Étude par vélocimétrie Doppler laser du champ des vitesses instantanées dans une houle produite en laboratoire

A study using Laser Doppler Velocimetry of instantaneous velocities in a laboratory produced swell

M. Bélorgey et J. Le Bas

Laboratoire de Mécanique des Fluides, U.E.R. Sciences et Techniques
Place Robert Schuman, 76610 Le Havre

Figure 1 — Schéma du canal à houle.

L'étude des vagues est restée pendant plus d'un siècle l'une des très rares branches de la science pour laquelle on en savait beaucoup plus par le calcul théorique que par des observations ou par des mesures directes dans la nature. Jusqu'à ces derniers temps la reproduction de la houle en laboratoire, permettait surtout de mieux connaître le mouvement des particules d'eau en visualisant leurs trajectoires, de mesurer globalement les efforts exercés, par les vagues, sur des structures en modèles réduits, et d'en apprécier les effets globaux.

Un des aspects de la houle encore peu abordé à ce jour est la mesure des vitesses instantanées des particules d'eau dans la houle produite en laboratoire. Or la connaissance de la cinématique des particules fluides permet de connaître les efforts hydrodynamiques instantanés et d'aborder le problème d'interaction houle-structure de façon plus fine.

La seule technique actuellement exploitable pour ce type d'étude est la vélocimétrie Doppler à laser (VDL), et Anastasiou, Tickel et Chapun (1982) ont déjà abordé ce problème dans le cas de mesure en continu dans une houle aléatoire.

Une technique de mesure permettant de déterminer le

champ des vitesses instantanées pour une position bien définie dans la vague est présentée ici.

Conditions expérimentales

Le canal à houle a une section de 0,8 m de large sur 1 m de haut ce qui permet une profondeur d'eau de 0,75 m. La longueur utile de la veine d'essais est de 6 m.

Le générateur de houle monochromatique est du type immergé associé à un diffuseur souple. Il est alimenté par un moteur à courant continu muni d'un excentrique permettant de faire varier de façon continue la longueur d'onde λ et la hauteur H de la houle. Le schéma du canal est représenté sur la *figure 1*.

La plage d'amortissement est formée de 3 étages de plans inclinés constitués d'éléments filtrants permettant l'absorption de l'énergie cinétique des vagues dans toute la masse du fluide. Elle nous permet d'obtenir un coefficient de réflexion moyen de l'ordre de 6 %. Chiffre voisin de celui obtenu au laboratoire de Liverpool lors des essais d'Anastasiou (1982) dans un canal de section voisine.

Les résultats correspondants aux diverses houles produites sont regroupés sur la *figure 2*, où nous avons tracé l'évolution de la longueur d'onde λ en fonction du carré T^2 de la période T . Ils indiquent que la longueur de la veine d'essais ne nous permet pas d'obtenir dans de bonnes conditions la reproduction de modèles de houle de longueur d'onde supérieure à 2 m.

Instrumentation

Mesure de la houle

Le détecteur utilisé est un des plus répandu, il est à effet résistif. Cet appareil fonctionne sur le principe de la mesure d'un courant passant dans une sonde constituée d'une paire de conducteurs parallèles inoxydables. Ces conducteurs étant plongés dans l'eau, le courant les parcourant est proportionnel à la profondeur instantanée d'immersion.

Le signal délivré est mis en mémoire. A cet effet nous utilisons une mémoire numérique à 2 voies de 4 k mots. La valeur numérique du signal analogique est exprimée sur 8 bits offrant ainsi une résolution de 0,4 %.

Un micro-ordinateur associé à 2 unités de disquettes est relié à la mémoire numérique. Le logiciel que nous avons créé nous permet alors de déterminer :

- la période de la houle;
- l'amplitude;
- la célérité de l'onde;
- la longueur d'onde;
- la décomposition du signal en série de Fourier.

Cette décomposition en série de Fourier nous a permis, en comparant les résultats obtenus aux différents modèles classiques de houle, de retenir le modèle théorique de Miche (1944) comme étant celui qui représentait le mieux la houle produite dans notre canal.

Vélocimétrie Doppler laser

Le moyen le plus approprié actuellement pour mesurer les vitesses des particules d'eau mises en mouvement par la propagation de la houle est le vélocimètre Doppler laser (VDL). Il a l'avantage de ne pas perturber l'écoulement et ne nécessite pas d'étalonnage. Le principe est basé sur la mesure du décalage de fréquence de la lumière émise par une particule, en mouvement dans un fluide et éclairée par une onde monochromatique.

La lumière émise par chaque particule traversant le domaine de mesure est recueillie par un photomultiplicateur dont le signal est analysé par un compteur (TSI type « 1980 ») pour validation et mesure de la fréquence Doppler.

Nous ne détaillons pas ici le principe de la méthode VDL. Il a déjà fait l'objet de nombreuses publications. Yeh et Cummins (1964), Gouesbet (1973), et un nombre important d'articles dans les revues spécialisées des sociétés TSI et DISA.

Cette technique de mesure, actuellement exploitée dans le cas d'écoulements pour lesquels la composante mesurée de la vitesse moyenne est toujours positive et même le plus souvent indépendante du temps, a été adaptée ici à la mesure des vitesses des particules fluides dans la houle.

Les particules fluides dans la houle ayant un mouvement orbital, il était indispensable de connaître la position de la vague par rapport au point de mesure, de manière à définir le champ des vitesses pour des positions identiques de vagues successives.

Ceci nous a conduit à créer une interface (déclencheur) entre le détecteur de houle et le compteur des vitesses TSI type 1980. Cette interface inhibe le compteur tant que la vague n'est pas dans la position particulière choisie, et contrôlable, par rapport au point de mesure; puis elle autorise la mesure pendant un court intervalle de temps (réglable).

La *figure 3* représente le principe de la mesure. Pour plus de précision l'interface est armée pour la mesure lorsqu'au droit de la sonde la vague passe par le niveau zéro (pente maximale de la surface libre) mais le déclenchement de la mesure est retardé d'une valeur t_1 permettant à la vague de se présenter dans la position désirée à l'endroit de la mesure. $t_1 = d/c$, où d est la distance entre la sonde pilotant l'interface, et la position du point de mesure, et c la célérité de l'onde.

La *figure 4* représente l'ensemble de la chaîne de mesure et son principe de fonctionnement.

Pour une position de vague choisie, la vitesse moyenne en un point est obtenue à l'aide d'une mesure statistique sur plusieurs vagues successives. Les données fournies par le compteur pour chaque vague, sont donc stockées sur disquettes puis traitées par l'ordinateur lorsque la taille de l'échantillonnage (fixée entre 256 et 4000 valeurs) est atteinte.

Le traitement statistique des données nous permet de définir en un point :

- la vitesse moyenne;
- l'écart type de l'échantillon de mesure (TRBI);
- la fonction de densité de probabilité en amplitude.

La *figure 5* reproduit les fonctions de densité de probabilité pour deux points de mesure particuliers : Fig. 5a, $z = -9$ cm, composante horizontale maximale; fig. 5b, $z = -9$ cm, composante horizontale faible.

Remarques :

1) Dans notre cas, l'écart type TRBI ne correspond pas au taux de turbulence, mais à la dispersion de la mesure due à la variation de la vitesse pendant le temps de mesure et aussi au fait que les vagues successives ne sont pas toutes identiques.

2) Le système de mesure utilisé ne possédait pas de cellule de Bragg permettant de déterminer le signe de la vitesse ainsi que la mesure de vitesses nulles. Or le vélocimètre Doppler laser sans cellule de Bragg privilégie la validation des vitesses les plus grandes et devient inopérant pour les vitesses très faibles. C'est donc pour les phases de la houle qui donnent les vitesses maximales que la précision est la meilleure et celles pour lesquelles les vitesses sont très faibles que l'incertitude est la plus grande.

Figure 2 — Evolution de la longueur d'onde des houles produites dans le canal en fonction du carré de la période.

Figure 3 — Principe de la mesure.

Figure 4 — Schéma de la chaîne de mesure.

Figure 5 — Fonctions de densité de probabilité pour un point de mesure situé à $z = -9$ cm.
a) déphasage correspondant à $\lambda/4$ (mesure dans une section où la composante horizontale des vitesses est maximale)
b) déphasage correspondant à $\lambda/2$ (mesure dans une section où la composante horizontale des vitesses est nulle).

Résultats

Variation de la composante horizontale maximale U et de la composante verticale maximale W de la vitesse en fonction de la profondeur.

Nous avons recherché l'évolution des composantes de la vitesse instantanée des particules en fonction de la profondeur pour différentes houles générées dans le canal.

Les résultats présentés correspondent à deux séries de mesures, pour chacune d'elle le retard t_1 a été adapté de manière à ce que au point de mesure la vague se présente dans la position où :

- la vitesse horizontale des particules fluides est maximale (fig. 6a) ;
- la vitesse verticale des particules fluides est maximale (fig. 6b).

Les résultats sont traduits en variables adimensionnelles $U/(H/T)$ ou $W/(H/T)$ et z/λ et sont regroupés sur les figures 6a et 6b.

Ils sont comparés à la courbe d'évolution théorique donnée par le modèle de houle irrotationnelle de Miche.

Ces mesures ont été effectuées dans une section du canal choisie arbitrairement, le niveau d'eau au repos étant de 0,7 m. La taille de l'échantillon pour les calculs statistiques était fixée à 256 valeurs. Ce nombre peut paraître faible, mais c'est un compromis entre le nombre de valeurs souhaitables et le temps d'enregistrement. En effet, en raison de la technique de mesure, (les mesures sont faites sur plusieurs vagues successives) nous limitons le temps d'enregistrement pour éviter une éventuelle évolution de la houle.

Sur la figure 6a, nos résultats concernant la composante horizontale sont en accord avec le modèle théorique de Miche et le prolongent dans la partie supérieure de la vague ($z > 0$). Par contre, en ce qui concerne la com-

posante verticale (fig. 6b) la valeur réelle est supérieure à celle donnée par le modèle théorique, surtout dans le tiers supérieur de la courbe où cet écart est de l'ordre de 15 %.

Variation de U et W en fonction de la phase de la houle pour une profondeur donnée :

Nous avons recherché l'évolution des composantes U et W pour différentes positions de la vague par rapport au point de mesure.

Les résultats sont traduits sur les figures 7 et 8 et comparés aux évolutions théoriques dans le cas de la houle irrotationnelle de Miche.

Au cours de cet essai la hauteur d'eau était de 0,7 m et le point de mesure situé à 9 cm en-dessous du niveau de repos. La période de la houle produite était de 0,83 secondes et son amplitude de 0,10 m.

Sur ces figures nous avons tenu compte du signe des composantes des vitesses en nous référant à la théorie, en effet, ne possédant pas de cellule de Bragg, nos mesures ne nous permettaient pas de le déterminer.

Deux points sont très éloignés de chaque courbe pour les valeurs nulles de la vitesse théorique. Ils ne sont pas significatifs sur le plan expérimental, car le principe de la mesure, sans cellule de Bragg, tend à privilégier la prise en compte des particules les plus rapides d'où une grande imprécision pour les mesures relatives à une position de la vague pour laquelle la composante de la vitesse à mesurer est nulle.

Les autres points sont proches de la sinusoïde représentant les variations théoriques de U et W , ce qui laisserait sous-entendre qu'il n'y a pratiquement pas de courant d'entraînement à cette profondeur.

Conclusion

La technique de mesure que nous avons mis au point nous a permis d'effectuer une analyse fine du champ des vitesses dans la houle et de comparer les résultats obtenus au modèle théorique pour la houle que nous avons générée.

Nous n'avons présenté ici que les résultats correspondants à une section arbitraire du canal. Les résultats complets sont donnés dans la thèse de J. Le Bas (1983). Ils conduisent aux mêmes conclusions quel que soit le déphasage de la mesure, ou l'amplitude de la houle, ou encore sa longueur d'onde.

En ce qui concerne la composante horizontale des vitesses des particules fluides, nos résultats expérimentaux sont en accord avec le modèle théorique et le prolongent dans la partie supérieure de la vague.

Par contre, en ce qui concerne la composante verticale de la vitesse, nous avons montré que la mesure de celle-ci était supérieure à la valeur donnée par le modèle théorique, surtout dans la partie supérieure de la masse d'eau où l'écart peut atteindre 15 %.

Cette technique de mesure des vitesses instantanées des particules fluides dans la houle doit être améliorée par l'adjonction d'une cellule de Bragg dans la chaîne de mesure par VDL, de manière à accroître la précision des résultats dans le cas des faibles vitesses. Mais d'ores et déjà, elle ouvre à l'expérimentation l'étude de la turbulence autour des structures offshore soumises à l'action des vagues.

Figure 6 — Evolution des composantes horizontales et verticales des vitesses des particules fluides en fonction de la profondeur.
a) composantes horizontales
b) composantes verticales.

Figure 7 — Évolution de la composante horizontale des vitesses des particules fluides en fonction de la phase pour une profondeur $z = -9$ cm.

Figure 8 — Évolution de la composante verticale des vitesses des particules fluides en fonction de la phase pour une profondeur $z = -9$ cm.

Références bibliographiques

- ANASTASIOU, TICKEL et CHAPUN. — Measurements of particle velocities in Laboratory sole random waves, *Coastal Engineering* 6 (1982) p. 233-254.
- GOUESBET. — *Réalisation d'un anémomètre Doppler à Laser. Application à l'étude des écoulements liquides*. Thèse de 3^e cycle 1973 — Université de Rouen.
- LE BAS. — *Étude expérimentale du champ des vitesses instantanées dans un canal à houle*. Thèse de 3^e cycle 1983 — Université de Haute Normandie — UERST Le Havre.
- MICHE. — Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur croissante ou décroissante. *Annales des P. et C.*, Paris 1944.
- YEH et CUMMINS. — Localized fluid flow measurement with on the Ne Laser spectrometer. *Applied physics letters*, vol. 4, 10 may 1964, pp. 176-178.
- DISA. — *L'anémomètre thermique et l'anémométrie Doppler à laser* (1980). DISA Elektronik A/S - DK 2740 Skovlunde, Denmark.
- TSI. — *Laser anemometry theorie — Applications and techniques*. TSI Inc., P.O. Box 43 394, St Paul, MN 55 164 USA.
-