitesse initiale. Le graphique indique que, passé une certaine valeur ($R_0 = 10^4$), la relation entre L/h , v/v_0 et R_0 ne semble pas être influencée par la viscosité.

M. MANDELBROT indique que, depuis, Barr a publié d'autres articles dans lesquels il disait qu'il corrigerait son point de vue précédent en introduisant une combinaison de Froude et de Reynolds et c'est à cela que M. MANDELBROT faisait allusion.

M. le Président conclut que la valeur limite de R indiquée par Barr (10^4) d'après M. ABRAHAM est du même ordre de grandeur que celle qu'il avait mentionnée.

M. HUFENUS remarque que, dans l'étude de la stratification dans le lit d'une rivière entre la prise d'eau et le rejet, M. MANDELBROT signale que la condition d'expulsion d'une nappe d'intrusion de surface (chaude) ou de fond (froide) s'écrit :

$$F_t = \frac{M_0}{\sqrt{g(\Delta Q/Q)h}} \geq 1$$

On retrouve, semble-t-il, une conclusion analogue dans l'étude de la convection naturelle sur une plaque chauffée verticalement plongée dans un fluide en mouvement uniforme de vitesse u_0 descendante (opposite flow). Si l'on trace en effet les profils de vitesse au sommet de la plaque pour un écart positif ΔT de température (entre la plaque et le fluide à l' ∞) on obtient des vitesses négatives dans la couche limite jusqu'à ce que le nombre :

$$F = \frac{u_0}{\sqrt{g\beta\Delta Th}} = 1$$

(β étant le coefficient de dilatation du fluide).

Dès que F est inférieur à 1, la vitesse devient positive aux abords immédiats de la plaque.

Par conséquent, la condition d'entraînement de la couche limite chaude qui tend à monter le long de la plaque est bien $F \geq 1$.

M. GOUBET pose deux questions :

1° Les centrales électriques sont souvent situées le long de voies navigables. A-t-on une idée de la façon dont le passage des péniches modifie les phénomènes de stratification existant en l'absence de navigation?

2° La notion d'interface correspond-elle bien à une notion physique réelle étant donné que les relevés de température pratiqués à l'aval des rejets semblent montrer, entre la surface et le fond, même à proximité de la centrale, un passage très progressif de l'eau chaude à l'eau froide?

(*) La Houille Blanche, n° 7, novembre 1963, p. 739-754.

M. MANDELBROT répond :

1° Le brassage dû aux péniches ne semble pas avoir été étudié, mais l'observation du déplacement d'un navire dans une eau de surface stratifiée, en particulier dans les mers nordiques, a montré que, lorsque l'enfoncement du bateau était de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche superficielle, la résistance à l'avancement du bateau était fortement augmentée du fait des ondes créées sur l'interface.

M. MANDELBROT rappelle que le déplacement permanent se traduit par une pente d'interface divisée par $-\Delta\rho/\rho$, c'est-à-dire par un coefficient très petit. Pour réaliser cette pente dans un milieu stratifié, il faut déplacer des masses énormes. Cela ne peut pas se produire au passage d'un bateau, mais il y a alors tendance à la naissance d'ondes d'interface très importantes. Toutefois, ces remarques s'appliquent au cas de la mer libre, mais ces phénomènes n'ont pas été étudiés dans le cas du schéma que M. MANDELBROT a présenté (rivière délimitée) et risquent d'y être très différents par leur complexité (réflexion d'ondes, etc.).

2° En ce qui concerne la valeur physique de la notion d'interface, il faudrait savoir si les mesures auxquelles M. GOUBERT fait allusion se rapportent à des taux de prélèvement du débit très importants ou non : dans le cas d'un prélèvement réduit, le jet va obéir, tout de suite après son émission, aux lois habituelles des jets et, de plus, aux phénomènes d'étalement et il arrivera très rapidement à avoir une grande étendue et une faible profondeur, ce qui va être éminemment favorable à son mélange avec les eaux en aval; mais il arrivera très rapidement à avoir une grande étendue et une faible profondeur, ce qui va être éminemment favorable à son mélange avec les eaux en aval; mais il gardera son individualité en longueur sur une ou deux largeurs de rivière, au moins.

M. MANDELBROT est bien d'accord sur le fait qu'il n'y aura pas réellement de discontinuités : d'ailleurs, dans le titre de l'exposé qu'il vient de faire, il y avait le mot « gradient » parce qu'il espérait pouvoir intégrer dans ces considérations des effets gradués, mais en fin de compte, M. MANDELBROT, en regardant ce qu'il existait de vraiment existant sur ce problème, a préféré se limiter aux exemples dans lesquels on suppose la stratification.

Il n'empêche qu'entre la prise et le rejet, la distance n'étant quand même pas très grande, dans le cas qui est celui du schéma qu'il a rappelé, où l'on prélève presque la totalité de la rivière, on peut, tout de même, tirer des renseignements intéressants de cette méthode de calcul. De toute façon, la considération du mélange entre les deux couches de vitesses inverses ne fera qu'introduire des termes correctifs au phénomène.

M. BLANCHET, à propos des études sur modèle réduit de circuit de refroidissement à partir de bassin fermé, indique qu'il est un problème très important qui n'a pas été évoqué : celui de la plongée des eaux de surface vers le fond pour boucler le circuit. Normalement, c'est aux extrémités des bassins, là où l'eau est la plus refroidie, que se fait cette plongée (fig. 5). Mais dans certains cas l'eau du fond était plus froide que l'eau la plus froide de surface et M. BLANCHET s'est demandé si cela était dû à une convection à petite échelle faisant descendre « en pluie » les masses élémentaires les plus froides ou si le refroidissement en profondeur s'effectuait par rayonnement?

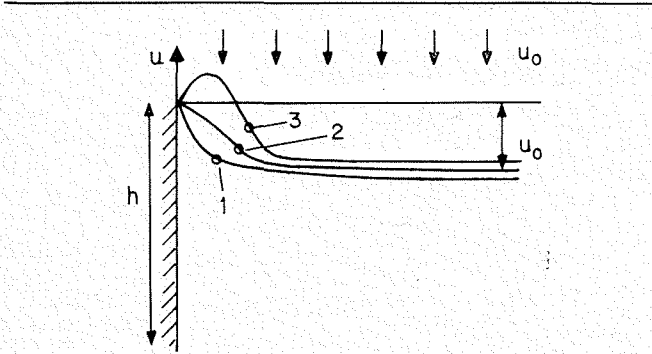
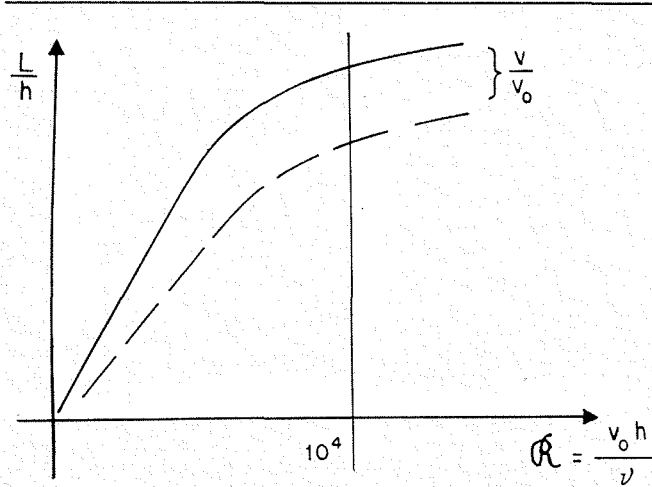
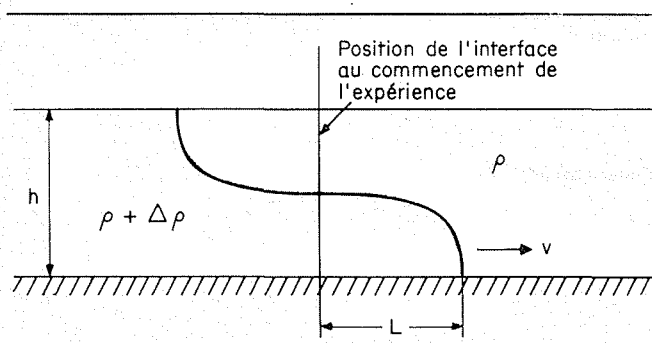
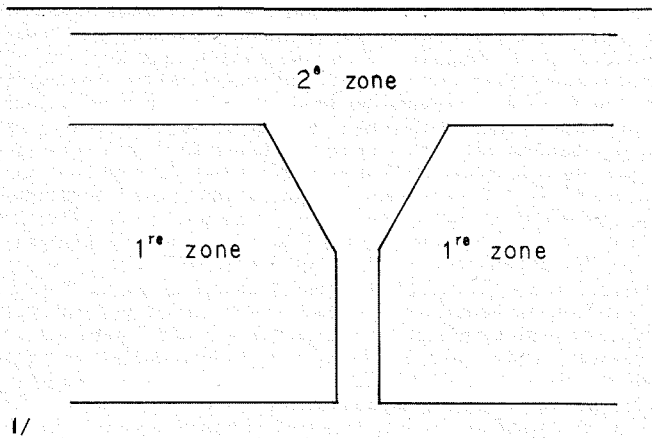
M. MANDELBROT pense que c'est la seule hypothèse possible, à condition qu'on n'ait pas une aspiration du jet et la prise étant suffisamment profonde.

Dans le cas où il a vu apparaître le phénomène de présence d'eau plus froide au fond, M. MANDELBROT pense qu'on pouvait soupçonner des infiltrations assez importantes d'eau plus froide, par le fond ou, dans le cas maritime, par des échues ou des vannes.

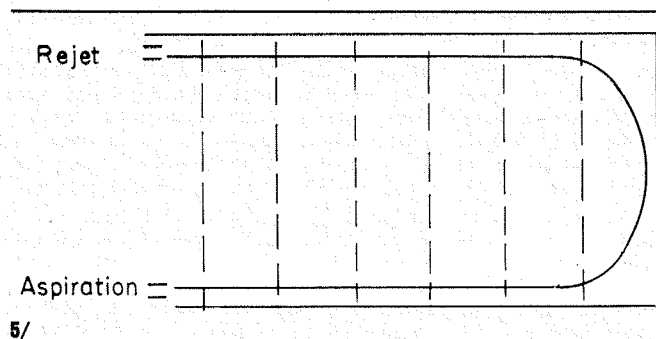
M. BLANCHET indique que dans une étude pour Dunkerque, il y avait en effet des entrées d'eau froide par les écluses.

M. BLANCHET pense qu'il est facile de régler sur les modèles la différence de température entre le rejet et la prise, par contre, on n'est pas sûr que la répartition du refroidissement dont dépend la répartition des courants de densité dans le bassin est bien reproduite. Il faudrait considérer ce deuxième aspect du problème pour faire des modèles plus complets, notamment dans le cas où on veut savoir combien de groupes on peut mettre sur un bassin déterminé.

M. le Président remarque qu'il faudrait trouver une installation existante qui permette de faire les mesures voulues.



- 1 - $\Delta T = 0$
- 2 - ΔT tel que $F > 1$
- 3 - ΔT tel que $F < 1$



M. BLANCHET ajoute qu'en mer, dans une tranche superficielle et durant la phase de refroidissement, l'eau de dessous est souvent très légèrement plus froide, ce qui supposerait, soit une chute généralisée des particules les plus froides depuis la surface, soit un courant organisé depuis

des régions plus froides, soit une perte par rayonnement.

M. MANDELBROT croit que, dans le cas de Dunkerque, c'est tout de même dans la couche superficielle que l'on trouve des températures assez élevées qui varient assez lentement et que l'eau de la couche du fond est beaucoup plus froide.

M. MANDELBROT estime que cela est difficile : en effet, on a pu réaliser des systèmes pour emmagasiner l'énergie solaire, dans lesquels on fait chauffer l'eau du fond par absorption du rayonnement solaire, l'isolement thermique étant assuré par la double couche superficielle : le réchauffement se fait ressentir jusqu'à la profondeur de pénétration des rayons solaires, qui sont beaucoup moins absorbés par l'eau que le rayonnement à grande longueur d'onde. Toutefois, M. MANDELBROT estime que le refroidissement par rayonnement ne pourrait se faire que sur une couche extrêmement mince pour les températures auxquelles on peut penser dans le problème faisant l'objet de son mémoire, c'est-à-dire 20 à 30 °C au maximum.

M. BLANCHET ajoute que le refroidissement ne pose pas de problème lorsqu'il y a du vent qui le produit *ipso facto*.

M. le Président remercie M. MANDELBROT ainsi que les commentateurs.

