

Ondes internes
Ondes d'inertie
Vent
Analyse spectrale
Internal waves
Inertial waves
Wind
Spectral analysis

Étude expérimentale des ondes internes engendrées par le vent

G. Chabert d'Hières, D. Renouard
Cnrs, Institut de Mécanique de Grenoble, B.P. 53 X, 38041 Grenoble Cedex.

Reçu le 24/7/78, révisé le 20/9/78, accepté le 28/9/78.

RÉSUMÉ

Afin d'étudier, en laboratoire, la génération des ondes internes par un coup de vent brusque, en tenant compte de l'influence de la rotation de la terre, les auteurs ont construit, sur la plaque tournante de l'Université de Grenoble, un canal de grandes dimensions, équipé actuellement d'une soufflerie, et susceptible de recevoir, dans l'avenir, un mécanisme de simulation de l'effet d'entraînement du vent. Après avoir décrit cette installation expérimentale et les instruments de mesure qui l'équipent, ils présentent une interprétation théorique des phénomènes obtenus. Celle-ci est basée sur les travaux de M. Crépon (1969). Étant en milieu tournant, dans un bassin fermé, on observe : 1) une variation du niveau moyen de l'interface, due aux circulations engendrées par le vent; 2) l'organisation d'une amphidromie de Kelvin, autour du nouveau niveau moyen d'équilibre de l'interface; 3) une onde d'inertie, liée au caractère impulsionnel du vent. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les prévisions théoriques, si elle montre bien la présence d'une onde de période légèrement inférieure à la période d'inertie, et qui se propage à partir des parois vers le centre du canal, fait également apparaître les limites d'une théorie qui ne prend pas en compte les singularités liées au caractère borné du bassin.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 1, 49-59.

ABSTRACT

The experimental study of wind generated internal waves

In a stratified ocean, oscillations of the thermocline with a period slightly lower than the inertial period may be observed. In order to study such waves, which are probably due to a suddenly imposed wind and for which the Coriolis effect is important, under laboratory conditions, the authors have built on the rotating platform of Grenoble University a large flume (8.0 × 2.0 × 0.6 m) at present equipped with a wind tunnel, but capable of receiving at some future date a mechanism for simulation of the driving effect of the wind. They first describe the experimental installation and the measuring instruments it supports. For this study, the most useful is the "interface follower", which takes the form of a conductivity meter in which a sonde is submitted to follow a layer of liquid of selected conductivity. The authors then submit a theoretical interpretation of the phenomena observed, mainly based on the work of M. Crépon (1969). As a rotating tank is involved, the following are observed: 1) variation in the mean level of the interface; 2) the superposition of two Poincaré-Kelvin waves (Poincaré-Kelvin amphidromie); 3) an internal wave, with a period lower than the inertial period and related to the impulsive character of the wind. The latter was detected by spectral analysis of a record comprising the difference between the experimental result and an approximation of the variation of the mean level of the interface means of Lagrange's polynomials. Comparison between the experimental results and the theoretical forecasts reveals the limits of a theory which, at present, does not take account of particularities due to the limited nature of the channel. It

follows from this dialogue between theory and experiment that analytical or numerical investigations are required for improved understanding and forecasting of the shape and phase of inertial waves generated by a suddenly imposed wind of the kind induced in the experiment.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 1, 49-59.

On a observé dans la nature, notamment en été, à la Bouée Laboratoire « Bohra II », en Méditerranée, des ondes internes de période voisine de la période d'inertie et de grande amplitude (Crépon *et al.*, 1972). Compte tenu des conditions météorologiques lors de ces mesures, il semble que celles-ci soient produites par une variation temporelle brusque du vent (vent impulsionnel). Parmi les nombreuses théories proposées pour rendre compte de ce phénomène, nous avons retenu et particulièrement étudié celle de M. Crépon (Crépon, 1969; Chabert d'Hières, D. Renouard, 1977) pour lequel ces perturbations naissent à la côte, discontinuité spatiale, et se propagent, à partir de celle-ci, vers le large. Il s'agirait donc d'ondes progressives. En fait, les observations *in situ* n'ont jamais permis, à notre connaissance, une mise en évidence claire du caractère progressif de ces ondes. Par ailleurs, on sait le coût élevé, et le caractère aléatoire des observations en mer. Aussi avons-nous construit, sur la grande plaque tournante de l'Université de Grenoble, un canal équipé d'une soufflerie et dans lequel nous avons, au cours de ces dernières années, étudié la génération des ondes internes par le vent, tout en restant maîtres des principaux paramètres : densité des couches d'eau douce et d'eau salée, vitesse du vent, vitesse de rotation du système tournant. Ce sont les premières conclusions de ce travail expérimental que nous nous proposons de présenter ici. Nous pensons que cette étude peut constituer un petit pas dans la connaissance de l'écosystème marin, notamment près des côtes, où ces ondes peuvent donner lieu à des remontées d'eau froide (upwellings) qui ne sont pas sans influence pour les questions de pêche ou de pollution côtières. Par ailleurs,

on sait l'importance d'une meilleure compréhension de ces ondes et de leur origine pour tout ce qui regarde la détermination de l'épaisseur de la couche de mélange océanique. On sait, en effet, que l'une des limitations des divers modèles proposés pour rendre compte de l'évolution de celle-ci dans le temps, provient de ce que les variations de la cote de la thermocline, du fait des ondes internes, peuvent être d'un ordre de grandeur égal ou supérieur, à celles dues aux seuls échanges thermiques ou mécaniques entre l'océan et l'atmosphère.

L'INSTALLATION EXPÉRIMENTALE

On trouvera par ailleurs (Chabert d'Hières, Renouard, 1976) une description détaillée de cet outil, aussi nous limiterons nous ici à une présentation succincte de cet appareil.

Se rapprocher, autant que cela était possible, des modèles théoriques de génération des ondes internes par un coup de vent brusque, et posséder ainsi un instrument de qualité pouvant servir à de nombreuses autres études, tels furent nos objectifs lorsque nous construisîmes notre installation expérimentale.

Nous avons donc construit un canal de 8,0 m de long, 2,0 m de large et 0,6 m de profondeur (fig. 1) les parois verticales étant en verre afin d'assurer une bonne visualisation des phénomènes étudiés. Ce canal est équipé :

- d'une soufflerie constituée de l'amont à l'aval, par un convergent d'entrée, muni de filtres et de nids d'abeilles

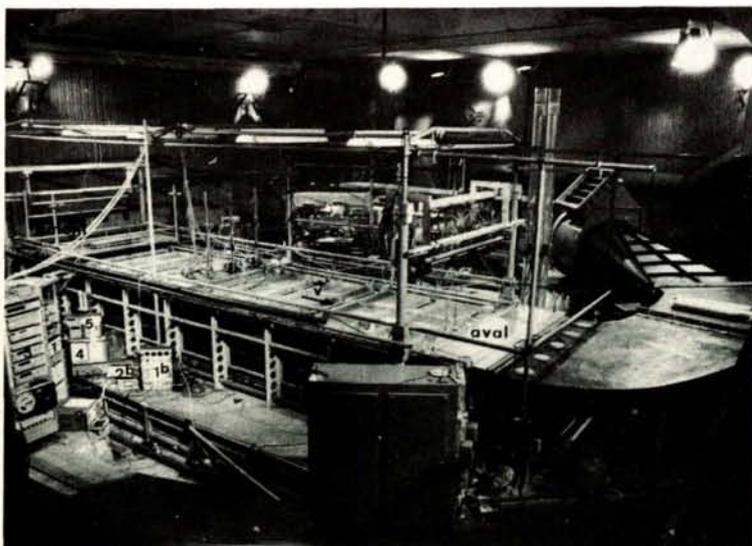


Figure 1

Photographie du canal équipé de la soufflerie sur la plaque tournante de l'Université de Grenoble. On remarquera, au centre du canal, les cinq suiveurs d'interface qui nous ont servi lors de nos essais et, au premier plan (1) et (1 b) l'électronique de ceux-ci, (2) et (2 b) les enregistreurs analogiques sur lesquels nous observons, au temps réel, le déroulement du phénomène, (3) la chaîne de traitement automatique des données avec le perforateur de bande, (4) l'enregistreur X-Y sur lequel nous traçons les « profils d'interface » (courbe profondeur-conductivité), (5) l'enregistreur des sondes de température. On a porté sur cette photographie le vocabulaire utilisé lors de nos essais et le sens du vent dans la soufflerie.

Photograph of the flume equipped with the wind-tunnel, on the rotating platform of Grenoble University. The five interface-followers used in these experiments may be observed in the middle of the flume, and, in the foreground: (1) and (1 b) the electronic equipment of these; (2) and (2 b) the analogical recorders on which the phenomena are observed in real time; (3) the digital recorder; (4) the X-Y recorder for which profiles of the interface may be obtained; (5) the temperature recorder. The vocabulary used and the direction of the wind in the wind-tunnel are indicated on the photograph.

qui régularisent l'écoulement, une veine d'essai ($8,0 \times 2,40 \times 0,2$ m) légèrement plus large que la veine de liquide afin d'éviter les effets de bords, une vanne pour l'ouverture et la fermeture rapide du circuit d'air, des volets qui permettent une égale répartition du débit dans la veine d'air, ces derniers étant placés à l'entrée du conduit de raccordement canal-ventilateur, enfin un ventilateur et une vanne de réglage du débit;

- d'un « faux-fond », déformable, qui permet de compenser les effets de la force centrifuge, et qui est réglable en hauteur, nous pouvons donc faire varier la profondeur utile de liquide;

- d'un chariot qui permet à l'expérimentateur d'accéder aisément à n'importe quel point du canal, et de déplacer, régler et contrôler commodément les instruments de mesure, lesquels sont sur un chariot indépendant.

Le canal et la soufflerie sont implantés sur la grande plaque tournante de l'Université de Grenoble, plaque qui supporte déjà le modèle réduit de la Manche, et dont on connaît par ailleurs les caractéristiques remarquables (Chabert d'Hières, 1962).

LES INSTRUMENTS DE MESURE

Nous explorons le champ de vent, dans la veine d'essai d'air, au moyen de tubes de Prandtl, branchés sur un manomètre de haute précision. Dans l'avenir, il sera possible d'apprécier la turbulence dans la veine d'air au moyen d'anémomètres à fils chauds.

Les vitesses dans l'eau sont très faibles, de l'ordre du centimètre par seconde, aussi ne pouvons-nous les mesurer avec des micromoulinets. Nous utilisons des capteurs à films chauds. Il n'est pas impossible que nous soyons conduits à mesurer les deux composantes de la vitesse horizontale et leurs fluctuations au moyen d'un vélocimètre à laser.

Les surélévations de l'interface, en fonction du temps, et en un point donné, peuvent être enregistrées grâce à des suiveurs d'interface (fig. 2). On trouvera par ailleurs (Chabert d'Hières, Suberville, 1974) le principe de fonctionnement et les caractéristiques tout à fait remarquables de ces résistivimètres asservis à poursuivre une couche de conductivité donnée, c'est-à-dire de densité donnée. Le signal obtenu est converti soit en enregistrement analogique, ce qui permet de visualiser en temps réel le phénomène et de vérifier le bon fonctionnement des appareils, soit en enregistrements digitaux, la digitalisation et la mise sur bande perforée étant alors effectuées par une chaîne de « traitement automatique des données ». Nous disposons, lors des essais les plus récents, de cinq suiveurs d'interface, la

durée des essais en était donc considérablement raccourcie, et surtout nous avons pu explorer le canal suivant cinq lignes longitudinales, ce qui nous a permis de tracer des « cartes » de l'interface en différents instants après le début du coup de vent.

Ces conductivimètres peuvent être utilisés non plus pour poursuivre une couche donnée, mais pour mesurer la conductivité à une cote donnée. On peut donc tracer grâce à eux des courbes résistivité-profondeur, c'est-à-dire réaliser des explorations de l'interface. On dispose ainsi, au cours d'un essai, d'un moyen de contrôle.

Enfin, douze sondes de température permettent de suivre l'évolution de chaque couche de liquide. On connaît la densité exacte de chacune d'elles au début de l'expérience puisque l'on effectue un prélèvement de liquide dans chacune d'elles au début de l'expérience et que l'on mesure la densité au moyen d'un densimètre de précision.

LE CHAMP DE VENT

Pour reproduire au mieux les hypothèses théoriques, nous devons réaliser, en tout point de la surface libre, une force de frottement impulsionnelle dans le temps, constante ensuite, d'intensité et de direction également constantes, uniforme, avec un gradient de pression aussi faible que possible.

Nous avons tout d'abord vérifié que, dans la veine d'essai d'air, on obtient effectivement un vent quasi impulsionnel dans le temps, en ce sens que, en tout point du canal, le régime d'équilibre du vent est obtenu en moins de 1,2 seconde, c'est-à-dire en un temps inférieur à toutes les périodes caractéristiques du canal, en particulier inférieur à la période propre barotrope longitudinale, égale à 7 secondes lors de nos essais. Et ce vent est, en tout point, constant dans le temps, à 1 % près en intensité et à quelques degrés près en direction.

Si l'on porte son attention sur la distribution horizontale du vent dans une section, on constate (fig. 3) que celle-ci est symétrique par rapport à l'axe longitudinal du canal,

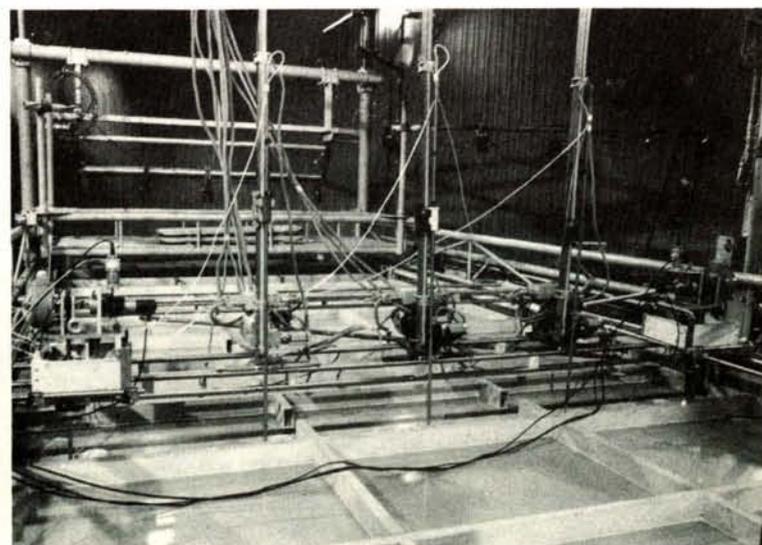


Figure 2

Vue d'ensemble des cinq suiveurs d'interface. On notera la différence entre les deux modèles ici représentés, les plus anciens étant situés le plus près des parois du canal. Les nouveaux suiveurs ont un support de sonde beaucoup plus long, qui est mieux adapté aux expériences dans ce canal.

General view of the five interface-followers. Differences between the two models shown here may be noted: the earlier ones being near the inner sides of the channel.

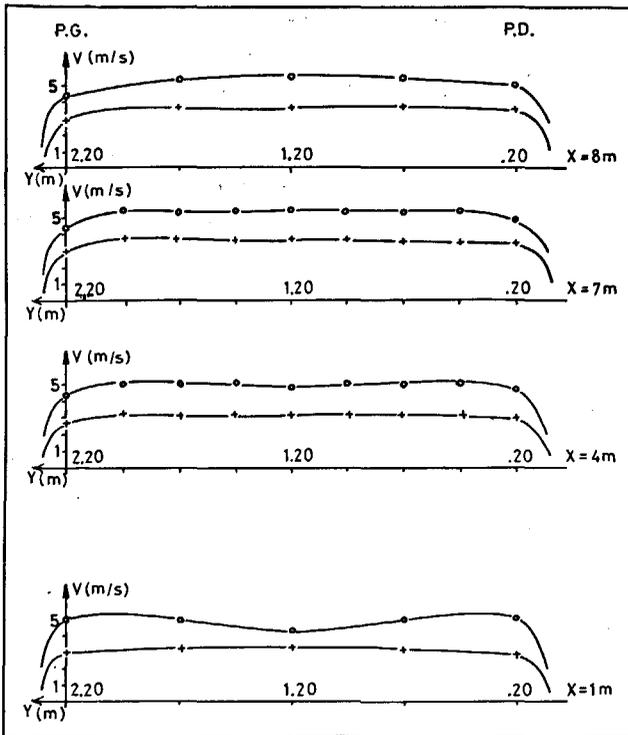


Figure 3

Profils transversaux du vent, en différentes sections du canal (de haut en bas $x=8$ m – aval de la section d'essais – 7 m, 4 m – milieu du canal – et 1 m) pour deux ouvertures différentes du ventilateur. Par convention on note : PG, paroi gauche du canal pour un observateur placé à l'entrée de la soufflerie amont de la veine d'essai (fig. 1) et regardant dans le sens de l'écoulement de l'air et PD, paroi droite, les abscisses (x) étant comptées à partir de l'extrémité amont, les ordonnées (y) à partir de la paroi droite.

Ces profils ont été mesurés à $h=10$ cm au-dessus du niveau de l'eau dans le canal, c'est-à-dire à mi-épaisseur de la veine d'essai d'air, la plaque étant en rotation ($T_{rot}=50,4$ secondes).

Transversal profiles of the wind in different sections of the channel (from top to bottom ($x=8$ m) – down-stream – 7 m, 4 m – middle of the flume – and 1 m) for two different apertures of the fan: PG, left side of the channel for an observer placed at the entrance of the wind-tunnel upstream of the test-flume (fig. 1) and looking in direction of the air-flow; and PD, right side of the channel; the absciss (x) are counted from the upstream section, and the ordinates from the right side.

These profiles were measured at $h=10$ cm above the free surface of the water, i. e. at half-thickness of the air-vein, the platform being in rotation ($T_{rot}=50.4$ secondes).

dessus de la paroi droite, du centre et de la paroi gauche du canal, on vérifie qu'ils sont réguliers, mais présentent toutefois une légère sur vitesse près du toit. Si l'on compare ces profils avec ceux que l'on observe à l'entrée du canal, on peut supposer que cette sur vitesse est liée à la différence de rugosité entre le toit (lisse) et la surface libre (agitée par des vaguelettes).

De cette analyse rapide du champ de vent, on peut conclure qu'il y a, le long du canal, une légère variation du frottement exercée par le vent à la surface libre. Par suite, dans nos essais, les hypothèses de la théorie ne sont pas totalement vérifiées.

Dans ces conditions, il est d'autant plus remarquable que certaines des conclusions prévues par la théorie se retrouvent effectivement lors de nos expériences. Toutefois, afin d'assurer une meilleure uniformité des conditions limites le long de la surface libre, nous envisageons, pour un avenir relativement proche, de mettre en place un dispositif mécanique de simulation de l'effet d'entraînement du vent.

INTERPRÉTATION THÉORIQUE DES PHÉNOMÈNES OBSERVÉS

Les équations de l'hydrodynamique marine, dans l'hypothèse des ondes longues et pour un océan dont le fond est constant, conduisent à l'équation de propagation

à 1 ou 2 % près. Comme le plafond de la veine est horizontal, cet écart est sans doute dû à l'effet de rotation de la plaque. Quant au léger déficit de vitesse au centre du canal, à l'amont de celui-ci, nous l'attribuons à un défaut d'entonnement de la soufflerie : on ne guide pas suffisamment les filets d'air à l'entrée du canal et on a donc un effet d'orifice à la Borda.

Par contre, on note une variation de la vitesse moyenne du vent suivant une section, entre l'amont et l'aval du canal. Comme les entrées d'air parasites le long de la soufflerie sont pratiquement négligeables, nous faisons l'hypothèse que cette variation de vitesse est liée à une variation du coefficient de frottement à la surface libre. Cette hypothèse semble justifiée du fait des différences d'amplitude des vaguelettes entre l'amont, où ce sont des rides de l'ordre de quelques millimètres de haut, et l'aval du canal où elles peuvent avoir jusqu'à 3 ou 4 cm, dans nos conditions expérimentales.

Si l'on considère maintenant (fig. 4) au centre de la soufflerie, les profils verticaux des vitesses du vent, au-

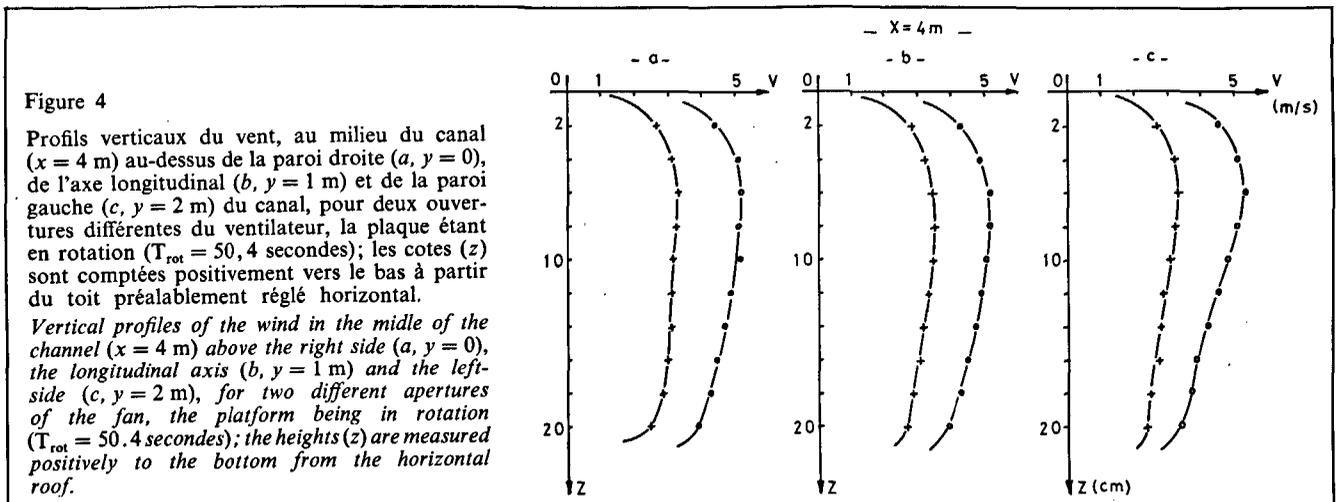


Figure 4

Profils verticaux du vent, au milieu du canal ($x=4$ m) au-dessus de la paroi droite ($a, y=0$), de l'axe longitudinal ($b, y=1$ m) et de la paroi gauche ($c, y=2$ m) du canal, pour deux ouvertures différentes du ventilateur, la plaque étant en rotation ($T_{rot}=50,4$ secondes); les cotes (z) sont comptées positivement vers le bas à partir du toit préalablement réglé horizontal.

Vertical profiles of the wind in the middle of the channel ($x=4$ m) above the right side ($a, y=0$), the longitudinal axis ($b, y=1$ m) and the left-side ($c, y=2$ m), for two different apertures of the fan, the platform being in rotation ($T_{rot}=50.4$ secondes); the heights (z) are measured positively to the bottom from the horizontal roof.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_1 \right)^2 + f^2 \right] \varphi_1 \\ & - gh_1 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} + v_1 \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi_1 \\ & - \frac{g}{\rho_1} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_1 \right) \left(\frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} \right) \right. \\ & \quad \left. + f \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) \right] = 0, \quad (1) \end{aligned}$$

en liquide homogène, ou :

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_1 \right)^2 + f^2 \right] (\varphi_1 - \varphi_2) \\ & - \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) gh_1 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} + v_1 \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi_1 \\ & - \frac{g}{\rho_1} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_1 \right) \left(\frac{\partial \tau_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} \right) \right. \\ & \quad \left. + f \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right) \right] = 0, \quad (2) \\ & \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\left(\frac{\partial}{\partial t} + v_2 \right)^2 + f^2 \right] \left(\varphi_2 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \varphi_1 \right) \\ & - \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) gh_2 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} + v_2 \right) \\ & \quad \times \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \varphi_2 = 0, \end{aligned} \right\}$$

dans le cas d'un océan à deux couches avec v_1 , v_2 , coefficient de frottement, respectivement dans les couches supérieure et inférieure (on a posé, par hypothèse, que le frottement était proportionnel au transport de masse dans chaque couche); f , paramètre de Coriolis; g , accélération de la pesanteur; h_1 , h_2 , épaisseur des couches supérieure et inférieure, respectivement; (τ_x, τ_y) , frottement du vent à la surface libre; φ_1 , φ_2 , fonctions potentielles, définies par

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -g \zeta_1; \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -g \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \zeta_2 - g \frac{\rho_1}{\rho_2} \zeta_1,$$

ζ_1 et ζ_2 étant les surélévations de la surface libre et de l'interface. Le problème consiste donc à se donner $\vec{\tau}(\tau_x, \tau_y)$ ainsi que les conditions aux frontières — dans notre cas le transport de masse doit être nul le long des frontières solides — et à déterminer φ_1 et φ_2 , on en déduit alors ζ_1 et ζ_2 . En fait, pour résoudre ce problème, on est amené à effectuer la transformation de Laplace par rapport au temps, et à chercher la solution dans le plan de cette transformation. La difficulté est alors d'inverser les transformées de Laplace. C'est ce dernier point qui soulève de grandes difficultés dans le traitement de cas concrets.

Ces équations régissent, au premier ordre, ce qui a lieu dans le canal lorsque le vent souffle.

Expérimentalement, on constate la superposition de nombreux phénomènes. Par exemple, en un point donné, au centre du canal ($x=4$ m) et à 25 cm de la paroi droite (PD, $y=0,25$ m), à partir du repos, on observe tout d'abord une variation du niveau moyen de l'interface (ζ_{NM}) due aux courants de recirculation engendrés par le

vent dans ce bassin fermé. On peut proposer, en liquide homogène, et donc pour la surface libre, la loi de variation suivante, en fonction du temps et de l'espace :

$$\begin{aligned} \zeta_{NM} &= \frac{A_1}{r} [S h r t - C h r t + 1] \\ & \times \left\{ \text{Sh} \frac{p}{c \sqrt{2}} \left[\left(x - \frac{a}{2} \right) + \left(y - \frac{b}{2} \right) \right] \right\}, \quad (3) \end{aligned}$$

où a et b sont les dimensions du canal; $c = \sqrt{gh}$, la vitesse de propagation de l'onde barotrope; A_1 , p et r (tels que $r^2 = p^2 - f^2$) des constantes d'intégration; formule qui satisfait l'équation (1) — sans second membre — et semble pouvoir rendre compte des observations expérimentales, selon lesquelles cette variation du niveau moyen tend vers une limite lorsque le temps croît, et change effectivement de signe de part et d'autre de la ligne $(x - (a/2)) + (y - (b/2)) = 0$. Toutefois la détermination des constantes, à partir des données expérimentales, s'avère délicate.

On observe aussi une oscillation périodique, de grande période. Il s'agit d'une amphidromie qui s'organise non autour d'un plan moyen horizontal, mais autour d'une surface gauche, et ce du fait de la variation du niveau moyen dont il vient d'être question. Nous nous proposons de l'appeler « pseudo-amphidromie » dans la suite du texte. Elle a une période égale à la période propre barocline longitudinale, qui était comprise entre 110 et 130 secondes lors de nos essais, et une amplitude qui est de l'ordre du centimètre près des parois du canal.

On peut d'ailleurs noter que la forme générale de l'amphidromie de Kelvin, en liquide homogène, soit

$$\zeta_{PA} = A_2 \exp[i(\theta t - kx)] \exp \left[-2 \frac{\omega}{\theta} ky \right], \quad (4)$$

avec $\theta^2 = k^2 c^2$, A_2 étant une constante, vérifie l'équation (1) — sans second membre — si $\omega = f/2$.

Se superposant à ces deux derniers phénomènes, mais non décelable sans une analyse plus fine, on doit trouver l'onde d'inertie liée au caractère impulsif du vent. C'est du moins la conclusion à laquelle nous étions parvenus en appliquant les hypothèses et la méthode de Crépon (1969) au cas du vent soufflant sur un océan rectangulaire (Chabert d'Hières, Renouard, 1977). En fluide homogène, nous avons trouvé

$$\begin{aligned} \zeta_I &= \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left\{ -\frac{16}{\pi} \frac{\tau}{\rho} \left[\frac{1}{a} - \frac{1}{2m+1} \frac{1 - \cos \beta t}{\beta^2} \right. \right. \\ & \quad \times \cos(2n+1) \frac{\pi x}{a} \sin(2m+1) \frac{\pi y}{b} \\ & \quad \left. + \frac{1}{b} \frac{1}{2n+1} \frac{f}{\beta^2} \left(t - \frac{1}{\beta} \sin \beta t \right) \right. \\ & \quad \left. \times \sin(2n+1) \frac{\pi x}{a} \cos(2m+1) \frac{\pi y}{b} \right\}, \quad (5) \end{aligned}$$

avec

$$\beta^2 = f^2 + c^2 \left[\frac{\pi^2}{a^2} (2n+1)^2 + \frac{\pi^2}{b^2} (2m+1)^2 \right]$$

et $c = \sqrt{gh}$.

Cette dernière formule, qui satisfait l'équation (1) ne permet de vérifier les conditions aux limites que sur une partie seulement de la frontière, plus explicitement, elle ne conduit à un transport de masse nul que le long des parois parallèles à la direction du vent. Elle est donc incorrecte, nous la considérerons cependant comme une première approximation de la forme de l'onde recherchée.

On notera que la solution que nous proposons a une période inférieure à la période d'inertie. Cette caractéristique remarquable est d'ailleurs commune à toutes les solutions trouvées par cette méthode (Crépon, 1969).

ANALYSE SPECTRALE DU SIGNAL

Ainsi que nous l'avons noté plus haut, nous ne connaissons pas la loi de variation du niveau moyen en fonction du temps, et la formule (3), si elle rend compte, globalement, des observations, est d'une utilisation fort lourde puisque les coefficients sont à déterminer pour chaque expérience.

Or, il est indispensable de retrancher du signal de la surélévation de l'interface en fonction du temps, en un point donné, cette variation du niveau moyen car l'analyse spectrale d'un signal pour lequel celle-ci ne serait pas nulle, conduit à des résultats aberrants.

Nous avons donc opté pour une méthode automatique de traitement des données. A partir de l'enregistrement numérique obtenu, nous effectuons des moyennes par

blocs — généralement ceux-ci comprennent entre 250 et 300 valeurs — et, par une ligne brisée, nous visualisons la courbe moyenne ainsi obtenue (fig. 5 a). Le système de calcul permettant plusieurs essais, nous choisissons celui qui permet d'obtenir la courbe moyenne la plus satisfaisante. Nous faisons alors l'hypothèse que la variation du niveau moyen passe par ces points, et qu'elle peut être approchée par un polynôme de Lagrange calculé à partir de ceux-ci. Nous retranchons alors, point par point, la cote de cette approximation du niveau moyen de la valeur expérimentale. Nous obtenons un signal résiduel dont nous nous assurons qu'il est bien périodique dans le temps et ne présente plus de variation de niveau moyen (fig. 5 b). Pour ce faire, on réitère la moyenne par blocs précédemment décrite, et on vérifie que les points obtenus sont sur l'axe des temps. La série d'opérations ci-dessus est refaite jusqu'à ce que ce résultat soit obtenu. Et c'est sur un tel signal résiduel que nous pouvons alors effectuer l'analyse spectrale.

Sur les spectres ainsi obtenus, on observe, tout d'abord, les pics d'énergie correspondant à la période propre barocline longitudinale, ainsi qu'à la période propre barotrope longitudinale. En général, les harmoniques de ces deux périodes, ainsi que les périodes barotrope ou barocline transversales n'apparaissent pas. Par contre, on constate la présence d'une turbulence importante sur la plupart des enregistrements.

Mais, et c'est là le point nouveau mis en évidence par ces essais : l'analyse spectrale du signal résiduel fait clairement apparaître un pic d'énergie pour une période légèrement inférieure à la période d'inertie, et ce pour

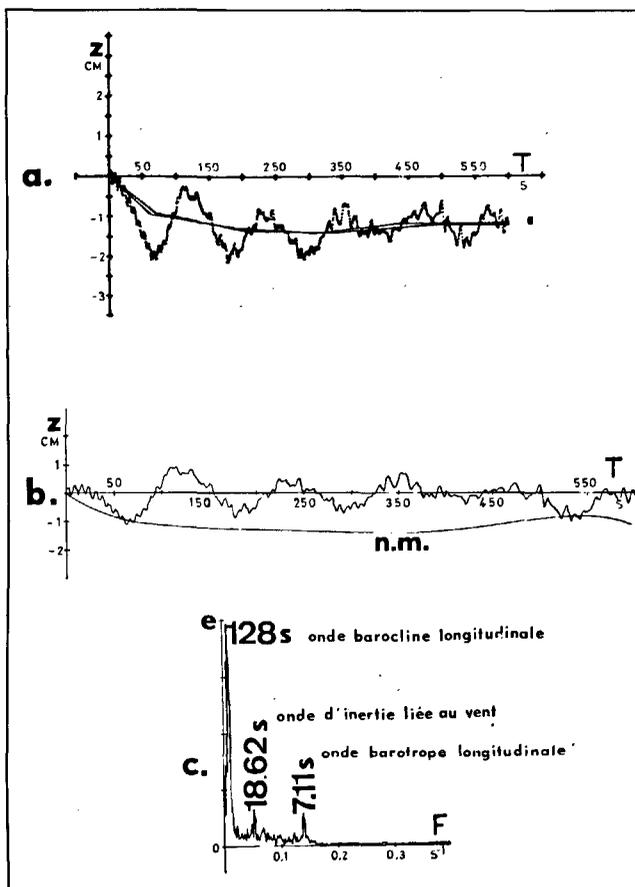


Figure 5

a) Reproduction analogique de la surélévation de l'interface, au centre du canal ($x = 4$ m), à 25 cm de la paroi droite (PD, $y = 0.25$), les mouvements partant du repos, la plaque étant en rotation ($T_{rot} = 40,0$ secondes). Sur cet enregistrement, on a porté deux essais de détermination de la courbe moyenne, correspondant à des blocs de (1) 250 et (2) 275 points respectivement.

b) 1) Courbe représentative de la variation du niveau moyen de l'interface. 2) Signal résiduel, résultant de la soustraction, point par point, de la cote du niveau moyen approché au moyen d'un polynôme de Lagrange passant par les points choisis empiriquement — dans ce cas particulier ceux correspondant à la ligne (2) de la figure 5 a — à la valeur expérimentale vraie.

c) Spectre obtenu par l'analyse, par la « Fast Fourier Transform », sur 1 024 points, du signal résiduel. On voit nettement apparaître les pics correspondant à l'onde barocline longitudinale, à l'onde d'inertie liée au caractère impulsionnel du vent, et à l'onde barotrope longitudinale.

a) Analogical reproduction of interface height variation with time in the middle of the channel ($x = 4$ m), at 25 cm from the right side (PD, $y = 0.25$ m); the movements start from rest, the platform is in rotation ($T_{rot} = 40.0$ seconds). This reproduction includes two tests of determination of the mean curve, with blocs of (1) 250 and (2) 275 points respectively.

b) 1) Variation curve of the mean level of the interface. 2) Residual signal resulting from subtraction, point after point, of the height of the mean level — cf. b (1) — from the true experimental height — cf. a —.

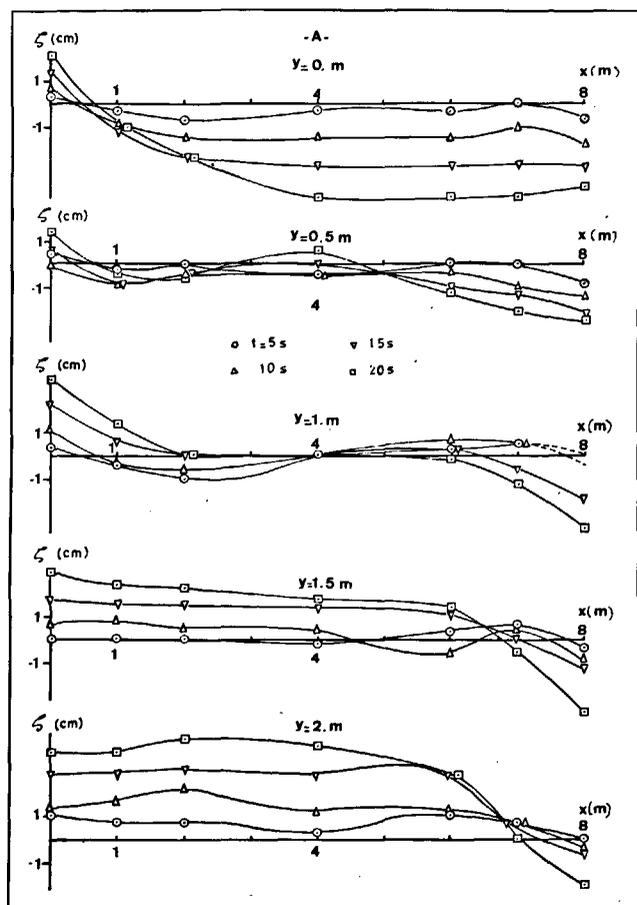
c) Frequency spectrum, obtained by the Fast Fourier Transform on 1024 points, of the residual signal. Peaks corresponding to the longitudinal baroclinic wave, to the inertial wave due to the suddenly applied wind, and to the longitudinal barotropic wave may be clearly observed.

tous les essais. On se souvient, en effet, que c'était là une caractéristique notable du résultat théorique, et nous avons vérifié que ce n'est pas la déformation, d'ailleurs extrêmement faible, de la plaque au cours d'une rotation qui engendre cette oscillation d'inertie, elle ne peut donc trouver son origine que dans le caractère impulsif du vent (discontinuité temporelle) et la présence des parois (discontinuités spatiales).

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Nous nous proposons maintenant de présenter, globalement, le phénomène tel qu'il se passe dans le canal équipé de la soufflerie, lors des premiers instants après le début du coup de vent. Pour des raisons de commodité, nous raisonnerons, dans la suite de cet exposé, sur des

Figure 6
 Surélévations de l'interface, suivant cinq lignes longitudinales, en différents instants après le début du coup de vent.
 Lors de cet essai $h_1=h_2=26$ cm; $\rho_1=0,9987$; $\rho_2=1,0168$; $v=4,68$ m/s; $f=0,24933$ s⁻¹ ($T_{rot}=50,4$ secondes), soit un rayon de déformation $R_D=0,60$ m.
 On notera que, près des parois du canal ($y=0$ et $y=2$ m) les surélévations sont, immédiatement après le début du coup de vent, identiques sur les trois-quarts de la longueur du canal.
Interface height variation, along five longitudinal lines, at different times after the beginning of the wind.
In this experiment $h_1=h_2=26$ cm; $\rho_1=0,9987$; $\rho_2=1,0168$; $v=4,68$ m/s; $f=0,24933$ s⁻¹ ($T_{rot}=50,4$ secondes), the internal radius of deformation $R_D=0,60$ m.
It may be noted that immediately after the beginning of the wind, interface heights near the sides of the channel ($y=0$ and 2 m) are identical for three quarters of the length of the channel.

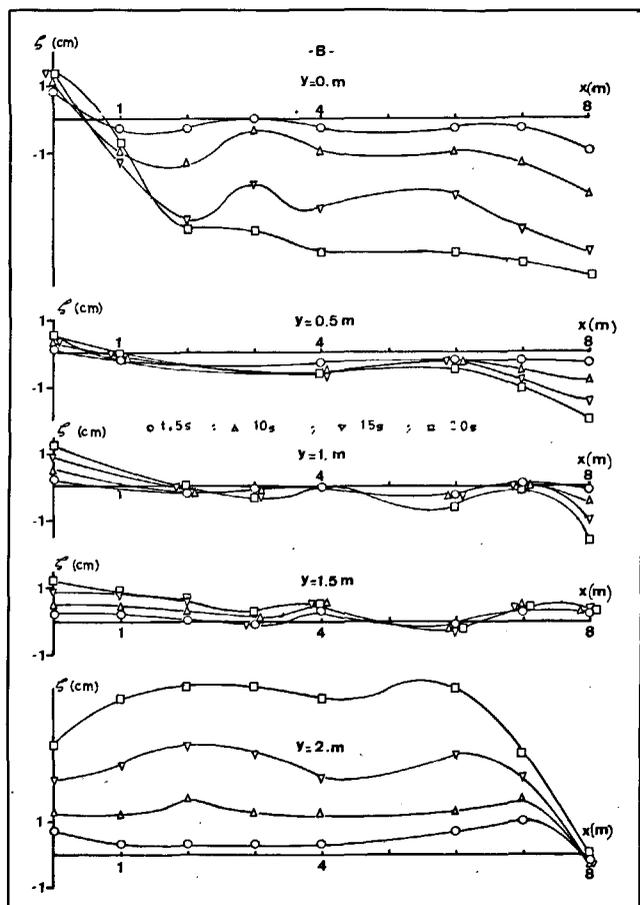


enregistrements préalablement lissés (ce qui correspond à un filtrage de la turbulence et de l'onde barotrope longitudinale). Les conditions expérimentales seront précisées sur les légendes de chaque figure.

Si nous explorons l'interface, suivant cinq lignes longitudinales, en différents instants après le début du coup de vent (fig. 6 et 7), on constate que, le long des parois longitudinales, et sur les trois quarts de celles-ci, environ, les surélévations, durant les 20 premières secondes, sont identiques. Ceci semble confirmer alors que l'onde d'inertie recherchée naît le long de chacune des parois, l'oscillation propre barocline longitudinale (pseudo-amphidromie) apparaissant d'abord près des seules parois d'extrémité et se propage, à partir de celles-ci, vers le centre du canal. Cette dernière est organisée au bout de 60 secondes environ après le début du coup de vent.

Si, à partir des mêmes données, on trace les lignes de niveau de l'interface, en différents instants après le début du coup de vent, réalisant ainsi une « topographie » de l'interface, on peut comparer ces courbes avec les

Figure 7
 Surélévations de l'interface, suivant cinq lignes longitudinales, en différents instants après le début du coup de vent.
 Lors de cet essai $h_1=h_2=13$ cm; $\rho_1=0,9985$; $\rho_2=1,0111$; $v=4,47$ m/s; $f=0,24933$ s⁻¹ ($T_{rot}=50,4$ secondes), soit un rayon de déformation $R_D=0,35$ m.
Interface height variation along five longitudinal lines, at different times after the beginning of the wind.
In this experiment $h_1=h_2=13$ cm; $\rho_1=0,9985$; $\rho_2=1,0111$; $v=4,47$ m/s; $f=0,24933$ s⁻¹ ($T_{rot}=50,4$ secondes), the internal radius of deformation $R_D=0,35$ m.



surélévations obtenues par la théorie linéaire. On constate (fig. 8, 9 et 10) que si, immédiatement après le début du phénomène, certaines caractéristiques de ces deux familles de courbes sont semblables, en particulier pour la partie amont du canal, la ligne correspondant à $\zeta=0$, au temps $t=5$ secondes, on voit apparaître très rapidement des divergences notables. Le fait que la théorie ne permette pas de satisfaire la condition de débit nul à travers l'ensemble des parois latérales doit être responsable de celles-ci. Par ailleurs, on voit, très rapidement, s'organiser la pseudo-amphidromie de Kelvin, les lignes d'égale surélévation présentant alors un aspect remarquablement régulier. On notera que l'allure générale de ces courbes, pour une même vitesse de rotation, ne dépend pas de la profondeur totale.

On obtient les mêmes conclusions si, à vitesse de rotation de la plaque, profondeur totale et vent identiques, on fait varier les épaisseurs des couches d'eau douce et d'eau salée (fig. 11 a et b).

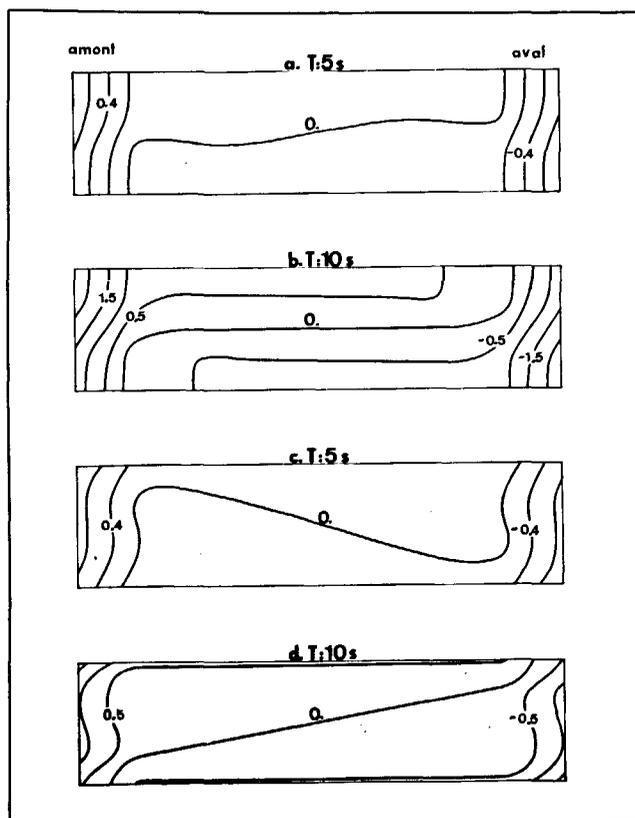


Figure 8
Lignes de niveau théoriques a et b, pour les conditions expérimentales de la figure 6, c et d pour celles de la figure 7, aux instants $t=5$ secondes et $t=10$ secondes après le début du coup de vent.
Theoretical level-lines of the interface a and b for the experimental conditions of Fig. 6, c and d for those of Fig. 7 at times $t=5$ secondes and $t=10$ secondes after the beginning of the wind.

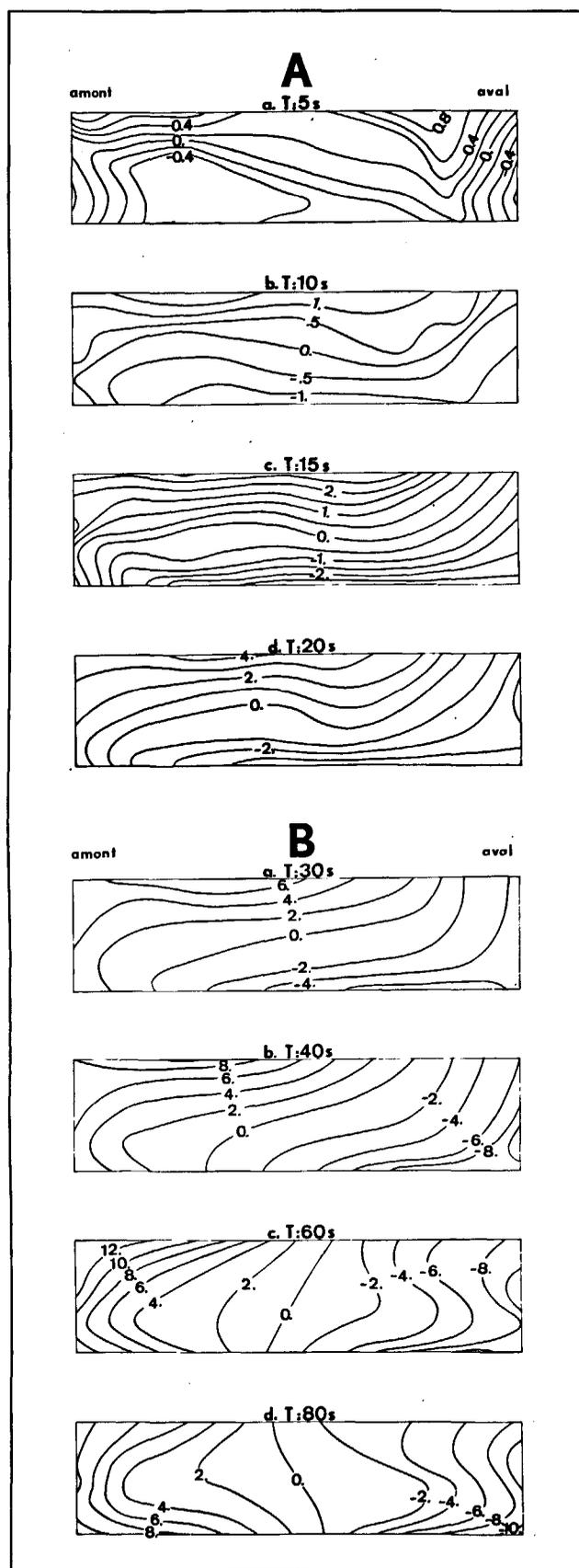


Figure 9 a et b
Lignes de niveau réelles, en différents instants après le début du coup de vent. Les conditions expérimentales sont celles de la figure 6 (les cotes sont exprimées en centimètres).
Real level-lines of the interface at different times after the beginning of the wind. The experimental conditions are identical with those in Figure 6 (heights are in centimetres).

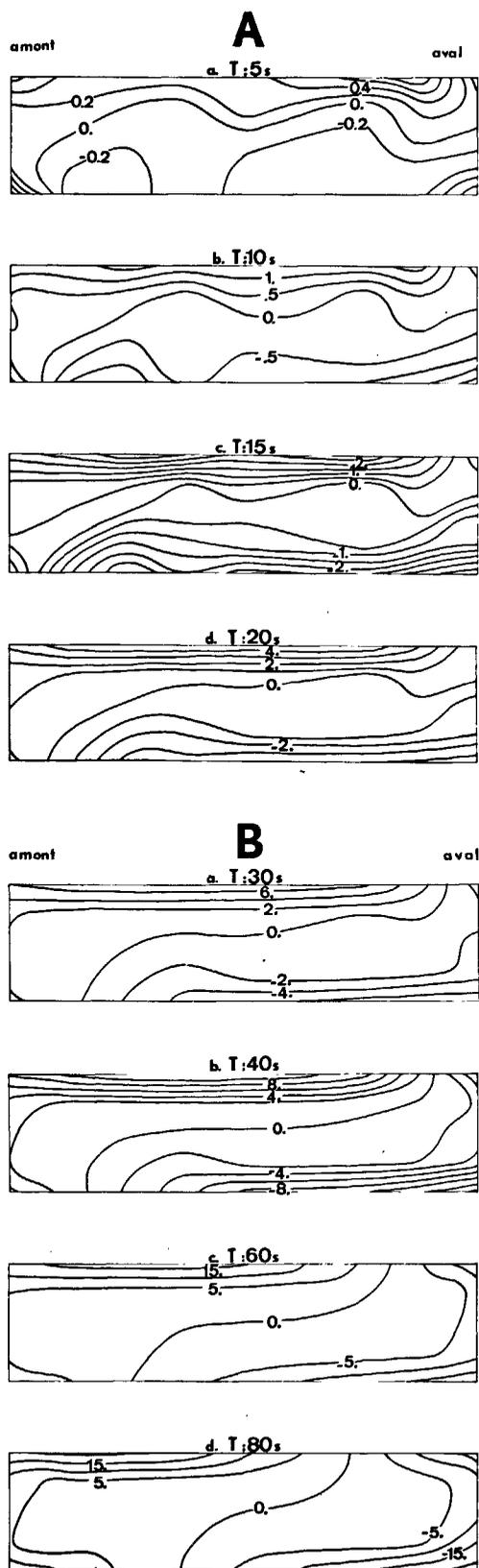


Figure 10 a et b

Lignes de niveau réelles, en différents instants après le début du coup de vent. Les conditions expérimentales sont celles de la figure 7 (les cotes sont exprimées en centimètres).

Real level-lines of the interface at different times after the beginning of the wind. The experimental conditions are identical with those in Figure 7 (heights are in centimetres).

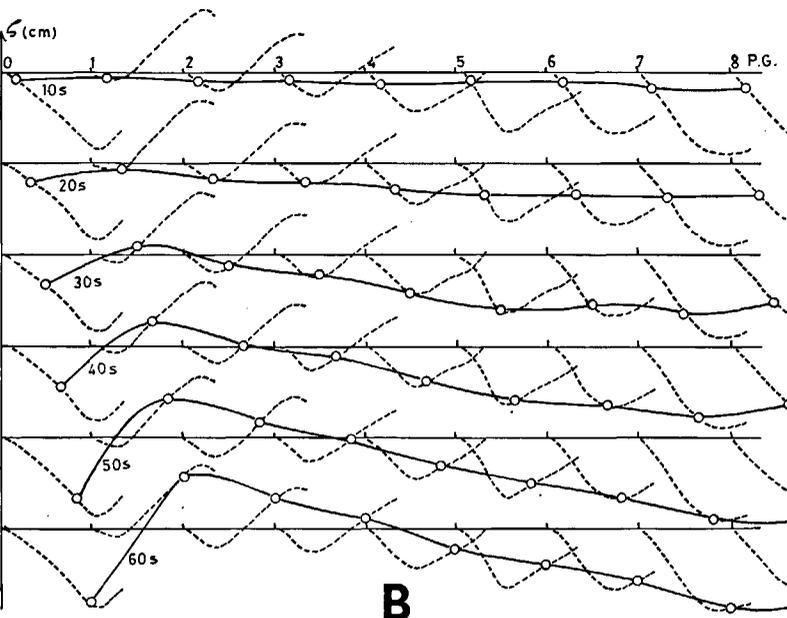
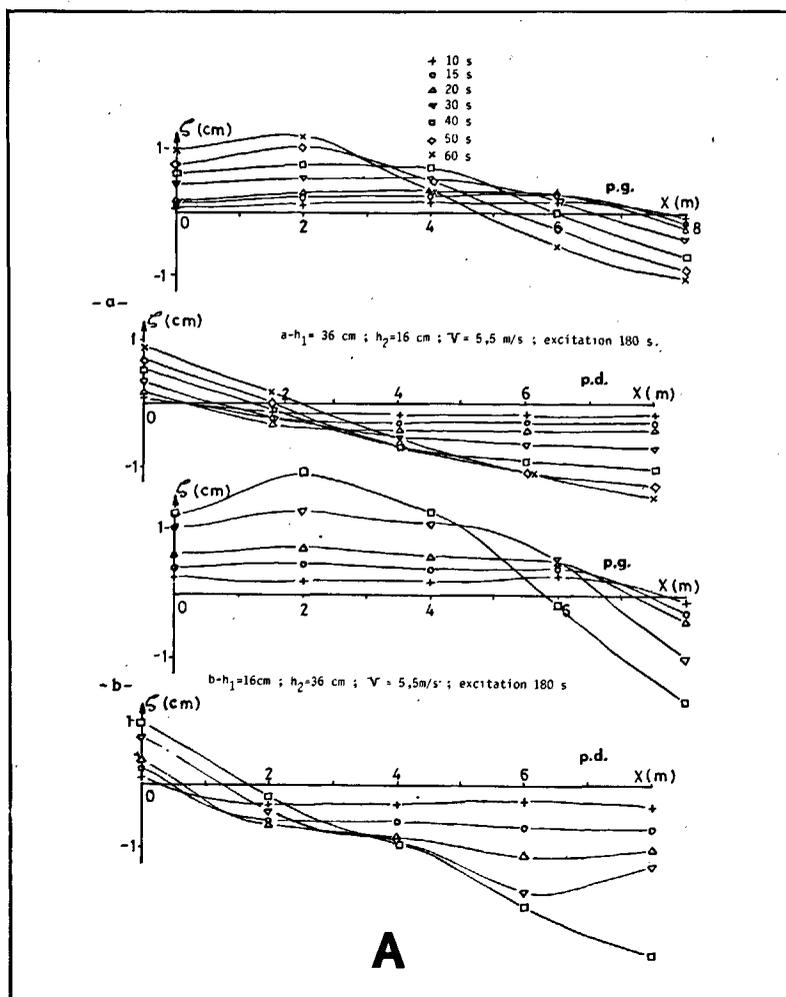


Figure 11 a et b

Surélévations de l'interface, le long des parois longitudinales du canal, en différents instants après le début du coup de vent.

a) $h_1 = 36 \text{ cm}$; $h_2 = 16 \text{ cm}$; $v = 5,5 \text{ m/s}$; $f = 0,24933 \text{ s}^{-1}$ ($T_{\text{rot}} = 50,4 \text{ secondes}$).

b) $h_1 = 16 \text{ cm}$; $h_2 = 36 \text{ cm}$; $v = 5,5 \text{ m/s}$; $f = 0,24933 \text{ s}^{-1}$ ($T_{\text{rot}} = 50,4 \text{ secondes}$).

Interface height variation along the longitudinal sides of the channel, at different times after the beginning of the wind.

a) $h_1 = 36 \text{ cm}$; $h_2 = 16 \text{ cm}$; $v = 5,5 \text{ m/s}$; $f = 0,24933 \text{ s}^{-1}$ ($T_{\text{rot}} = 50,4 \text{ secondes}$).

b) $h_1 = 16 \text{ cm}$; $h_2 = 36 \text{ cm}$; $v = 5,5 \text{ m/s}$; $f = 0,24933 \text{ s}^{-1}$ ($T_{\text{rot}} = 50,4 \text{ secondes}$).

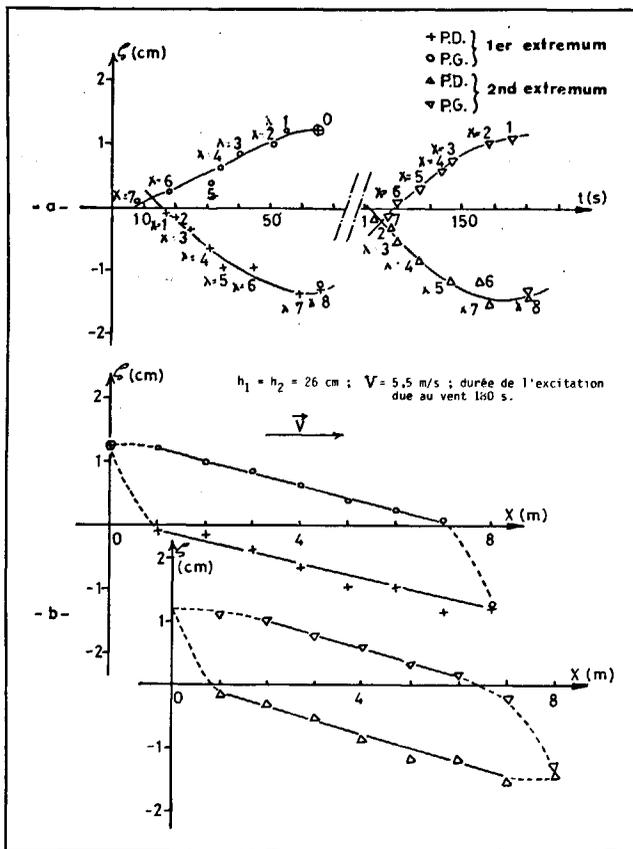


Figure 12 a et b

Lieu des deux premiers extremums, de même signe, de la surélévation de l'interface, en fonction du temps et de l'abscisse (a), ou de l'abscisse seule (b). On remarquera, pour la figure 12 a, que les parties linéaires de ces lieux (entre $x=3$ et 7 m pour la paroi gauche; $x=1$ et 5 m pour la paroi droite) ont la même pente ($|\partial z/\partial x|=0.44$) et de signe opposé. Dans cette expérience $h_1=h_2=26$ cm; $\rho_1=0.9987$; $\rho_2=1.0115$; $v=5.5$ m/s, $f=0.24933$ s $^{-1}$ ($T_{rot}=50.4$ secondes).

Loci of the two first extremum of same sign of the interface height variation with time and absciss (a) or with absciss only (b). It may be noticed in figure 12 a, that the linear part of these loci (between $x=3$ and 7 m for the left side, $w=1$ and 5 m for the right side) have the same slope ($|\partial z/\partial x|=0.44$) and opposed signs. In this experiment $h_1=h_2=26$ cm; $\rho_1=0.9987$; $\rho_2=1.0115$; $v=5.5$ m/s; $f=0.24933$ s $^{-1}$ ($T_{rot}=50.4$ secondes).

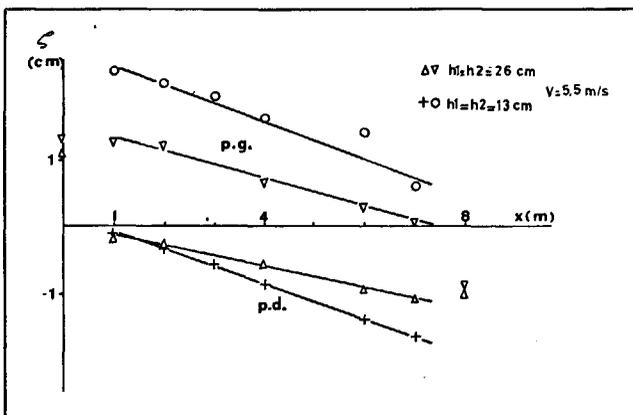


Figure 13

Lieux du premier extremum après le début du coup de vent, le long des parois latérales, lorsque (1) $h_1=h_2=26$ cm; $\rho_1=0.9987$; $\rho_2=1.0168$; $v=4.68$ m/s et (2) $h_1=h_2=13$ cm; $\rho_1=0.9985$; $\rho_2=1.0111$; $v=4.47$ m/s.

Loci of the first extremum after the beginning of the wind, along the two longitudinal sides, when (1) $h_1=h_2=26$ cm; $\rho_1=0.9987$; $\rho_2=1.0168$; $v=4.68$ m/s and (2) $h_1=h_2=13$ cm; $\rho_1=0.9985$; $\rho_2=1.0111$; $v=4.47$ m/s.

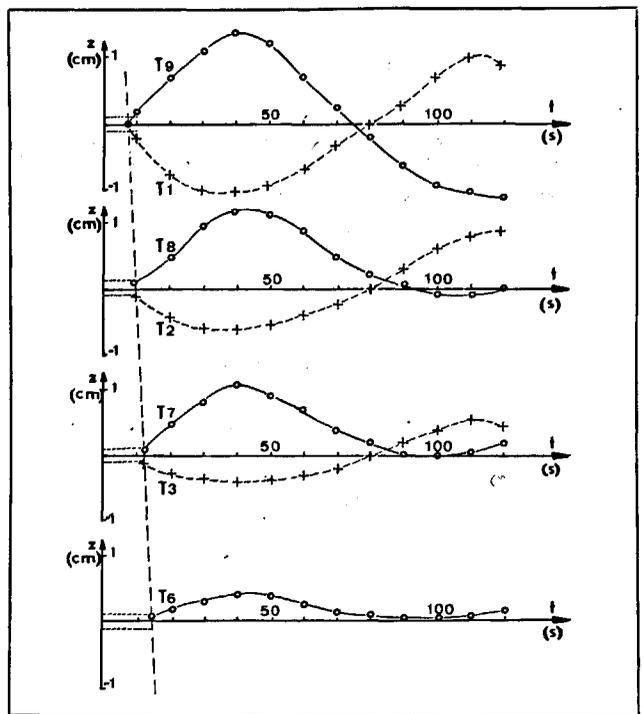


Figure 14

Évolution, en fonction du temps, de la surélévation de l'interface, pour divers points de la section transversale, au milieu du canal ($x=4$ m), soit, de haut en bas, près des parois latérales ($t_1, y=0$; $t_9, y=2$ m), à 25 cm ($t_2, y=0.25$ m; $t_8, y=1.75$ m), 50 cm ($t_3, y=0.50$ m; $t_7, y=1.50$ m) et 75 cm ($t_6, y=1.25$ m) de celles-ci. On a représenté en traits tiretés, les cotes ± 0.1 cm.

Interface height variation, with time, for different points of the transverse section, in the middle of the channel ($x=4$ m), from top to bottom, close to the sides ($t_1, y=0$; $t_9, y=2$ m) and at distances of 25 cm ($t_2, y=0.25$ m; $t_8, y=1.75$ m), 50 cm ($t_3, y=0.50$ m; $t_7, y=1.50$ m) and 75 cm ($t_6, y=1.25$ m) from the sides. Dash-lines indicate heights ± 0.1 cm.

Pour essayer de préciser un peu l'organisation de la pseudo-amphidromie, nous avons porté, en fonction de l'abscisse, l'amplitude des deux premiers extremums de même signe, le long des parois longitudinales (fig. 12). On constate que ceux-ci se placent suivant deux courbes parallèles, aux erreurs d'expériences près. On peut avancer que celles-ci permettent de définir la ligne de niveau moyen de l'interface, le long de l'axe du canal. La pente de cette droite dépend de la vitesse du vent et de la profondeur totale (fig. 13). Dans le même but, on a porté, en fonction du temps, les cotes des deux premiers extremums de même signe, le long des parois longitudinales (fig. 12). On remarque que les parties rectilignes de ces courbes — entre $x=3$ et 7 m pour la paroi gauche, $x=1$ et 5 m pour la paroi droite — sont de pente égale et de signe opposé. Nous avons également vérifié, pour deux rapports h_1/h_2 différents, que l'amplitude du premier extremum après le début du coup de vent est proportionnelle au carré de la vitesse du vent. Par contre, pour un vent constant, et deux rapports h_1/h_2 distincts, on ne trouve pas de corrélation nette entre l'amplitude de ce premier extremum, près des parois latérales, au centre du canal, et le rayon de déformation interne $R=c/f$ (c =célérité de l'onde barocline, f =paramètre de Coriolis).

Si nous considérons maintenant une section transversale, par exemple la section centrale ($x=4$ m) (fig. 14), on

observe tout d'abord, près des parois du canal, un « temps de réponse », de l'ordre de 7 secondes, séparant le début du coup de vent de l'instant où la surélévation atteint 1 mm. Ce temps est indépendant de la section étudiée, et correspond vraisemblablement au « temps de réponse » de la couche supérieure à la sollicitation due au vent. Surtout, on remarque l'existence d'un temps de propagation, pour la surélévation, depuis les parois longitudinales vers le centre du canal. Il correspond à une vitesse de propagation de l'ordre de 10 cm/s, ce qui est l'ordre de grandeur de la vitesse des ondes baroclines, comme de l'onde d'inertie engendrée par le vent.

CONCLUSIONS

Si l'existence d'une onde, liée au caractère impulsif du vent, de période inférieure à la période d'inertie, comme le prévoyait la théorie, naissant près des parois du canal et se propageant depuis celles-ci vers le centre du bassin, nous semble démontrée, nous ne disposons encore ni de solutions analytiques convenables pour la représenter, ni de méthodes expérimentales pour en préciser davantage la forme et les caractéristiques. C'est à cette tâche que nous nous attachons. Sur le plan expérimental, un progrès devrait être fait prochainement lorsque la mise en place du dispositif mécanique de simulation du vent nous permettra de nous affranchir de la source d'erreur qu'introduit la non-homogénéité du vent à la surface libre.

Cela étant, la mise en évidence, en laboratoire, d'une onde d'inertie de période légèrement inférieure à la période d'inertie, est un résultat nouveau qu'il nous paraissait intéressant de souligner ici.

Remerciements

Nous remercions le Cnrs, qui, dans le cadre d'une Action Thématique Programmée « Océanographie Physique : interactions-océan-atmosphère » a supporté financièrement ces travaux.

Nous remercions également M. le Pr. J. P. Germain et M. M. Crépon qui nous ont aidés dans la partie théorique de ce travail.

Nous exprimons aussi notre gratitude à MM. M. Reveillet et J. P. Seaume, tous deux techniciens à l'Img, qui ont collaboré à la bonne conduite des essais, ainsi qu'à M. Saenz qui nous a secondé dans la mise au point du programme de traitement numérique des données.

RÉFÉRENCES

- Chabert d'Hières G., 1962. Réglage et exploitation de la plaque tournante de Grenoble, *Houille Blanche*, 2, 1962, 244-252.
- Chabert d'Hières G., Renouard D., 1976. Canal équipé d'une soufflerie et d'un moyen mécanique de simulation du vent, sur la plaque tournante de Grenoble, *Houille Blanche*, 1, 1976, 45-51.
- Chabert d'Hières G., Renouard D., 1977. Ondes internes engendrées par le vent dans un canal parallélépipédique en milieu tournant, *Ann. Hydrogr.* 5^e sér., 5, 1, 127-134.
- Chabert d'Hières G., Suberville J. L., 1974. Ondes internes à l'interface de deux fluides de densités voisines contenus dans un bassin rectangulaire tournant, *Houille Blanche*, 7-8, 1974, 623-630.
- Crépon M., 1969. Hydrodynamique marine en régime impulsif, *Cah. Océanogr.*, 11, 9, 863-877.
- Crépon M., Gonella J., Lacombe H., Stanislas G., 1972. Participation française à l'opération Cofrasov I, Public. Cnexo, Résultats de campagne à la mer, n° 04-1972, 91-106.

The National Institute of Oceanography at Goa (India) has just published, with the financial support of the Unesco Division of Marine Sciences, the proceedings of the Symposium

Warm Water Zooplankton

held in Goa 14-19 October 1976.

Requests for copies may be sent to

National Institute of Oceanography
NIO Post office

Dona Paula, Goa, India,
or to the Unesco Division of Marine Sciences.