



Effets tourbillonnaires du système « Mur d'Eau Fixe »

C. Colmard

Doctorant, L.M.F.G.C., Université du Havre.

M. Bélorgey.

Professeur des Universités, L.M.F.G.C., Université du Havre

1. Résumé

La construction des digues en eau profonde pose de nombreux problèmes dont en particulier celui du volume considérable de matériaux nécessaires à la réalisation. Pour remédier à cette difficulté, un nouveau type d'ouvrage a fait son apparition. Il s'agit d'une structure montée sur pieux. Ce type d'ouvrage ne se comporte pas comme une digue ordinaire et le phénomène caractérisant son fonctionnement est appelé "Mur d'Eau Fixe". De façon à mieux connaître ses caractéristiques, nous l'avons analysé sur modèle réduit et nous avons effectué une étude à la fois expérimentale et numérique. Cette étude met en évidence l'importance des phénomènes tourbillonnaires générés par le système « mur d'eau fixe » tant au niveau moyen qu'instantané. Les conséquences au niveau des fonds marins et de la structure sont montrées. L'importance de la dissipation d'énergie par les tourbillons est exprimée pour une période de houle définie.

2. Présentation de l'expérience

Les mesures ont été réalisées dans un canal à houle de 25 m de long et 0.8 m de large. La profondeur d'eau pour l'expérience était de 0.63 m et l'immersion du caisson de 0.14 m.

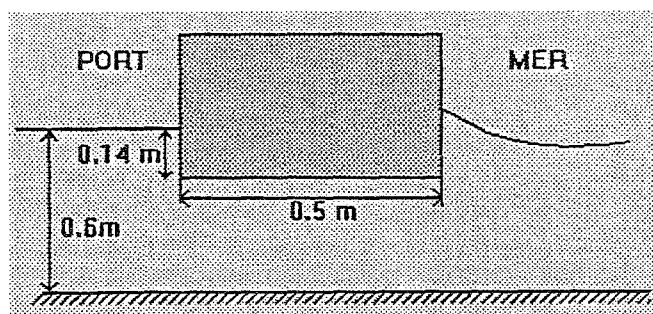


Fig. 1. Maquette étudiée.

La profondeur du caisson était de 0.5 m.

Les mesures qui ont été réalisées sont essentiellement des mesures de vitesses obtenues par vélocimétrie laser. Une série de visualisations a également été faite.

3. Etude théorique du phénomène « mur d'eau fixe »

3.1. Tourbillons observés

Le caisson est soumis à l'action de la houle qui est un phénomène cyclique. Lors de l'ascension de la vague sur la paroi côté mer, de fortes vitesses verticales dirigées vers le haut se développent devant le caisson. Cette masse d'eau en ascension est alimentée en partie par la masse d'eau placée sous le caisson. De ce fait, les vitesses sous le caisson sont globalement horizontales et dirigées vers le large lors de la phase d'ascension.

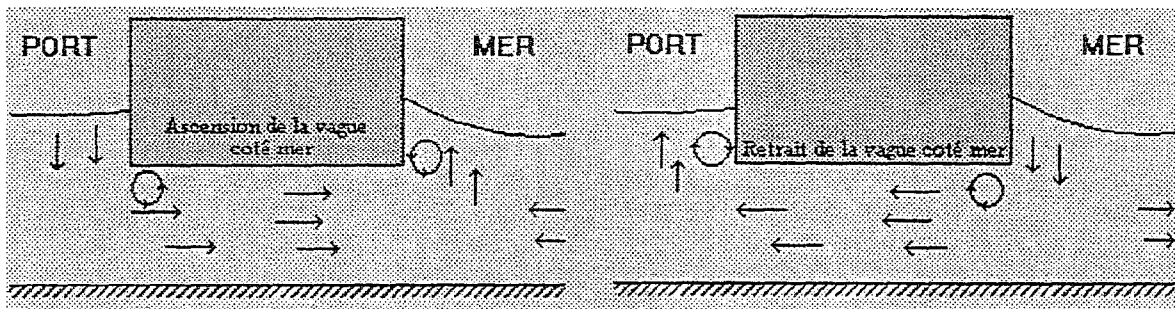


Fig. 2. Interaction des vitesses verticales et des vitesses horizontales.

Le phénomène inverse se produit lors du retrait de la vague. Du côté du port les vitesses horizontales se transforment en vitesses verticales pour épouser la géométrie du caisson. Aux arêtes du caisson, il y a donc une combinaison de vitesses horizontales et verticales qui va générer des tourbillons décrits sur la figure 2. L'activité des tourbillons dépend de l'intensité des vitesses aux arêtes. Cette intensité pour le côté mer varie en fonction de la hauteur de la vague incidente et de la période de la houle. Pour le côté port l'intensité de la paire de tourbillon va dépendre de la hauteur de la vague transmise et de la période de la houle.

3.2. Influence du coefficient de transmission sur l'activité tourbillonnaire

D'après nos résultats antérieurs [1] nous avons mis en évidence que le coefficient de transmission K_t (hauteur de vague transmise / hauteur de vague incidente) est essentiellement dépendant de la géométrie du caisson considéré, de la profondeur d'eau, de l'immersion de la structure et surtout de la période. Ces résultats confirment ceux de R. Bouchet et J. Manzonne [2] qui ont établi une loi simple pour caractériser le coefficient de transmission :

$$K_t = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi \cdot W \cdot d}{K \cdot L \cdot (d - i)} \right)^2}} \quad \text{avec} \quad K = \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot (d - i)} \left(e^{-2\pi \cdot i / L} - e^{-2\pi \cdot d / L} \right)$$

avec :

- W profondeur du caisson.
- L la longueur d'onde.
- i l'immersion du caisson.
- d la profondeur d'eau.

La courbe de la figure 3 montre une bonne concordance entre nos résultats et ceux obtenus dans d'autres laboratoires possédant des canaux plus importants ([2] [3]). On constate donc que l'importance de l'intensité de la paire de tourbillons amont et aval dépend de la période de la houle et de la hauteur de la vague incidente. On en déduit également que l'importance énergétique de la paire de tourbillon aval par rapport à celle amont dépend essentiellement du coefficient de transmission.

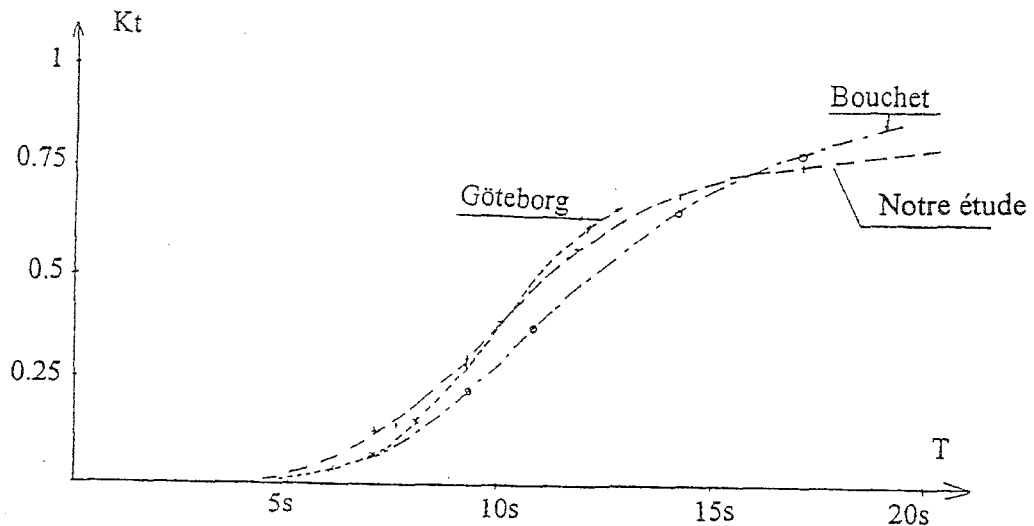


Fig. 3. Influence de la période sur le coefficient de transmission pour un caisson de 40 m de large immergé de 10 m dans 50 m d'eau.

3.3. Influence des tourbillons sur le phénomène moyen

Ces tourbillons entraînent un phénomène de circulation sous le caisson comme le montre la figure 5. La circulation développée par le tourbillon aval est plus ou moins activée selon l'importance du tourbillon développé coté port. La circulation développée par le tourbillon coté mer est donc plus ou moins en compétition avec celle aval suivant la valeur du coefficient de transmission.

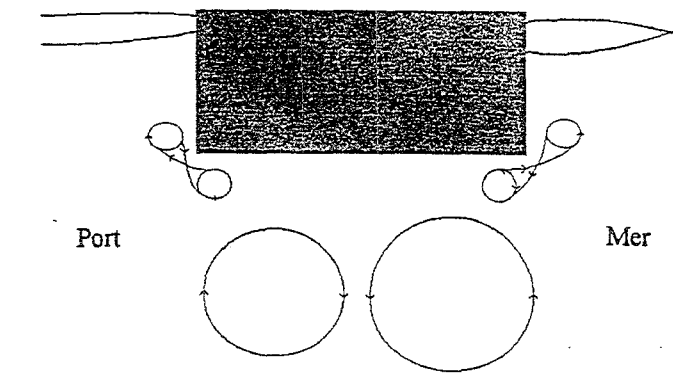


Fig. 4. Circulations engendrées par les tourbillons.

4. Résultats Expérimentaux

4.1. Influence des tourbillons sur le phénomène « mur d'eau fixe »

Les résultats, tant au niveau des visualisations que du champ des vitesses obtenu par vélocimétrie laser, montrent bien le phénomène décrit précédemment. Pour les petites périodes, seule la paire de tourbillons amont est active, l'agitation dans le port étant pratiquement nulle. La figure 6 montre la circulation générée sous le caisson. Pour une houle de période 1 seconde, la fréquence de rotation de la circulation est d'un tour pour 159 périodes de houle.

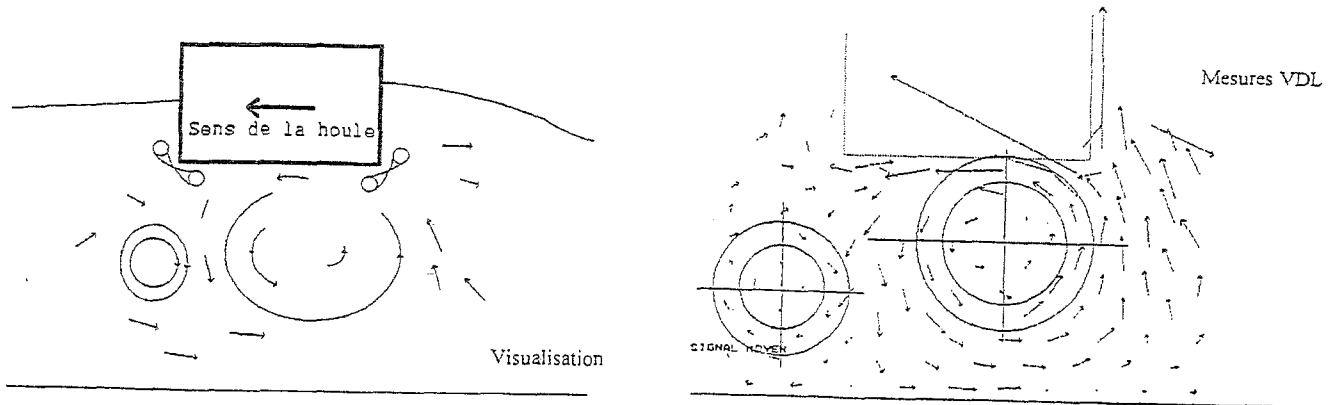


Fig 5. Circulations décrites pour une période de houle de 1 seconde.

Pour la période $T = 1.8$ secondes, le coefficient de transmission est beaucoup plus important : $K_t = 0.53$, la paire de tourbillon coté port est donc beaucoup plus active que précédemment. De ce fait une deuxième circulation apparaît sous le caisson (voir la figure 7).

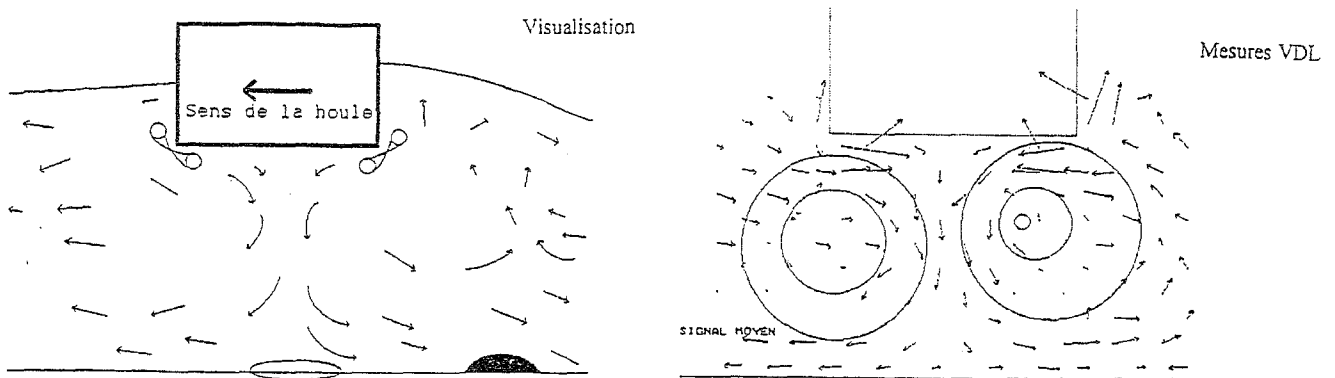


Fig. 6. Circulations décrites pour une période de houle de 1.8 secondes.

La fréquence de rotation de la circulation générée par le tourbillon coté mer est de un tour pour 52 périodes de houle et la fréquence de rotation de la circulation générée par le tourbillon côté port est de un tour pour 60 périodes de houle.

Période	K1	Fréquence de rotation de la 1 ^{er} circulation	Fréquence de rotation de la 2 ^e circulation	Vitesse de balayage de la 1 ^{er} circulation	Vitesse de balayage de la 2 ^e circulation	Vitesse de balayage de la 1 ^{er} circulation	Largeur du caisson
1 s	0.25	159 T/tour		- 0.0065		- C/240	0.31 L
1.2 s	0.41	58.8 T/tour		- 0.024		-C/74	0.23 L
1.8 s	0.53	60 T/tour	52 T/tour	- 0.0126	0.012	-C/170	0.13 L

Fig 7. Tableau récapitulatif

4.2. Balayage du fond

On constate donc que le phénomène moyen est beaucoup plus actif pour les grandes périodes. Les circulations générées sous le caisson ont une influence sur le fond marin. Elles réalisent un balayage du sol même dans le cas de grande profondeur d'eau. Lorsque la période est petite, le balayage est simple et dirigé vers le large. On constate une accumulation de sédiments à l'avant du caisson. Comme le montre la figure 8. Cette accumulation est due au fait que la circulation est suffisamment active pour stopper le courant moyen de fond dirigé vers la plage d'amortissement. Pour des périodes plus importantes, la circulation générée par le tourbillon, côté port, prend de l'importance et on constate un double balayage sous le caisson. Pour la période de une seconde, la vitesse de balayage simple est de -0.0065 m/s soit $C/240$ (C étant la célérité de la houle). Pour une période de 1.8 secondes, la vitesse de balayage vers la mer est de 0.012 m/s soit $C/180$ et la vitesse de balayage vers le port est de -0.0126 m/s soit $C/170$. L'accumulation de sédiment à l'avant du caisson est encore plus importante que pour la période de 1 s.

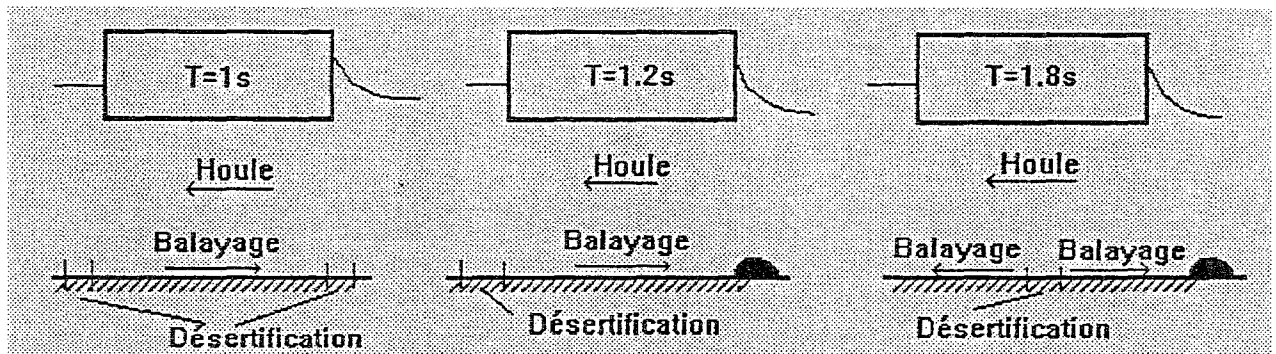


Fig. 8. Balayage du fond marin.

5. Importance de la dissipation énergétique des tourbillons

5.1. Visualisation du tourbillon

Pour permettre d'apprécier le pourcentage d'énergie de la houle dissipée par les effets tourbillonnaires, nous avons mesuré très finement le champ des vitesses dans une portion de fluide incluant le tourbillon amont généré lors de phase de retrait de la vague sur le caisson. Cette expérience a été réalisée avec la configuration énoncée au début du texte. La période de houle

utilisée est 1.5 secondes. La figure 9 montre le champ des vitesses instantanées au moment de la création du tourbillon, puis au moment de son évacuation vers le large.

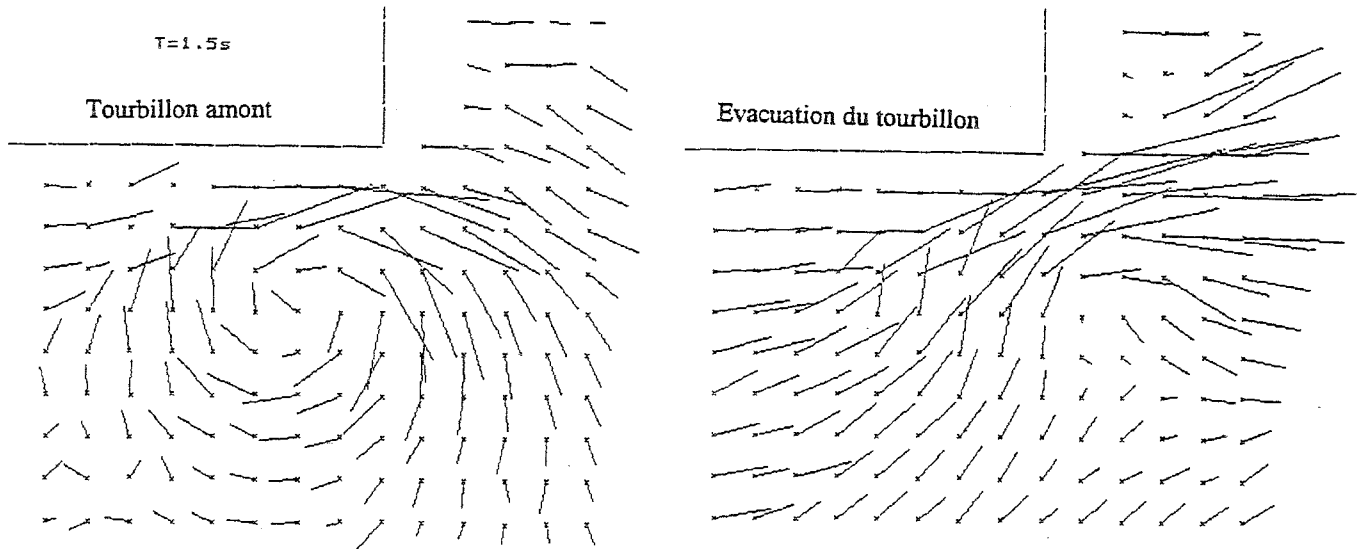


Fig. 9. Champ des vitesses instantanées du tourbillon amont.

Le principe de formation puis d'éjection du tourbillon est également visible sur la figure 10 qui nous montre le champ des vitesses moyennées sur une période.

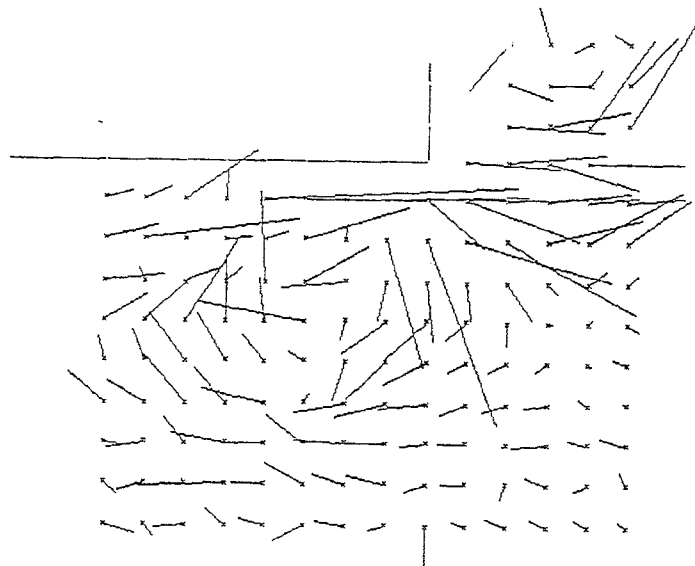


Fig. 10. Champ des vitesses moyennées.

Lorsque l'on trace le champ des isorotationnels, on peut localiser d'avantage le tourbillon, sa création et sa dispersion (voir figure 11).

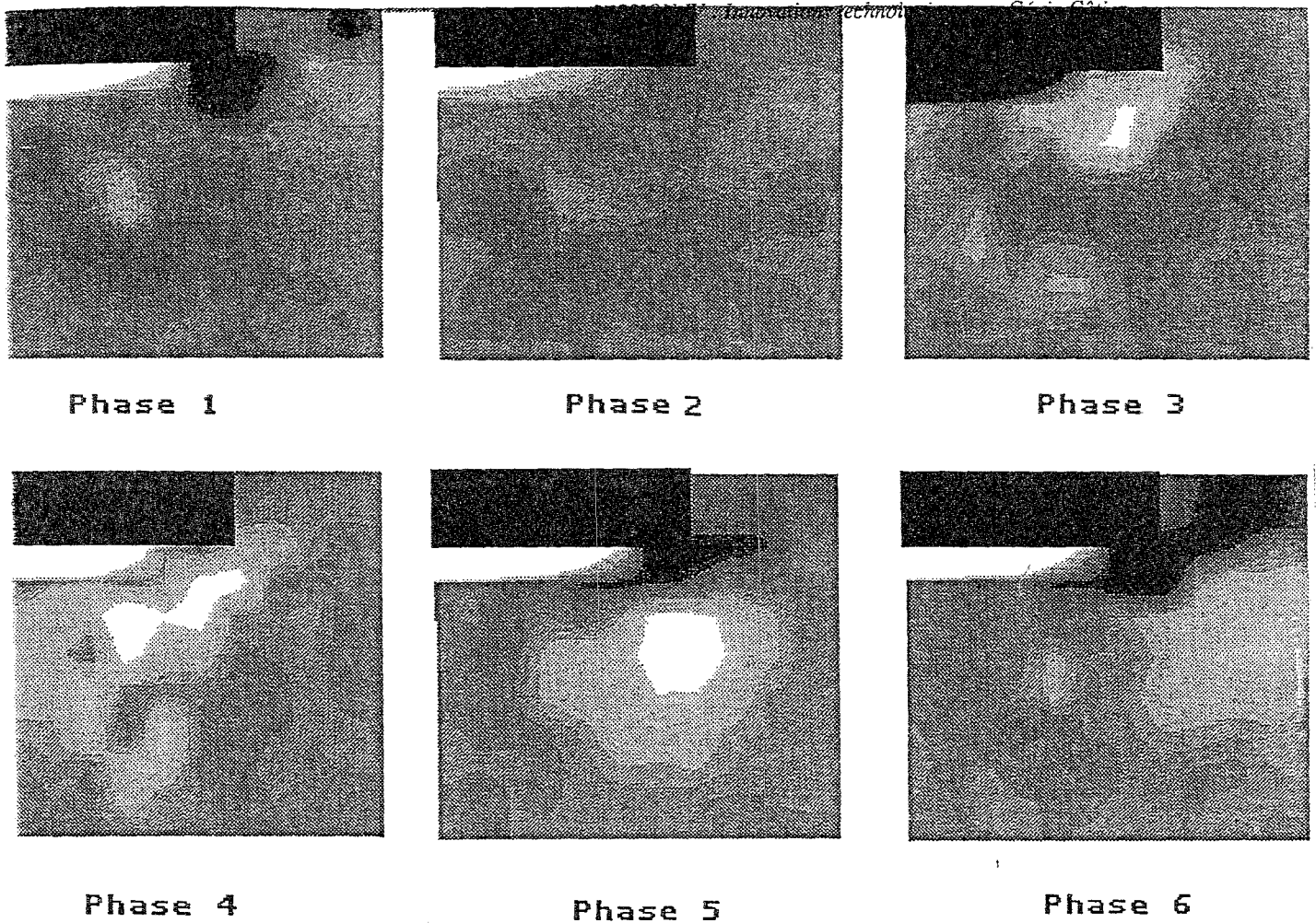


Fig. 11. Champ des rotationnels du tourbillon amont.

5.2. Expression de l'énergie de la houle

En partant des équations de Stokes [4], on peut calculer le flux moyen ϕ d'énergie émis par la houle devant l'ouvrage :

L'expression du potentiel de houle suivant Stokes s'écrit:

$$\phi = -\frac{gHT}{4\pi} \frac{ch\left(2\pi\frac{z+d}{L}\right)}{ch\left(2\pi\frac{d}{L}\right)} \sin\left(2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{L}\right)\right) \quad (1)$$

avec :

- H hauteur de la vague incidente.
- T période de la houle.
- d profondeur d'eau.

D'où on peut calculer ϕ le flux moyen d'énergie de la houle incidente :

$$\phi t = -\frac{\rho}{T} \int_{-d}^0 \int_0^T \frac{\partial \phi}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial x} dz . dt \quad \phi t = \frac{1}{16} \rho g H^2 C \left(1 + \frac{4\pi \frac{d}{L}}{\text{sh} \left(4\pi \frac{d}{L} \right)} \right) \quad (2)$$

avec : C : Célérité de la houle.

Appliqué à notre expérience on obtient un flux d'énergie moyen produit par la houle devant le caisson égale à 14.8 kg.m/s³.

5.3. Expression de l'énergie absorbée par le tourbillon

Pour déterminer l'énergie dissipée dans le volume englobant le tourbillon, on utilise l'équation de bilan intégral d'énergie pour connaître e l'énergie interne:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \text{div}(\rho e \vec{V}) = -p \text{div} \vec{V} + \phi \quad \phi = \mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \quad (3)$$

Avec :

- e : Energie interne.
- ρ : densité du fluide.
- μ : Viscosité dynamique.
- p : pression.
- V_1 : Vitesse horizontale U.
- V_2 : Vitesse verticale V.

La pression p est calculée en utilisant l'équation de conservation de la quantité de mouvement suivant l'axe des y.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g - \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Pour calculer le champ de pression avec cette formule, il est nécessaire de connaître p sur au moins une ligne horizontale du volume étudié. Pour cela des mesures de pressions sous le caisson nous permettent de connaître p à la paroi. Les dérivées spatiales et temporelles sont calculées par différences centrées.

Pour calculer e on discrétise l'équation (3) par la méthode des différences finies centrées. Il est possible de mettre l'équation discrétisée sous la forme d'un matrice tridiagonale fonction du temps. Pour connaître e(t) dans cette matrice, on utilise l'algorithme de Thomas [5]. Connaissant e et le champ des vitesses on peut calculer le flux d'énergie dissipé dans le volume pendant la période par la formule suivante :

$$\varphi_d = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h \left(\rho e + \rho \frac{V^2}{2} \right) \vec{V} \cdot \vec{n} \, dS \, dt \quad (5)$$

Après calcul on trouve un flux d'énergie dissipé durant la période de la houle égale à 1.76 kg.m/s³. Ce résultat s'il n'est qu'approximatif, révèle l'importance de la dissipation énergétique par les tourbillons dans le système « Mur d'eau fixe ». Le tourbillon amont dans cette configuration absorbe 13.8 % de l'énergie de la houle. Une autre approche du calcul de la dépense d'énergie par le tourbillon peut être réalisée en s'interrogeant sur le rapport qu'il peut exister entre l'intensité d'un tourbillon ($I = \iint_S \vec{Rot} \cdot \vec{V} \, dS$) et le calcul d'énergie.

6. Conclusion

Cette étude nous révèle l'existence de tourbillons actifs dans le phénomène « Mur d'Eau Fixe ». Ces tourbillons sont plus ou moins efficaces suivant la période de houle considérée et ils conditionnent dans une grande part les effets d'érosion et d'accumulation de sédiments constatés sous le caisson. Les circulations qu'ils génèrent sous le caisson ont des fréquences de rotation qui ne sont pas négligeables pour les grandes périodes. Cette étude met en évidence que le système « Mur d'Eau Fixe » induit des effets moyens non négligeables, que les courants marins peuvent être modifiés au environ de la structure et qu'une zone de désertification sous le caisson peut avoir des conséquences non négligeable sur l'encastrement des pieux soutenant la structure et sur l'écosystème marin. Au niveau énergétique on constate que les tourbillons contribuent au rendement du système atténuateur de houle. Ce type de perte d'énergie peut être un bon moyen pour casser la houle sans provoquer d'efforts importants sur la structure.

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une bourse C.I.F.R.E. en collaboration avec la société Bouygues Offshore.

7. Références

- [1] L. Auperin, C. Colmard, M. Belorgey Modélisation physique des digues de type « Mur d'Eau Fixe », Cités marines '95 p 119 , Monaco, Novembre 1995.
- [2] René BOUCHET J. M. MANZONE, Le mur d'eau. Dispositif nouveau de brise-houle en eau profonde, P.I.A.N.C . - A.I.P.C.N. - Bulletin 1986 - N° 52 pp 60-77.
- [3] A Sjöberg, Rectangular Ponton : Transferability of model test. Results to prototype Conditions, 04/1988.
- [4] R. Bonnefille, Cours d'hydraulique maritime 3e Edition, MASSON, p 31.