

Etude du champ de vitesses sous une et plusieurs plaques soumises à la houle et immergées près du fond

K. GUIZIEN et E. BARTHÉLEMY

Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels

BP53, 38041 Grenoble Cedex 9

Tél : 04 76 82 51 17

E-mail : guizien@onde715.img.fr

Fax : 04 76 82 51 00

Résumé

On présente une étude expérimentale de l'écoulement sous une et plusieurs plaques proche du fond, soumises à des houles monochromatiques en incidence normale. Des mesures détaillées par vélocimétrie LASER du champ de vitesse sous les plaques ont été effectuées. Pour 2 des 4 conditions de houle expérimentées, on retrouve sous une plaque proche du fond, une circulation moyenne non négligeable voire très intense, semblable à celle décrite pour des plaques situées près de la surface. Par ailleurs, toujours dans le cas d'une plaque seule, la composante périodique de la vitesse est raisonnablement bien décrite par la théorie linéarisée non visqueuse excepté à l'extrémité aval de la plaque. Enfin, les expériences mettent en évidence une modification de la circulation moyenne par rapport au cas de la plaque seule sous les plaques centrales d'un lotissement de plaques pour les houles de grandes longueurs d'onde et fortes amplitudes. On observe alors des zones de faibles vitesses près du fond ou des points d'arrêts.

Summary

We present an experimental study of the velocity field under one or several plates interacting with monochromatic waves. LDA measurements of this field under a plate are carried out. For 2 out of the 4 waves conditions utilized, we measure, under one plate located near the bottom, important mean velocities. We retrieved a mean circulation similar to the one described for a plate located near the surface. Furthermore, for this one plate case, orbital velocity components are in good agreement with the linear inviscid theory, except near the downstream end of the plate. In addition, important differences appear between the one plate case and the combined set of equally spaced plates in long and strong amplitude wave conditions. We also note low velocity zones or stagnation points near the bottom under the central plates in a set of plates.

1 Introduction

Sur de nombreux sites ostréicoles, on place les poches contenant les huîtres sur des tables. Ces tables sont en général regroupées en lotissement. Or, il se trouve que l'on observe sous les tables un exhaussement du fond par déposition de sédiments [8]. Cela impose leur enlèvement périodique et l'arasement mécanique du fond. Comme première approche à une étude sédimentologique, on a réalisé pour l'IFREMER une étude expérimentale de l'hydrodynamique en eau claire. Nous avons étudié l'écoulement sous une et plusieurs plaques pour 4 conditions de houle différentes allant de l'eau peu profonde à l'eau profonde. Deux de ces conditions ont été choisies en similitude avec le bassin oléronais, déduites de données fournies par le Laboratoire Hydraulique de France [6]. Des mesures détaillées du champ de vitesse sous les plaques ont été effectuées, ce qui contraste avec les études précédentes (entre autres : DROUIN & OUELLET [1] et PATARAPANICH & CHEONG [9]) qui s'intéressaient exclusivement aux effets de transmission et de réflexion de la houle.

2 Descriptif des expériences

Les expériences sont réalisées dans un canal à houle de 18 m de long par 0.7 m de large et de profondeur. Il est équipé à une extrémité d'un batteur piston et à l'autre, d'une plage amortisseuse (coefficient de réflexion d'environ 10%). Les plaques de 3.2 cm d'épaisseur et 40 cm de long sont placées à 13 cm du fond sur la largeur du canal. Les mesures de vitesses sous les plaques sont effectuées avec un vélocimètre LASER à deux composantes. Des relevés de surface libre sont réalisés à l'amont et à l'aval des plaques à l'aide de sondes résistives afin de déterminer le coefficient de réflexion des plaques.

Les expériences ont été réalisées pour différentes conditions de houle dont les paramètres caractéristiques sont consignés dans le tableau 1.

	Clapot 1	Clapot 2	Clapot 3	Clapot 4
profondeur h (cm)	30	51.5	51.5	51.5
période T (s)	0.62	1.06	1.65	2.47
excentricité du batteur e (cm)	1	3	8	14
amplitude incidente a (cm)	1.42	3.85	6.14	5.45
longueur d'onde L (m)	0.60	1.70	3.24	5.30
nombre d'onde k	10.4	3.7	1.94	1.18
cambrure ka	0.15	0.14	0.12	0.06
paramètre de l'eau peu profonde kh	3.1	1.9	1	0.6

TAB. 1 - Conditions de houle

Il s'agit de conditions de profondeur d'eau allant de l'eau profonde (clapot 1) à l'eau

peu profonde (clapot 4). Les cambrures, sans être très importantes, ne sont pas pour autant infinitésimales. L'hypothèse de houle linéaire pourra donc éventuellement être mise en défaut.

Les clapots 3 et 4 ont été choisis en similitude géométrique (rapport de similitude : 1/4) par rapport au bassin oléronnais. Sur site, ils correspondent à des clapots de vent de périodes respectives 3.3 s et 5 s pour des amplitudes d'environ 25cm dans une profondeur d'eau de 2m. Ces données nous ont été communiquées par le LHF et proviennent d'un calcul de réfraction-diffraction. Il s'agit de conditions représentatives des clapots moyens à mi-marée sur le bassin de Marennes-Oléron.

Pour chaque condition de houle, on réalise des mesures sous une plaque seule et sous la troisième plaque d'un ensemble de 5 plaques, régulièrement espacées d'une longueur de plaque (cf fig. 1). Pour le clapot 3, une série supplémentaire sous la troisième plaque d'un ensemble de 4 plaques a été réalisée. Les composantes horizontales et verticales de la vitesse sont mesurées en 14 points (tous les cm environ) le long de 3 verticales de mesures situées au centre et à 3 cm des extrémités de la plaque. Dans le cas de la plaque seule, on complète avec 2 verticales de mesure situées à 20 cm de part et d'autre de la plaque.

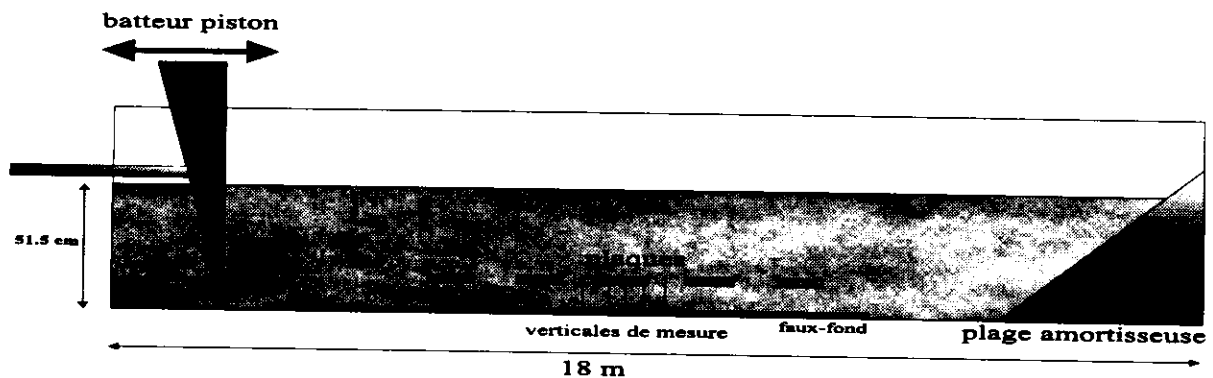


FIG. 1 - Schéma du dispositif expérimental.

3 Dépouillement des mesures

Les enregistrements de vitesses au cours du temps obtenus sont des signaux quasi-périodiques bruités dont la porteuse présente des fluctuations aperiodiques de basses fréquences (lentes ou par bouffées). Les signaux ne sont donc pas à moyenne nulle en général. La durée des enregistrements est fixée à 10 minutes sur la verticale centrale et 20 minutes sur les autres, ceci afin d'obtenir une moyenne robuste (répétition de la mesure) à 0.5 cm/s près.

Par ailleurs, on peut vérifier par une transformée de Fourier des signaux qu'il s'agit bien de signaux harmoniques sur lesquels s'ajoute un bruit blanc. Sur les figures 2.a et .b, on représente la densité spectrale de puissance (dsp) brute et filtrée d'un enregistrement de vitesse horizontale en fonction de la fréquence (échelle semi-logarithmique). On identifie sur la figure 2.b des pics de dsp à la fréquence de la houle et de ses harmoniques. A ces pics discrets, s'ajoute la signature d'un bruit continu : décroissant entre 0 et 10 Hz, certainement lié à la turbulence, et constant (d'environ -8 décades) au-delà de 10 Hz, caractéristique d'un bruit blanc. Pour le dépouillement de nos mesures, il nous a paru plus

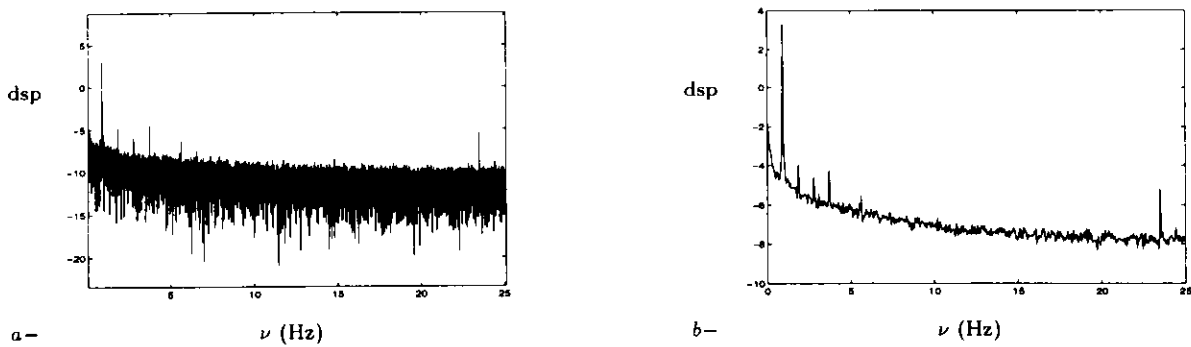


FIG. 2 – *dsp d'un enregistrement de vitesse (clapot 2 - $T=1.06$ s) : (a) brute calculée sur 32768 points; (b) filtrée par sommation de 32 valeurs consécutives.*

adapté d'effectuer une analyse harmonique qui élimine toutes les fréquences non multiple de la fréquence fondamentale. En particulier, cette technique filtre le bruit turbulent éventuel et le bruit blanc de mesure qui est principalement dû à un manque de validation et qui se traduit par des paliers horizontaux sur les enregistrements comme on le voit sur la figure 3. On analyse ainsi des zones des signaux de quelques secondes (soit environ 20 à 30 périodes) afin d'avoir les fluctuations de la porteuse les plus faibles (cf fig. 3).

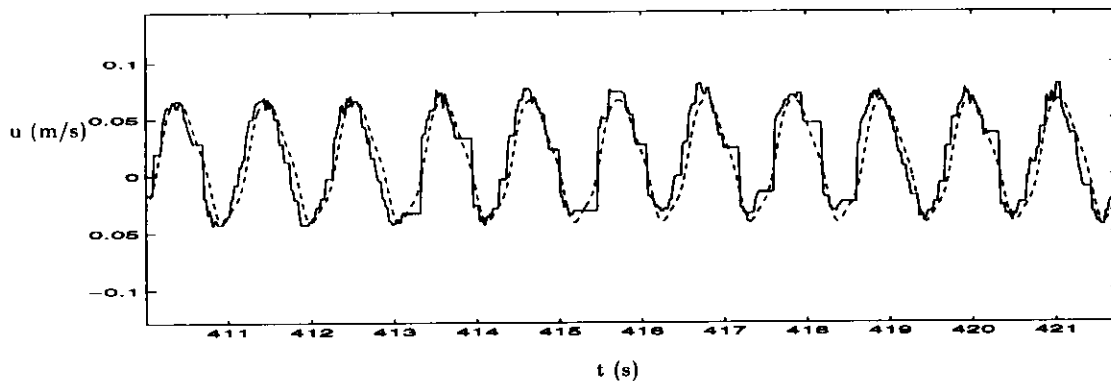


FIG. 3 – *Enregistrement de vitesse (clapot 2 - $T=1.06$ s) : (—) expérimental; (- -) signal numérique restitué par l'analyse harmonique.*

L'analyse harmonique effectuée consiste à minimiser les carrés des écarts entre un morceau de signal expérimental brut et un signal harmonique numérique dont la pulsation est approchée par dichotomie. Par répétition de l'analyse sur différentes zones du signal, on peut estimer l'incertitude commise sur la détermination de l'amplitude de la composante à la fréquence fondamentale à environ 10 % d'erreur relative. Par ailleurs, sauf mention spéciale, on pourra toujours négliger les harmoniques supérieurs dans les signaux de vitesse près du fond. Cela ne signifie pas que la houle ne présente pas d'harmoniques mais ceux-ci ont une influence négligeable près du fond. En effet, leur amplitude décroît sur la verticale plus rapidement que celle du fondamental.

On peut donc décrire la vitesse eulérienne du fluide à l'aide de deux termes :

- la vitesse moyenne, moyenne temporelle du signal sur 10 ou 20 mn
- la vitesse orbitale, amplitude à la fréquence de la houle sur des zones du signal.

Enfin, les mesures du dénivelé de la surface libre permettent de décrire les conditions de houle (cf. fig. 4). En particulier, pour les clapots 1 et 2 (conditions d'eau profonde), on peut négliger les harmoniques supérieurs, l'amplitude du 1^{er} harmonique étant inférieure à 10% de celle du fondamental. Par contre, le clapot 3 n'est déjà plus une houle strictement linéaire puisque l'amplitude du 1^{er} harmonique vaut environ 20% de celle du fondamental. Pour le clapot 4, celle-ci vaut plus de 30% et celle du 2nd harmonique vaut 10%.

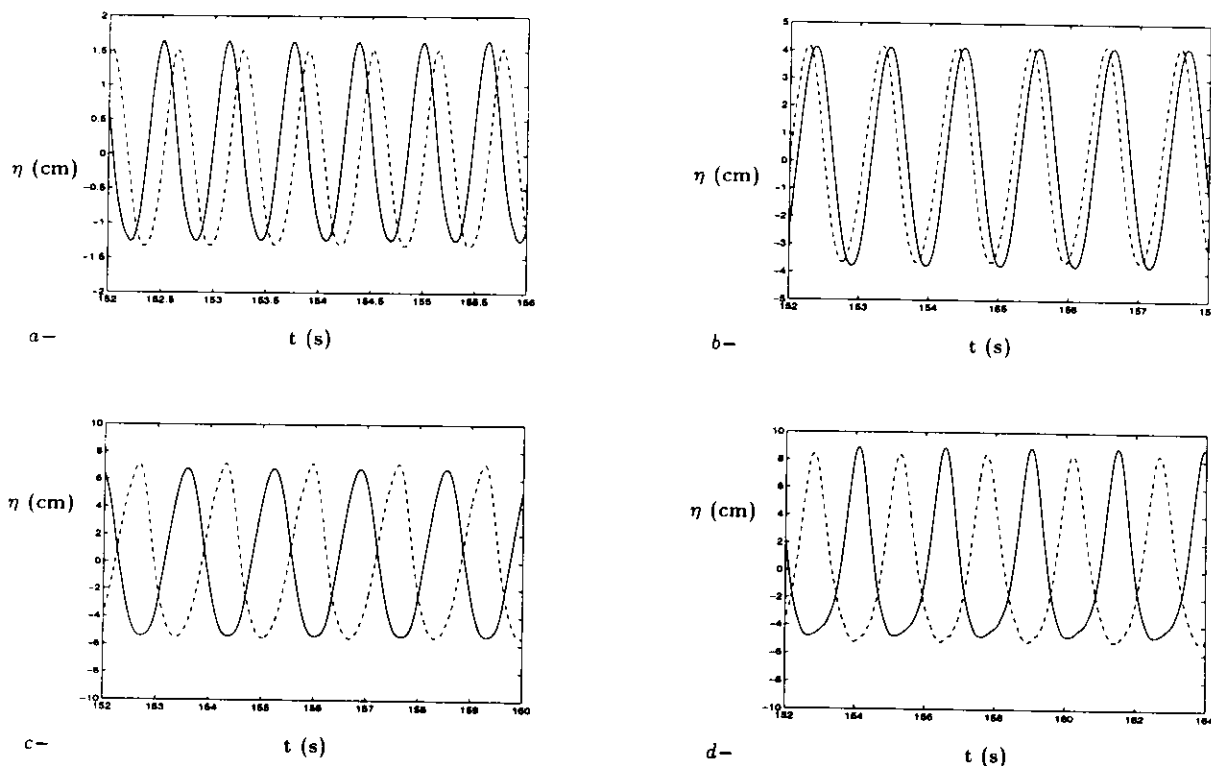


FIG. 4 - Exemples de mesures de la dénivellée de la surface libre en fonction du temps à l'amont (—) et à l'aval (- -) d'une plaque pour les différentes conditions de houle : (a) clapot 1 - $T=0.62$ s ; (b) clapot 2 - $T=1.06$ s ; (c) clapot 3 - $T=1.65$ s ; (d) clapot 4 - $T=2.47$ s

Pour calculer le coefficient de réflexion d'un obstacle dans un canal, il faut déterminer les amplitudes des houles incidentes et réfléchies ainsi que les déphasages entre elles, de part et d'autre de l'obstacle. Ceci est réalisé à l'aide de 3 relevés de surface libre de chaque côté de l'obstacle. Enfin, il reste à déterminer le déphasage de l'onde incidente au passage de l'obstacle. On l'obtient en mesurant simultanément la surface libre à l'amont et à l'aval. Ainsi, en couplant chaque relevé de surface libre amont à un relevé aval, on obtient 3 mesures différentes du coefficient de réflexion.

4 Résultats et discussion

Vitesse moyenne

Sur la figure 5, on représente au point de mesure les vecteurs de vitesse moyenne reconstitués à partir des vitesses moyennes horizontales et verticales mesurées. Sur la colonne de gauche, on présente l'écoulement moyen sous une plaque seule et sur la colonne de droite, celui sous la troisième plaque d'un ensemble de 5 plaques, dans l'ordre croissant des périodes de haut en bas.

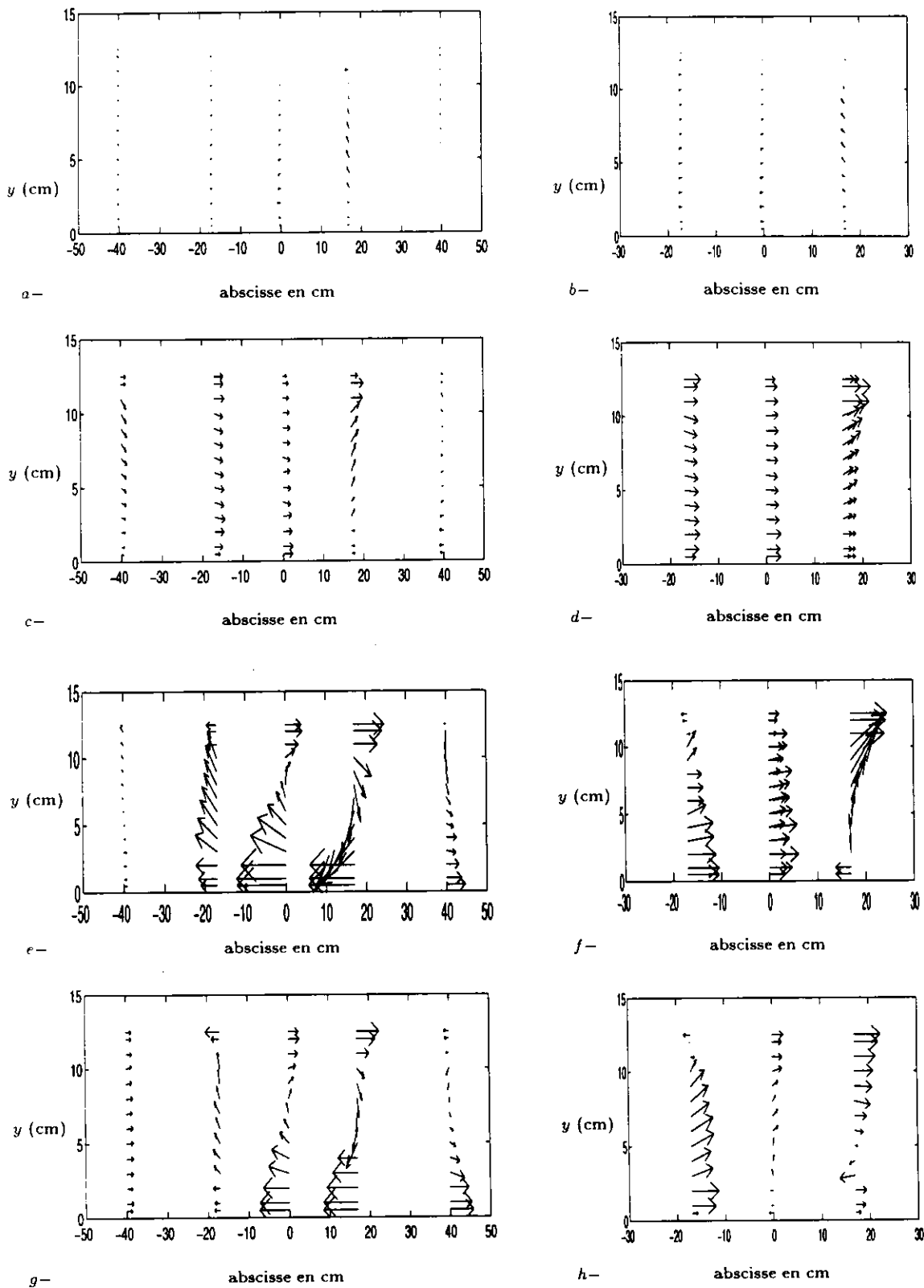


FIG. 5 – Vecteurs vitesse moyenne (Echelle : 1 cm sur les axes = 1 cm/s sur les vecteurs; $x=0$ au milieu de la plaque) mesurés sous une plaque : (a) clapot 1 ($T=0.6$ s); (c) clapot 2 ($T=1.06$ s); (e) clapot 3 ($T=1.65$ s); (g) clapot 4 ($T=2.47$ s) et sous la troisième plaque d'un ensemble de 5 plaques : (b) clapot 1 ($T=0.6$ s); (d) clapot 2 ($T=1.06$ s); (f) clapot 3 ($T=1.65$ s); (h) clapot 4 ($T=2.47$ s).

En l'absence d'obstacle dans le canal, la houle génère une circulation globale dans le canal peu importante [5]. Les vitesses moyennes ainsi induites sont en général inférieures au cm/s et valent au plus 3 cm/s.

Par contre, la présence de plaques peut induire des vitesses moyennes plus importantes suivant la condition de houle, pouvant atteindre 10 cm/s. Cependant, on note de fortes différences sur l'écoulement moyen suivant la condition de houle ainsi qu'entre les cas une plaque seule ou dans un ensemble.

En effet, pour le cas de la plaque seule, les vitesses moyennes sont de plus en plus intenses lorsque la cambrure de la houle diminue. De plus, pour les clapots 3 et 4 qui correspondent aux longueurs d'onde les plus longues et aux cambrures les plus petites, on remarque une zone de convergence très nette sur le fond à l'extrémité amont de la plaque et une zone de divergence à l'extrémité aval de la plaque. Pour le clapot 2, la zone de convergence à l'amont n'est plus visible et pour le clapot 1, on ne peut mettre en évidence de zones de convergence à partir de nos mesures. De plus, le flux moyen sous la plaque peut être dirigé de l'amont vers l'aval ou l'inverse suivant la condition de houle.

En recoupant ces mesures avec les travaux de BROSSARD [7] et BOULIER & BELORGEY [3] sur une plaque située près de la surface soumise à la houle, on explique ces zones de convergence par le développement d'une allée tourbillonnaire à chaque extrémité de la plaque, plus ou moins marquée en fonction de la cambrure et de l'amplitude de la houle.

Lorsque la plaque se trouve au milieu d'un ensemble de 5 plaques, l'écoulement moyen n'est pas modifié pour les clapots les plus courts et les plus cambrés. Par contre, il est fortement perturbé pour les clapots 3 et 4 avec l'apparition d'un point d'arrêt au moins sur le fond sous la plaque. Le flux moyen est inversé par rapport au cas de la plaque seule. Par ailleurs, il semble que le nombre de plaques (4 ou 5) ait peu d'influence sur l'écoulement moyen comme le montre les figures 6.a et .b.

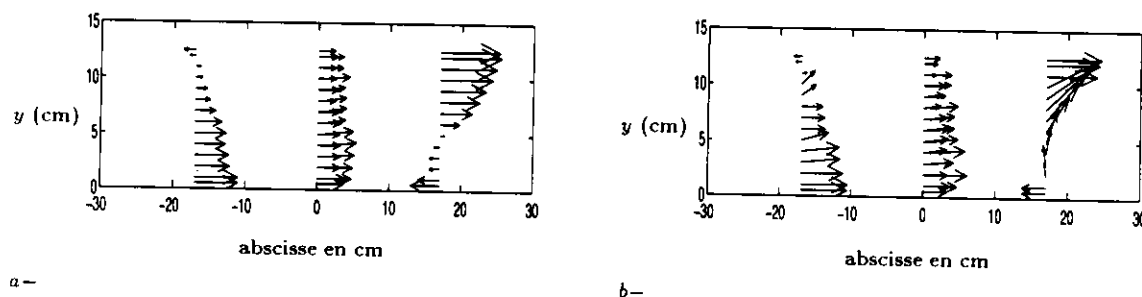


FIG. 6 - Vecteurs vitesse moyenne (cm/s) mesurés sous une plaque au milieu d'un ensemble de 4 (a) et 5 plaques (b) pour le clapot 3 ($T=1.65$ s)

A partir des analyses de BOULIER [2], on suggère pour interpréter la modification de l'écoulement moyen dans le regroupement en lotissement par rapport au cas une plaque l'explication suivante. Une synthèse des résultats donnés par BOULIER indique que l'allée vortex engendrée par la plaque à l'aval est dirigée vers le bas avec un angle qui se rapproche de la verticale quand la cambrure augmente. Par extrapolation des résultats obtenus par BOULIER, on estime que dans tous nos cas expérimentaux le point d'impact de cette allée tourbillonnaire se situe au plus à 3 cm du point à l'aplomb du bord aval de la plaque. Cette distance est bien inférieure à l'inter-plaque. En revanche, soumise à l'action de la houle, cette nappe tourbillonnaire est périodiquement déplacée. Lors de son advection par

la houle, elle peut interagir avec la plaque suivante. Ceci est d'autant plus probable que la cambrure de la houle est importante. En effet, le grand axe des trajectoires elliptiques près du fond est proportionnel à la cambrure.

Cette interprétation permet d'expliquer par ailleurs que l'écoulement moyen soit sensiblement identique sous la troisième plaque d'un ensemble de 4 et 5 plaques, puisqu'il serait dû à l'interaction de l'allée tourbillonnaire, générée par l'éjection de tourbillons à chaque demi-période de la houle en bout de plaque, avec la plaque suivante. L'éjection de tourbillons étant dû à la houle, si le coefficient de transmission d'une plaque est proche de l'unité, les allées tourbillonnaires d'une plaque et de sa suivante seront très similaires et créeront des écoulements moyens semblables.

On peut, à partir des mesures sur les 3 verticales, proposer un schéma de l'écoulement moyen sous la plaque (fig 7 .a, .b et .c) qui montre l'impact du regroupement en lotissement suivant la condition de houle. Sur ces schémas, on distingue facilement des zones de dépôt potentiel sur le fond pour les clapots 3 et 4.



FIG. 7 - Schéma de la circulation moyenne sous une plaque au milieu d'un ensemble de 5 plaques pour les clapots 1 (—) et 2 (- -) - fortes cambrures et faibles amplitudes (a); pour le clapot 3 (b); et 4 (c) - faibles cambrures et fortes amplitudes (sont indiqués les lignes de courant séparatrices ainsi que les points d'arrêt).

Vitesse orbitale

Dans le cas de la plaque seule, nous comparons nos mesures à un calcul basé sur la théorie linéarisée inspiré de MOLIN & BETOUS [4] (cf fig. 8).

Compte-tenu de la présence de non-linéarités pour les clapots 3 et 4, observées sur les relevés de surface libre, cette comparaison peut paraître illicite même si, près du fond, l'amplitude des harmoniques supérieurs peut être négligée par rapport à celle du fondamental. Pourtant, l'adéquation entre nos mesures et le calcul théorique est assez bonne, exceptée dans des zones localisées. En effet, l'écart entre les mesures et la théorie linéaire reste dans l'incertitude de détermination de la vitesse orbitale, sauf sur la verticale à l'extrémité aval où les mesures révèlent des points de rebroussement caractéristiques.

Rappelons qu'il a été observé, lors d'autres expériences par BROSSARD [7] et BOULLIER & BELORGEY [3], l'éjection sur une période d'une paire de tourbillons contrarotatifs le long de ce bord de fuite. Sur nos mesures, cela se traduit, le long de la verticale proche de l'extrémité aval de la plaque, par une amplitude plus importante du 1^{er} harmonique qu'aux autres points de mesure. On remarque qu'aux deux points de mesures les plus proches du bord d'attaque amont, le 1^{er} harmonique a aussi une amplitude non négligeable mais ce n'est plus vrai le long du reste de la verticale de mesure à l'extrémité amont. Cela signifie qu'il existe bien un mouvement à la fréquence double de la houle : l'éjection de tourbillons. Cependant, pour nos conditions de houle, il semble que la vitesse orbitale de la houle ne soit que très localement modifiée par ces vortex puisqu'aux autres points de mesures, la théorie linéarisée non visqueuse est en bon accord avec les mesures.

Dans le cas d'un ensemble de plaques, nous n'avons pas confronté nos mesures à une

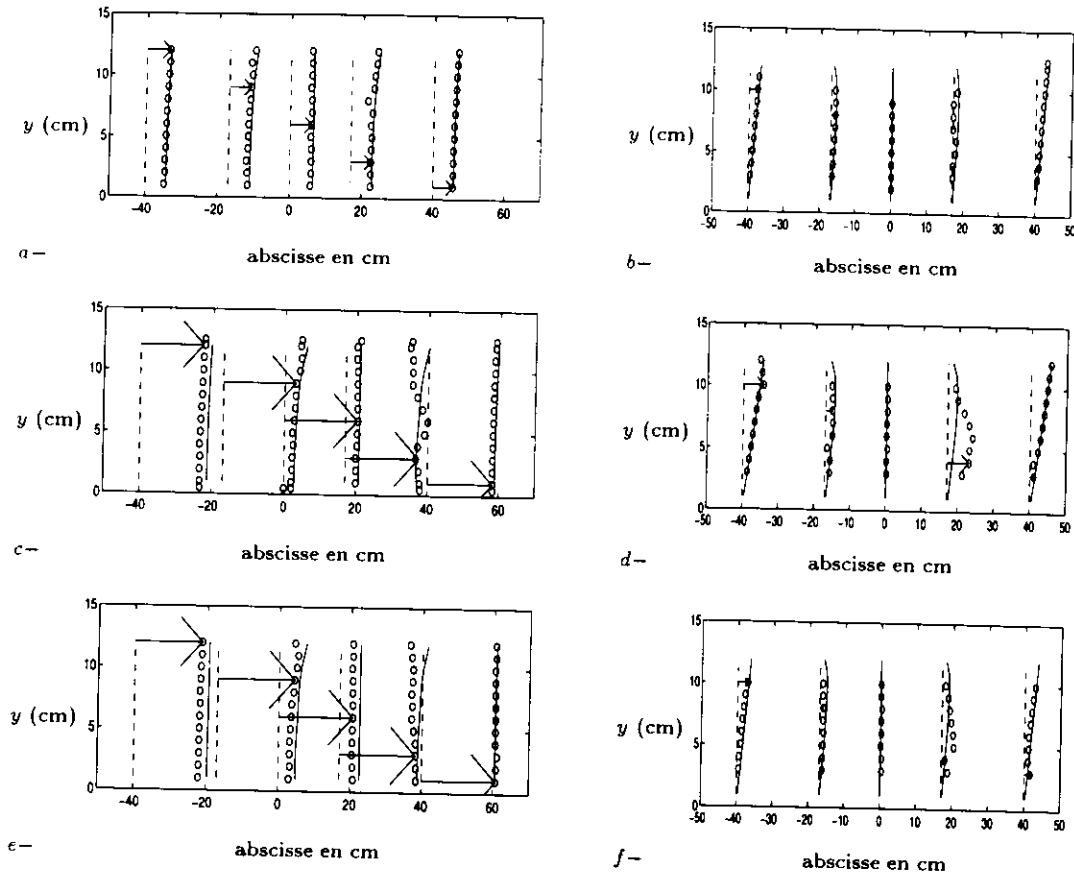


FIG. 8 - Vitesses orbitales horizontales (colonne de gauche) et verticales (colonne de droite) : (a) et (b) clapot 2 ($T=1.06$ s); (c) et (d) clapot 3 ($T=1.65$ s); (e) et (f) clapot 4 ($T=2.47$ s) (Echelle : 1 cm sur les axes = 1 cm/s sur les vecteurs; $x=0$ au milieu de la plaque) (o) mesures LASER - (—) calcul théorique linéaire

solution théorique mais la vitesse orbitale de la houle n'est toujours modifiée que sur la verticale à l'extrémité aval de la plaque, comme le montre la figure 9.

Coefficient de réflexion

Sur les figures 10.a et .b, on représente le coefficient de réflexion en fonction du paramètre kL où L est la demi-longueur d'une plaque et k le nombre d'onde de la houle pour les profondeurs d'eau de 30 cm et 51.5 cm. Le coefficient de réflexion est déterminé de trois façons différentes à partir des relevés de surface libre pour chaque série d'expériences. Il est comparé au calcul théorique linéaire pour le cas de la plaque seule.

L'accord théorie-expérience n'est pas très bon, et il nous semble légitime de mettre en cause la méthode de détermination du coefficient de réflexion expérimental. En effet, les relevés de surface libre présentent des non-linéarités pour certaines de nos conditions de houle et pour les petits nombres d'onde ($kL=0.25$ et 0.4). Cela signifie que le calcul du coefficient de réflexion, tel qu'il est effectué ici, en ne tenant compte que du fondamental, n'est pas valide et n'a peut être même pas de sens. En effet, il évalue le rapport des énergies se propageant à la célérité correspondant à la fréquence fondamentale vers l'obstacle ou s'en éloignant. Il ne tient pas compte des transferts d'énergie entre harmoniques qui ont pu s'effectuer au passage de l'obstacle. Ainsi, il apparaît que seuls les clapots de plus grands nombres d'onde ($kL=0.7$ et 2.1) peuvent être comparés au calcul théorique linéaire. Or,

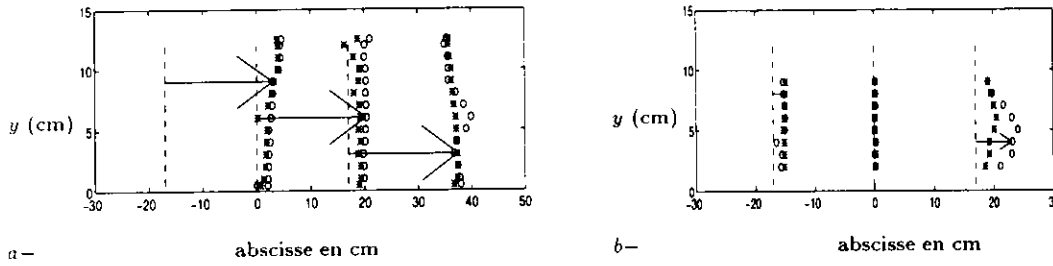


FIG. 9 - Vitesses orbitales horizontales (.a) et verticales (.b) clapot 3 - $T=1.65$ s (Echelle : 1 cm sur les axes = 1 cm/s sur les vecteurs; $x=0$ au milieu de la plaque; (o) mesures LASER 1 plaque - (*) mesures LASER 5 plaques)

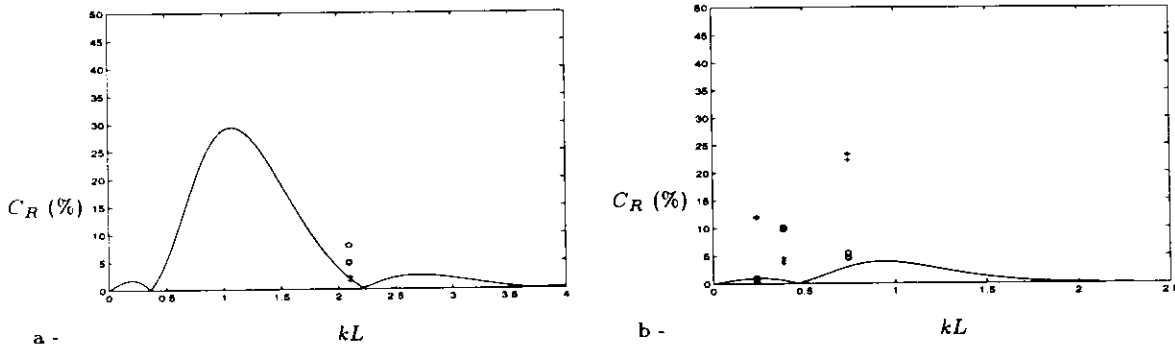


FIG. 10 - Coefficient de réflexion C_R en % en fonction de kL : (a) $h=30$ cm (—) calcul théorie linéarisée; (o) expériences 1 plaque; (+) 5 plaques; et (b) $h=51.5$ cm m (même légende)

l'accord n'est guère meilleur : en tenant compte des incertitudes sur la détermination du coefficient de réflexion que traduit la dispersion des trois points expérimentaux, on observe que le coefficient de réflexion théorique est toujours nettement inférieur à l'expérimental qui vaut pour les deux conditions de clapots environ 5%. L'hypothèse de la théorie linéaire de cambrures infinitésimales n'est peut être plus valable puisque pour nos expériences, les cambrures valent plus de 10%.

Enfin, le coefficient de réflexion de 5 plaques régulièrement espacées pour ces mêmes conditions de clapots, varie par contre d'un clapot à l'autre et peut être relativement important : il vaut presque 25% pour le clapot 2 de longueur d'onde 1.7 m.

5 Conclusion

Pour trois des 4 conditions de houle expérimentées, on retrouve, sous une plaque proche du fond, une circulation moyenne, parfois assez intense, semblable à celle décrite par BOULIER & BELORGEY [3] et BROSSARD [7] pour une plaque située près de la surface, fonction de l'amplitude de la houle essentiellement. La composante périodique de la vitesse est raisonnablement bien décrite par la théorie linéarisée non visqueuse excepté à l'extrémité aval de la plaque où des tourbillons sont éjectés. Par contre, le coefficient de réflexion de l'obstacle nous paraît grossièrement estimé par la théorie linéaire pour des clapots de cambrures moyennes. Le regroupement en lotissement des plaques modifie fortement la circulation moyenne sous les plaques centrales pour les conditions de houles de fortes amplitudes et de grandes longueurs d'onde. On observe l'apparition de points d'arrêt ou de zones de faibles vitesses sous la plaque près du fond. Ces deux dernières

caractéristiques ont sans doute un rôle dans le dépôt de sédiments observé in-situ dans les parcs à huîtres. Il est cependant à noter que l'on ne tient pas compte de la porosité des poches dans lesquelles sont placées les huîtres.

Remerciements Ce travail n'aurait pu être entrepris sans l'aide financière de l'IFREMER et du LHF sous le contrat n° 91 5 526008.

Références

- [1] DROUIN A. and OUELLET Y. Utilisation du phénomène du mur d'eau oscillant pour la protection des sites côtiers. In *Comptes rendus Conférence Canadienne sur le littoral*, pages 211–224, 1987.
- [2] BOULIER B. *Evolution spatio-temporelle de structures tourbillonnaires dans la houle*. PhD thesis, Université du HAVRE, juin 1996.
- [3] BOULIER B. and BELORGEY M. Ecoulement tourbillonnaire et zone d'affouillement générés par la houle en présence d'une plaque immergée. Note interne - Université du HAVRE, 1990.
- [4] MOLIN B. and BETOUS P. Atténuation de la houle par une dalle horizontale immergée et perforée. In *Comptes rendus des 4 ième journées de l'hydrodynamique - Nantes*, pages 387–400, 1993.
- [5] MEI C.C. *The applied dynamics of ocean surface waves - Advanced series on Ocean Engineering*, volume 1, page 443. World Scientific, 1992.
- [6] Laboratoire d'Hydraulique de France. Contribution à l'étude de l'agitation dans le bassin de marennes-oléron (houle et clapot). Rapport final d'étude - Contrat n° 91 5 526008, 1992.
- [7] BROSSARD J. *Contribution à l'étude de la turbulence à travers l'analyse d'un écoulement généré par la houle entre deux plaques*. PhD thesis, Université de ROUEN, 1986.
- [8] SORNIN J.-M. *Processus sédimentaires et biodéposition liés à différents modes de conchyliculture*. PhD thesis, Institut des Sciences de la Nature de l'Université de NANTES, décembre 1981.
- [9] PATARAPANICH M. and CHEONG H.-F. Reflection and transmission characteristics of regular and random waves from a submerged horizontal plate. *Coastal Engineering*, 13:161–182, 1989.

