Chapter 3

CHAMP HYDRODYNAMIQUE D'UNE HOULE EN PROFONDEUR CONSTANTE

H. Bureste, Docteur es Sciences,
et
Ch. Chartier, Professeur à l'Université de Poitiers, Poitiers, France.

Nous avons appliqué la méthode chronophotographique à la visualisation d'une houle par poudre d'aluminium.-

Il faut utiliser des poudres de dimensions de quelques μ convenablement préparées et sélectées, pour rendre négligeable la vitesse de chute devant les vitesses à mesurer mais suffisamment réfléchissantes pour être photographiées à travers des couches d'eau de l'ordre du mètre.-

Dans les conditions d'emploi le coefficient d'entraînement (1) des poudres est très grand, de l'ordre de 10^6 et les paramètres de fidélité (1) de visualisation des vecteurs vitesses en direction et en grandeur sont supérieurs au millième . La restitution photographique permet ainsi de mesurer les axes des orbites, les vitesses absolues en chaque point avec une précision du centième.-

La houle était engendrée dans un canal de section rectangulaire constante dont les parois étaient munies de glaces latérales et qui pouvait être recouvert de façon à souffler sur l'eau un vent constant. Les dimensions du canal étaient de 25m de longueur et de 1mx1m de section.-

---

(1) J.M. BOUROT, Chronophotographie des champs aérodynamiques, Publ. Sc. et Techn. du Ministère de l'Air N° 226 (1949).-

iel

calculable d'après la théorie de Biesel.-

La période variant de 0,4 seconde à 1,5 seconde était stabilisée au 1/100 près et déterminée par enregistrement. L'amplitude supérieure était variable en marche, et par variation de l'amplitude inférieure on pouvait passer insensiblement du batteur volet au batteur piston, de façon à suivre la loi de décroissance des orbites avec la profondeur. On a pu ainsi créer des houles régulières de creux relatif allant jusqu'à 0,115.-

Mais il était possible d'engendrer la houle par un vent plus ou moins violent soufflé à la surface de l'eau. Vu la faible longueur du canal, le problème de la filtration et de l'amortissement prenait une importance considérable, d'autant plus que la finesse de la méthode chronophotographique permettait de déceler la plus petite imperfection dans la pureté de la houle.-

Les filtres et amortisseurs utilisés (2) étaient des "bandes clapets" bandes de toile supportées par un treillis normal à l'axe du canal, et pouvant tourner autour d'un axe vertical. Ces bandes s'ouvrent au passage de la houle incidente et se referment lors du passage de l'onde réfléchie. Lorsque les treillis sont placés à un quart de longueur d'onde les uns des autres, il prend naissance sur chaque treillis un ventre de réflexion dont l'effet contrarie la formation du noeud correspondant à la réflexion sur le treillis précédent. L'ensemble était complété par une plage absorbante molle et une cavité déversoir.-

L'ensemble malgré sa faible longueur donnait une houle très pure malgré les grandes cambrures atteintes (0,1) et il fut possible de

---

(2) Note D.T.I. 1948 - Note C.N.R.S. 1948-1949.-

suivre les trajectoires des particules pendant 7 périodes successives sans déceler d'irrégularités tant dans les longueurs des axes que dans les vitesses de rotation et d'entraînement.-

Nous avons photographié une mince tranche d'eau de 2cm d'épaisseur située dans le plan vertical axial du canal. L'éclairage était fourni par un projecteur à grande brillance dont le faisceau était coupé, périodiquement par un disque tournant à vitesse règlable.-

Les photos furent prises sur plaques Collodium Guilleminot 9 X 12.-

Les longueurs d'onde de la houle étaient déterminées par photographie, les périodes par enregistrement du mouvement du batteur.-

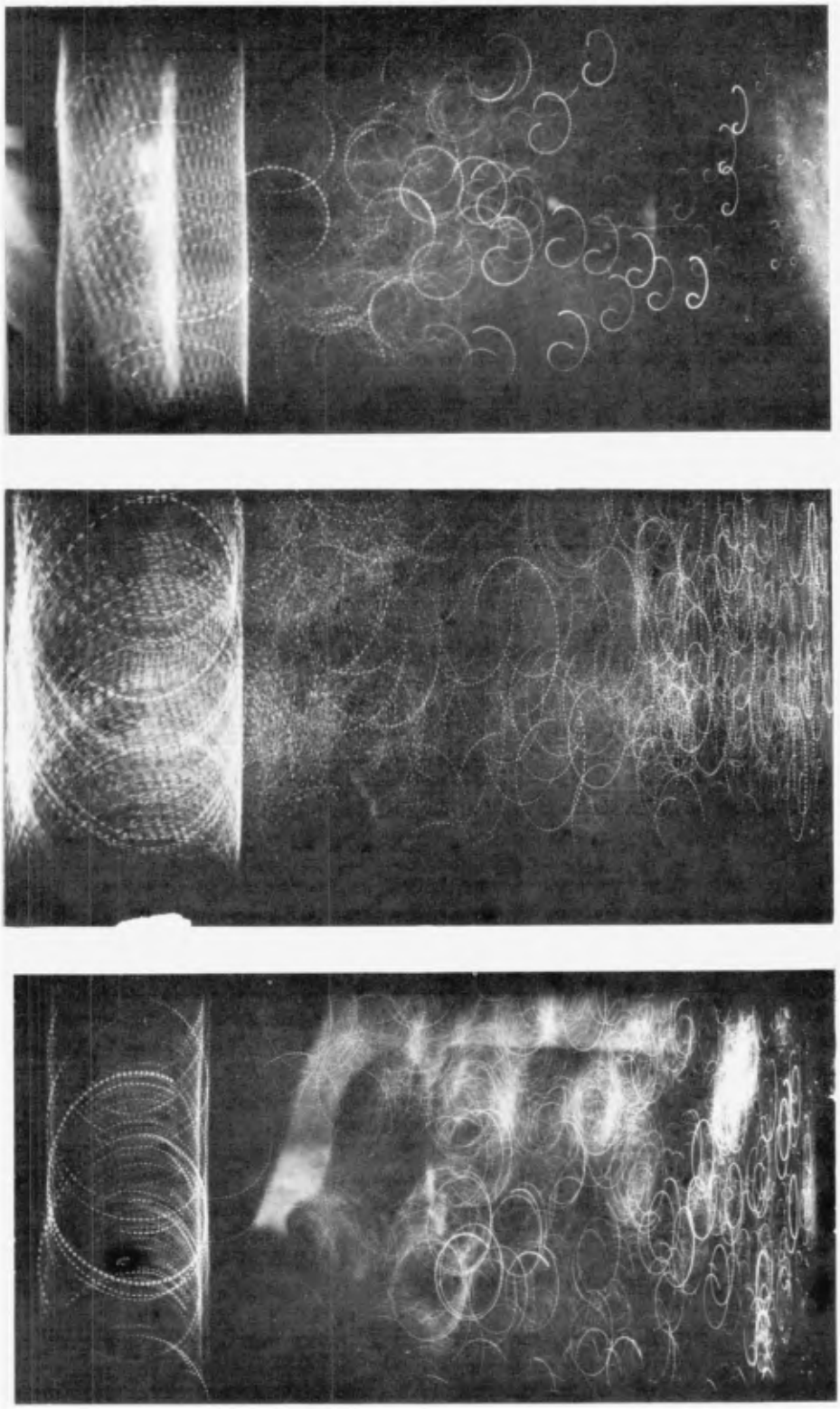
Toutes les expériences furent faites dans une profondeur d'eau de 68 cm et pour des ondes de profondeurs relatives $\frac{H}{L} = 0,4$ et $\frac{H}{L} = 0,2$ et pour des creux relatifs variant de 0,04 à 0,115.-

TRAJECTOIRES DES PARTICULES.-

Ce sont toujours des ellipses plus ou moins ouvertes suivant le creux de la houle.-

Que l'on soit en eau assez profonde de $\frac{H}{L} = 0,4$ ou en eau assez peu profonde $\frac{H}{L} = 0,2$ les résultats sont sensiblement les mêmes. L'ellipse possède un axe de symétrie vertical et un applatissement bien plus faiblement marqué que ne l'indiquait les théories et surtout les expériences faites dans des profondeurs d'eau plus faibles.-

Le rapport des axes horizontaux et verticaux en surface est nettement supérieur à 1. Ce rapport croît avec le creux de façon que la différence des longueurs des axes horizontaux et verticaux varie linéairement avec le carré du creux, le coefficient de proportionnalité étant sensiblement égal à l'inverse de la profondeur de l'eau. Le



(a) (T = 1.43 sec., creux = 16 cm)

(b) (T = 1.43 sec., creux = 23 cm)

(c) (T = 0.93 sec., creux = 19 cm)

Photos

rapport des axes doit atteindre lors du déferlement une valeur de 1,35 pour une profondeur relative de 0,4 et 1,5 pour une profondeur relative de 0,2.-

La décroissance des axes n'est exponentielle qu'au dessous du niveau du creux. Une anomalie dans la décroissance existant entre crête et creux.-

Il semble donc qu'il faudrait tenir compte particulièrement en modèles réduits de la zône de contact air eau, où les phénomènes de tension superficielle ne peuvent plus être négligés.-

VITESSE DES PARTICULES.-

Le dépouillement des vitesses permet de mesurer les vitesses de rotation des particules sur leurs orbites et les vitesses du courant d'entraînement à différentes profondeurs.-

D'une façon générale ni la vitesse absolue, ni la vitesse de rotation ne sont régulières le long de l'orbite. La vitesse n'est pas maximum en crête mais un peu avant celle-ci la vitesse absolue passant par deux minimas peu accentués un peu avant, et un peu après le creux.-

Vitesse de rotation.-

Nous avons dit qu'elle n'était pas constante. On décompose les vitesses de rotation en deux vecteurs composants, l'une horizontale, l'autre verticale.-

On constate que la grandeur de chacune est la somme de deux fonctions sinusoïdales harmoniques en phase. La fonction fondamentale correspond à une rotation uniforme autour de l'axe correspondant, la fonction harmonique 2 a une amplitude qui croît comme le carré du creux, la composante verticale ayant une amplitude sensiblement

deux fois plus grande que la composante horizontale.-

Vitesse d'entraînement.-

Elle varie avec la profondeur et avec le creux. De même sens que la propagation en surface, la vitesse d'entraînement décroît, s'annule à une profondeur sensiblement égale au $\frac{2}{5}$ de la profondeur, puis est de sens contraire à la propagation.-

En surface cette vitesse dépend du creux et elle croît proportionnellement au carré du creux.-

Ces derniers résultats sont en très bon accord tant pour une houle en eau assez profonde, que pour une eau assez peu profonde avec les résultats de la théorie de Miche, excluant par conséquent l'influence de la viscosité.-

DEFERLEMENT.-

Il est possible alors par un graphique simple de rechercher le creux qui ammènera le déferlement. On admettra que le creux qui ammènera le déferlement est celui pour lequel la vitesse absolue de la houle sur sa trajectoire est égale à la célérité de la houle.-

La vitesse en crête est la somme de la vitesse de rotation autour de l'axe horizontal (qui dépend du carré du creux), de la vitesse complémentaire harmonique, et de la vitesse d'entraînement, des deux dernières étant d'ailleurs proportionnelles au carré du creux.-

Les résultats de la construction sont en bon accord avec ceux provenant de l'extrapolation des résultats de différents expérimentateurs.-

Les graphiques annexés sont ceux relatifs à une houle de période T = 1,43 s de longueur d'onde L mesurée = 2,83 m de creux

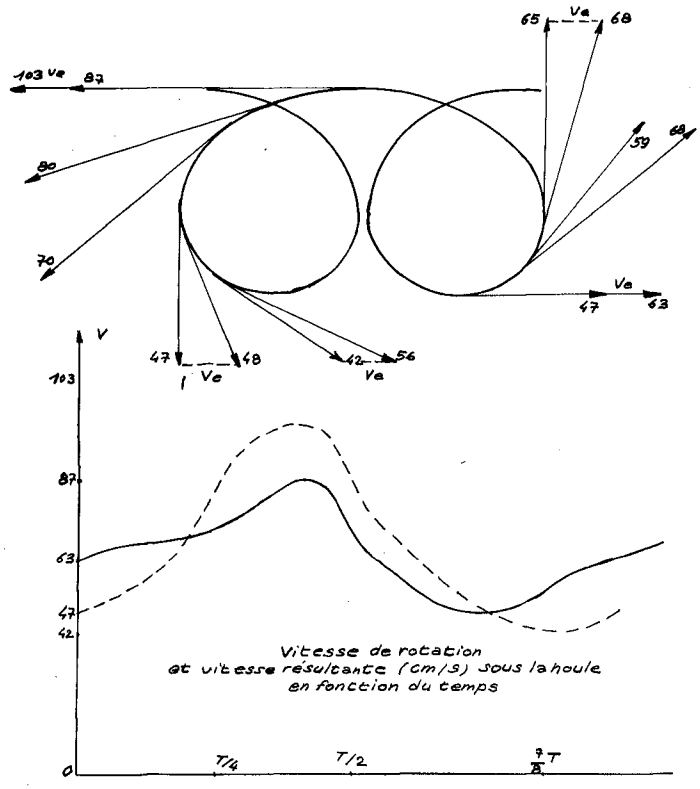

65
Va
68
103 Ve
87
80
70
59
68
Va
47
63
V
47
48
Ve
42
56
Ve
103
87
63
47
42
0
T/4
T/2
3/4 T
Vitesse de rotation
et vitesse résultante (cm/s) sous la houle
en fonction du temps

Fig. 1.

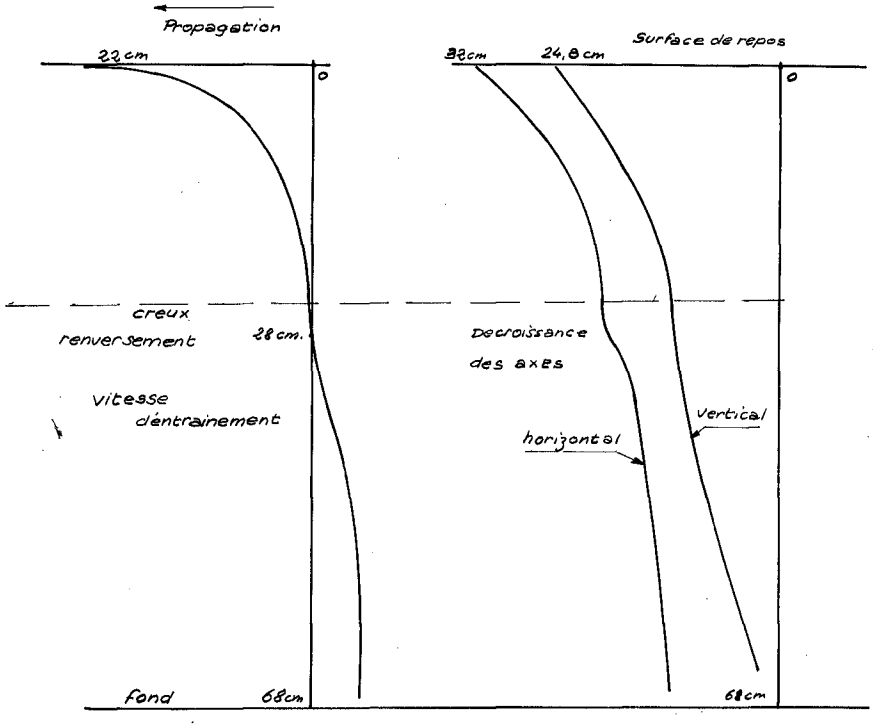

Propagation
22 cm
0
creux
renversement
28 cm.
Vitesse
d'entrainement
fond
68cm
32cm
24,8 cm
Surface de repos
0
Decroissance
des axes
vertical
horizontal
68cm

Fig. 2.

$2a = 24,8$ cm, de profondeur ralative $\frac{H}{L} = 0,24$, de creux relatif $\frac{2a}{L} = 0,087$.-

La figure 1 donne la trajectoire d'une particule avec les vecteurs vitesses absolues, vecteur vitesse rotation, vecteur vitesse d'entraînement. On y a joint la valeur des vitesses de rotation et absolues en fonction du temps.-

La figure 2 donne la décroissance des axes horizontaux et verticaux en fonction de la profondeur de l'eau. On remarquera l'anomalie de variation dans le voisinage du creux.-

La variation de la vitesse d'entraînement donne au voisinage de la profondeur $\frac{2}{5}$ le renversement du courant.-

La figure 3 donne l'étude de la variation de l'axe horizontal des ellipses orbites en surface, en fonction du creux.-

La figure 4 est relative aux variations de vitesses harmoniques 2, horizontales et verticales en fonction du creux.-

La figure 5 précise les variations de la vitesse d'entraînement en surface en fonction du creux.-

Enfin, la figure 6 indique la construction pratique permettant de déterminer pour une houle de période donnée les possibilités de déferlement.-

La méthode chronophotographique de visualisation par poudre d'aluminium, est une méthode de choix pour étudier en canal une houle réduite.-

Son extrême finesse a permis de montrer qu'en surface, il fallait tenir compte de la tension superficielle de l'eau. Par contre,

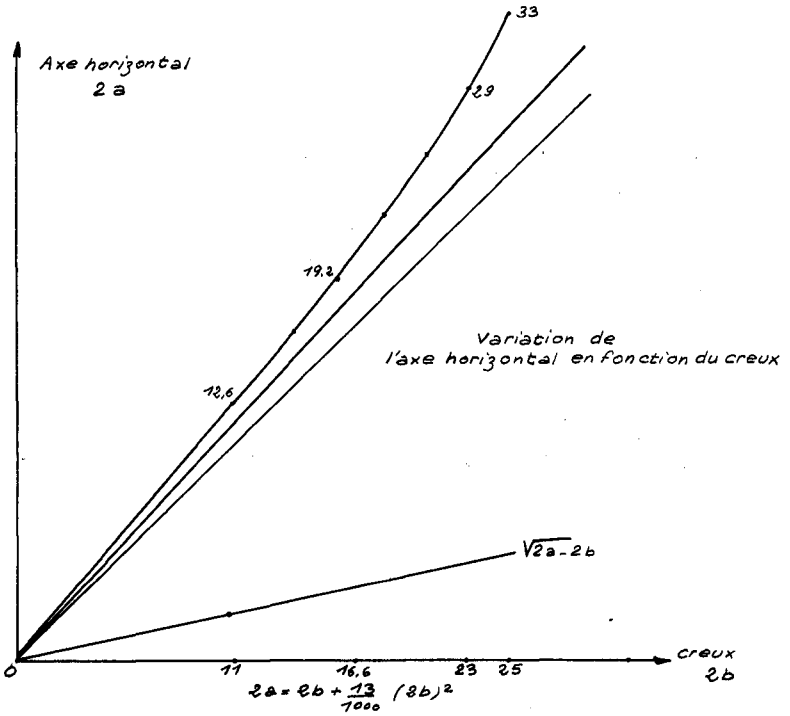
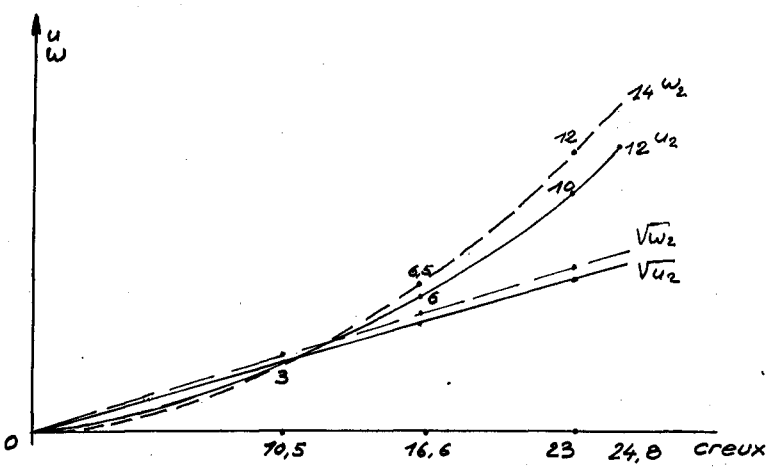


Fig. 3.

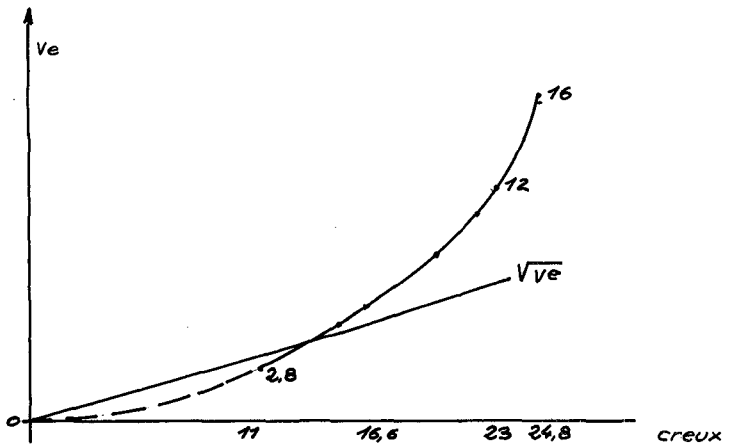


Variation des vitesses harmoniques

horizontale ——— u_2

Verticale — — — w_2

Fig. 4.



Variation de la vitesse d'entrainement avec le creux

Fig. 5.

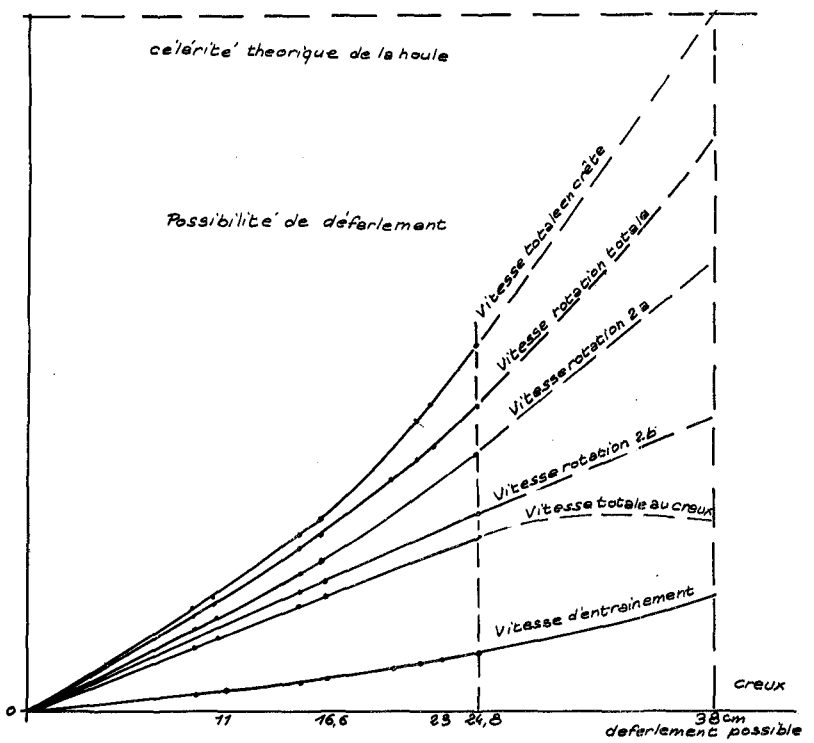


Fig. 6.

bien que les résultats des expériences d'hiver et d'été ne soient pas comparables, la viscosité ne joue qu'un rôle négligeable.-

ENTRAINEMENT DE LE HOULE PAR LE VENT.-

Un ventilateur placé à l'amont du canal permettait de souffler un vent constant sur l'eau du canal. La vitesse de ce vent règlable par variation pouvait atteindre 20 m/s dans une section de 0,30 x 1m.-

Action d'un vent constant sur la surface de l'eau.-

Nous avons engendré une houle par entraînement des couches superficielles. Pour des parcours relativement faibles en eau profonde, la célérité de la houle croît comme la racine carrée du parcours tandis que la longueur d'onde croît linéairement avec le fetch.- Le creux et le creux relatif sont proportionnels à la racine carrée du fetch. Ces résultats sont en bon accord avec les lois empiriques généralement admises.-

Les axes des orbites en un point donné lors des premiers temps d'établissement de la houle croissent linéairement avec le temps, le rapport des axes horizontaux et verticaux étant supérieur à l'unité.-

Action d'un vent constant sur une houle déjà formée.-

Lorsqu'on souffle sur une houle déjà formée par des moyens mécaniques, un vent assez violent, on peut arriver en profondeur constante au déferlement de la vague.-

Les orbites des particules s'ouvrent largement et prennent la forme d'un V. Le champ hydrodynamique est complètement déformé. Les lignes de courant aboutissant au voisinage du niveau de repos et qui sont normalement verticales s'infléchissant très nettement.-

Le déferlement est caractérisé par une élévation du niveau des crêtes sans que le niveau du creux s'élève sensiblement. Il y a élévation du niveau moyen.-

Il y a à la fois augmentation des vitesses de rotation et d'entraînement, la vitesse des particules prenant sa valeur maximum un peu en avant de la crête théorique.-

Il se crée ainsi sous la houle des courants ascendants pour nourrir la vague.-

RESUME

HYDRODYNAMIC FIELD OF A WAVE AT CONSTANT DEPTH

M. Bureste, and Ch. Chartier

We have used chronophotographic methods with aluminium powder to record wave motion. In this method, it is necessary to photograph fine selected and prepared particles which sink slowly but which are nevertheless large enough to reflect light through about half a meter of water in the wave flume.

With correctly chosen particles, the accuracy with which velocity vectors for direction and magnitude are observed is higher than 1/1000. The photograph makes it possible to measure to 1/100th, the axes of the ellipses forming the orbits and the velocity at each point.

The waves were produced in a 1 x 1 metre section and 25 metre long flume, fitted with observation panels, by a Gridel type wave machine, calculated by Biesel's theory. The generating period was stabilized to 1/100th and the machine was designed to allow continuous variation of the amplitude during operation. Total damping was obtained by a special type wave absorber placed at the end of the channel.

Experiments were carried out at a uniform depth of 68 cm; for relative depths $\frac{H}{L}$ = 0.4 and 0.2 and for relative heights $\frac{2a}{L}$ varying from 0.04 to 0.1.

Orbit Axes - The results were almost the same for shallow and fairly deep water. The ratio between horizontal and vertical axes is definitely greater than that obtained with the various wave theories. The ratio increases with the wave amplitude so that the difference 2 b - 2 a varies linearly with the square of the amplitude, the proportion being appreciably equal to the inverse of the depth. The length of the axes decreases exponentially only below the level of the trough because there is an anomaly in the rate of decrease between crest and trough levels. On scale models, special attention must be paid to the area where air and water are in contact with one another; phenomena of surface tension at this point cannot be neglected.

Velocity - The absolute velocity of a particle reaches its maximum when the particle is near the crest but two minimum velocities occur at times $\frac{T}{8}$ and $7\,\frac{T}{8}$.

The speed of revolution is not constant. Its horizontal (U) and vertical (V) components are not sinusoidal but they can be expressed by the algebraic sum of two harmonic speeds. The harmonic auxiliary speeds 2 are proportional to the square of the amplitude. However, the coefficients measured are definitely greater than the coefficients given by wave theories, particularly for the vertical component.

The mass transport velocity at the surface is proportional to the square of the amplitude. Its value and the depth of inversion agree with the Miche formulae.

Wave breaking - A simple graph can be used to determine the amplitude for which a wave of given length, and at constant depth, may break. The amplitude at which the wave will break is that for which the maximum particle velocity equals the velocity of propagation. The velocity at the crest is the sum of the velocity around the horizontal axis (the length of which depends on the square of the amplitude) of the harmonic velocity and the propagation velocity, both of which are proportional to the square of the amplitude. Results obtained in this way agree perfectly with those found by experiment.

Breaking was induced by applying a constant wind to a mechanically produced wave. The trajectory orbits open out. The trough level remains practically constant and only the crest rises. The velocities of revolution and propagation increase while the mean level rises temporarily. Ascending currents develop within the body of water and "feed" the wave.