

Dynamique tourbillonnaire dans un champ de houle

G. PERRET^a, A. POUPARDIN^a ET J. BROSSARD^a

a. Laboratoire Ondes et Milieux Complexes (LOMC), 53, rue de Prony, BP 540, 76058 LE HAVRE Cedex

Résumé :

Une structure immergée dans un champ de houle génère des filaments tourbillonnaires qui peuvent fortement interagir avec le fond marin. La compréhension de la dynamique de ces filaments est primordiale pour l'étude de l'impact environnemental d'une structure immergée. Cette étude présente des résultats préliminaires sur la dynamique de tourbillons générés par une plaque plane horizontale dans un canal à houle. Les caractéristiques des tourbillons sont déterminées, dans un premier temps, dans un plan 2D perpendiculaire à l'axe du tourbillon. A chaque période, un tourbillon est généré à l'extrémité de la plaque et advecté vers le fond du canal générant une forte interaction avec le fond.

Abstract :

A submerged structure in a coastal zone generates strong vortex filaments through wave's action. Those vortices may strongly interact with the bottom and perturb the environment close to the structure. In this paper, we present preliminary results on vortex dynamics generated by a horizontal plate in a wave flume. At first, vortex characteristics are determined in a 2D planar section, perpendicular to the vortex axis. At each period, a vortex is generated at the edges of the plate and advected to the bottom.

Mots clefs : dynamique tourbillonnaire, instabilités hydrodynamiques, interaction houle/structure.

1 Introduction

L'hydrodynamique associée aux ouvrages marins reste un sujet majeur pour les ingénieurs concepteurs. Par exemple, l'utilisation des ressources marines dans les zones littorales par l'installation d'éoliennes offshore ou par l'implantation d'hydroliennes ou de systèmes de récupération de l'énergie des vagues pose des problèmes nouveaux. En premier lieu, l'optimisation du fonctionnement et les sollicitations subies nécessitent une connaissance assez précise de l'écoulement autour de l'ouvrage. Mais les contraintes environnementales induites par les caractéristiques intrinsèques des zones littorales ouvrent des problématiques, en terme d'hydrodynamique, assez nouvelles. Ces problématiques sont associées à la présence d'interfaces : la surface libre avec son agitation due aux vagues et à la houle et le fond marin dont on cherche en général à maintenir l'état initial. La présence de courants marins et la propagation des ondes de gravité engendrent des écoulements non uniformes dans l'espace, même hors couche limite, et surtout instationnaires. Ces différentes caractéristiques de l'écoulement marin conduisent à une très grande difficulté de prévision de comportement des ouvrages implantés en mer.

L'interaction de la houle avec une structure immergée génère des tourbillons ayant une dynamique déterminée par les conditions instationnaires de l'écoulement associé à la propagation de la houle, c'est-à-dire un écoulement orbital très fortement cisaillé sur la verticale. Ces tourbillons sont les signes d'efforts de portance qui peuvent être dimensionnant pour la structure. Ils déterminent l'écoulement au voisinage des structures immergées marines à proximité. Ils ont aussi des effets sur la tenue des fonds marins car leur persistance peut être longue. L'impact éventuel des tourbillons sur les fonds peut induire des courants importants et générer des phénomènes d'affouillement. La compréhension de leur dynamique est donc importante pour l'étude de l'impact environnemental d'une structure immergée. Ces phénomènes ont été observés expérimentalement il y a quelques années ([1],[2]). Dans ce contexte nous nous intéressons à la dynamique tourbillonnaire générée par l'interaction de la houle avec une plaque horizontale. Un tel objet peut constituer un ouvrage de protection ponctuel de côtes ou d'installations portuaires.

Les outils récents, à haute résolution spatiale, de visualisation et de mesure de champs de vitesse (PIV) permettent de nouvelles investigations qui pourraient apporter des réponses aux problèmes non résolus concernant la dynamique des tourbillons et leur stabilité dans le contexte de milieu marin décrit précédemment.

2 Montage expérimental

Le montage expérimental est présenté sur la figure 1. Les expériences sont réalisées dans un canal à houle de 10 m de long et 0.30 m de large. Pour obtenir un écoulement instationnaire et périodique une houle monochromatique, pour simplifier la réalité, est générée avec une fréquence $f = 1$ Hz. La hauteur d'eau est fixée à 0.20 m. La plaque immergée a une longueur $B = 0.25$ m, une épaisseur $e = 2$ mm et une immersion $i = 0.07$ m.

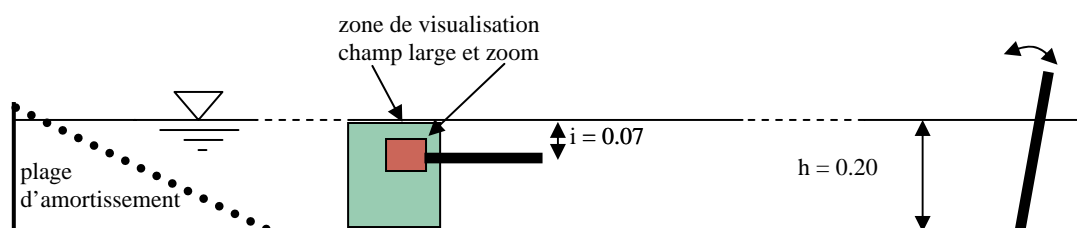


Figure 1. Schéma du dispositif expérimental.

Pour réaliser les visualisations une nappe laser est générée dans un plan vertical au centre de la largeur du canal. Une diode laser continue est utilisée pour une observation qualitative des phénomènes et un laser YAG pulsé de 120mJ est utilisé pour les mesures PIV. Le fluide est marqué par l'émission de bulles d'hydrogène créées par électrolyse dont la plaque elle-même constitue l'une des électrodes. La distribution des bulles est plus dense dans les cœurs des filaments tourbillonnaires qui sont le siège de zones dépressionnaires. Ce traceur est particulièrement efficace pour visualiser les cœurs tourbillonnaires dans leur évolution tridimensionnelle et n'entraîne pas de coloration opacifiant le milieu fluide. Les bulles sont suffisamment petites pour négliger la vitesse due à leur flottabilité par rapport à la vitesse d'entraînement du fluide. L'enregistrement des images se fait à l'aide d'une caméra CCD de résolution 1600x1200 pixels à la fréquence d'acquisition 15Hz pour les paires d'images. Nous avons utilisé deux focalisations différentes. La première, en "champ large" permet de visualiser un champ de 17,6x17,6 cm ; la deuxième, zoomée sur un tourbillon donne un champ de dimension 6x8cm. Les champs de vitesse et de vorticité sont déterminés par un logiciel PIV commercial, R&D Vision.

3 Résultats

3.1 Visualisations et mise en évidence de certains phénomènes

Des prises de vue « obliques », figure 2, montrent que le tourbillon formé à l'extrémité aval de la plaque, initialement rectiligne, ondule assez rapidement puis éclate si les déformations deviennent importantes.

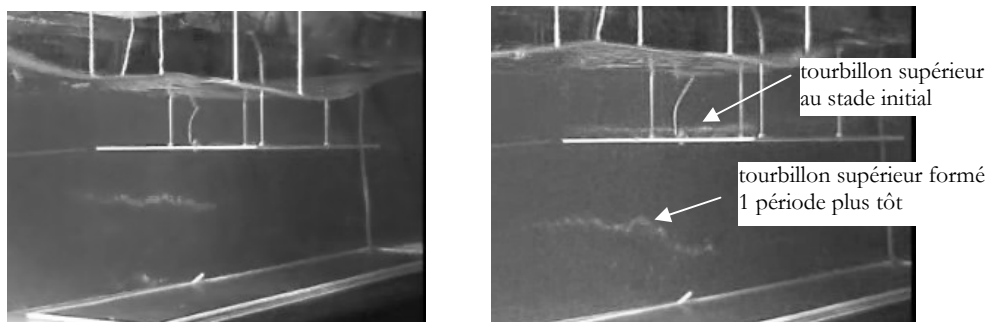


Figure 2. Visualisation oblique du filament tourbillonnaire par bulles d'hydrogène.

Du point de vue application, la compréhension de cette instabilité 3D est importante car elle détermine l'intensité de l'impact des tourbillons sur le fond marin ou sur des structures voisines. Un objectif du concepteur d'ouvrage peut consister à choisir une géométrie du bord de fuite pour favoriser l'éclatement des tourbillons. Du point de vue fondamental, cette compréhension passe par la détermination des paramètres contrôlant ce phénomène d'instabilité. Ces paramètres peuvent être associés à la dimension du noyau du tourbillon, à la présence d'une vitesse axiale au cœur du tourbillon, au forçage lié à la fréquence de la houle et à ses harmoniques, à la géométrie du système expérimental (notamment le confinement transversal dû aux parois du canal). En vue d'étudier ce phénomène, on s'intéresse dans un premier temps aux caractéristiques du tourbillon dans un plan 2D vertical.

Les photographies suivantes, figure 3, montrent la structure de l'écoulement à différents instants successifs dans un plan vertical à l'extrémité aval de la plaque immergée. L'écoulement est éclairé par une nappe laser continue. Vu la rapidité de l'écoulement, ce type de visualisation ne permet pas de calculer les champs de vitesse (le temps d'exposition de la caméra est trop long) mais permet d'avoir une représentation qualitative de la dynamique tourbillonnaire en aval de la plaque.

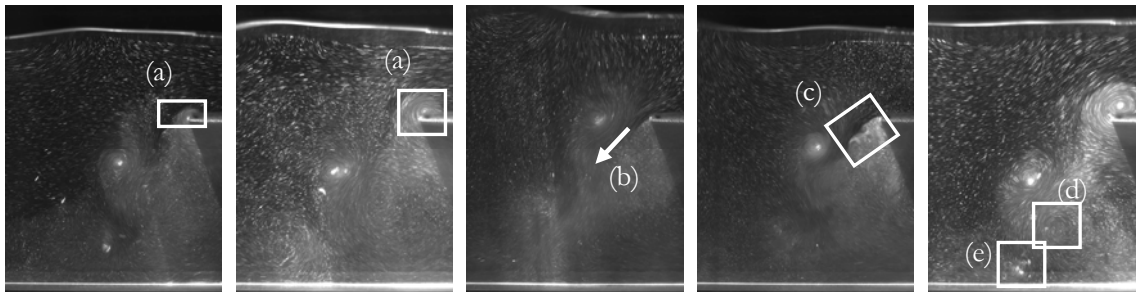


Figure 3. Visualisation dans un plan 2D vertical avec une nappe laser continue.

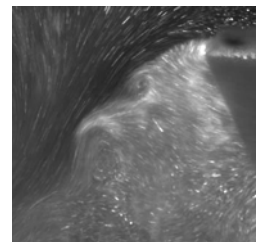
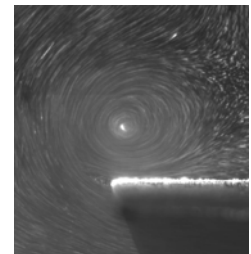
Sur la séquence présentée nous pouvons distinguer différents phénomènes associés à la dynamique tourbillonnaire.

(a). Formation d'un tourbillon de décollement sur la partie supérieure de la plaque alimenté par « l'enroulement » de la couche limite issue de la paroi inférieure.

(b). Convection importante, par l'écoulement moyen, du système tourbillonnaire vers le fond du canal.

(c). Formation d'une couche à très fort cisaillement, siège d'instabilités de type Kelvin-Helmoltz qui vont engendrer un tourbillon cohérent (d) de signe opposé au précédent par la suite.

(e) Impact sur le fond pouvant entraîner des survitesses mettant en suspension les sédiments en site naturel et provoquant un phénomène d'affouillement.



3.2 Caractérisation tourbillonnaire

Dans un premier temps, nous étudions les caractéristiques des tourbillons dans un plan 2D vertical. Les mesures sont effectuées par PIV sur 20 périodes de houle. L'écoulement est périodique. Pour une phase donnée, la position du tourbillon est sensiblement identique sur les 20 périodes. Au bout d'une période, le centre du tourbillon s'inscrit dans un cercle de 5mm de diamètre (correspondant à 17% du diamètre du tourbillon environ).

La figure 4 représente le champ de vitesse et le champ de vorticité moyennés sur les 20 périodes à différentes phases. L'écoulement moyen orbital de la houle est visible dans la partie en haut à gauche des champs. Un tourbillon est généré à l'extrémité de la plaque par un phénomène de décollement 4(a). Il se détache à la demi-période, à l'instant où la vitesse moyenne de la houle et l'écoulement sous la plaque sont dans la même direction 4(b). Une couche de cisaillement de signe opposé est alors générée à l'extrémité de la plaque. Bien que la figure 3(c) suggère que cette couche subit une instabilité du type Kelvin-Helmoltz, la précision des calculs de PIV ne permet pas d'observer ce phénomène sur les champs de vorticité. Le tourbillon est advecté vers le fond du canal par l'écoulement moyen 4(c). L'ensemble des deux structures contra-rotatives continue à être advecté vers le fond par induction mutuelle (alors que l'écoulement moyen est en sens opposé) 4(d). Au bout d'une période, un nouveau tourbillon se forme à l'extrémité de la plaque. Le tourbillon formé à la période précédente n'est pas encore détruit, il garde une structure cohérente et une intensité importante. Le tourbillon précédemment formé semble se disloquer au bout de une période et demi environ. Au bout de 2 périodes, une vorticité résiduelle, d'environ 25% la vorticité maximale du tourbillon, subsiste vers le fond du canal et contribue à une forte interaction avec le fond. La figure 5 représente le maximum de vorticité dans le tourbillon au cours de son évolution sur deux périodes. L'instant $t=0$ correspond à l'étape représentée sur la figure 4(d) de formation du tourbillon.

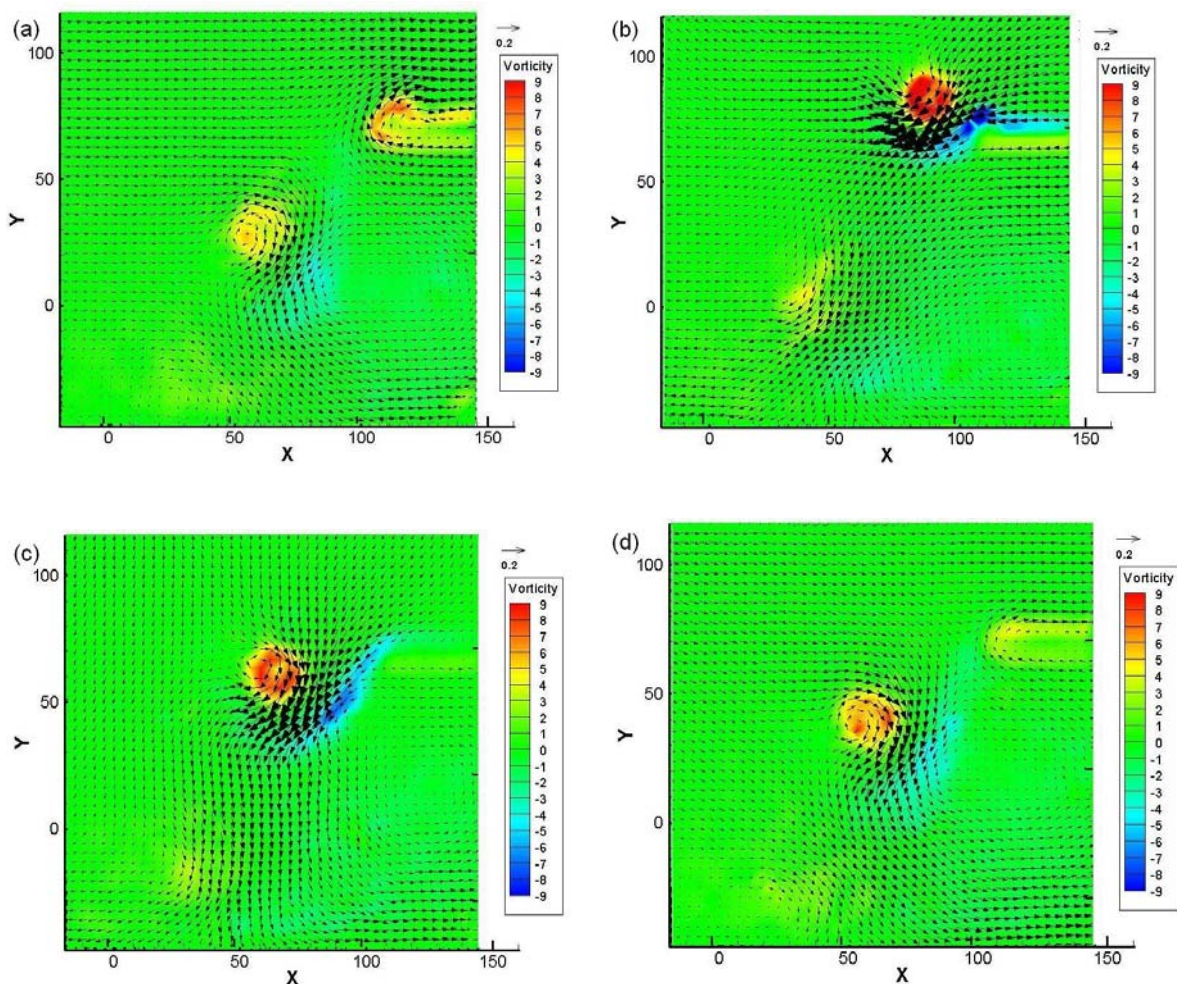


Figure 4. Champ de vitesse et champ de vorticité moyenné sur 20 périodes à différentes phases, ϕ_0 (a), $\phi_0+7/15 T$ (b), $\phi_0+10/15 T$ (c) et $\phi_0+13/15 T$ avec T la période de la houle. Les grandeurs sont données en unité SI.

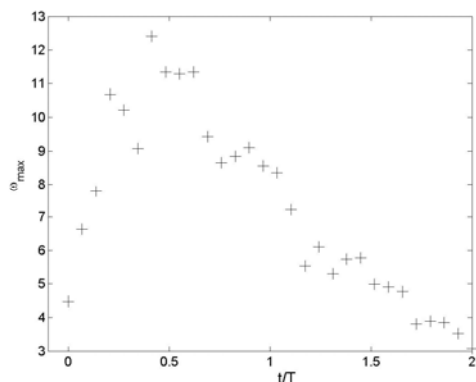


Figure 5. Evolution du maximum de vorticité dans un tourbillon au cours de son évolution sur 2 périodes.

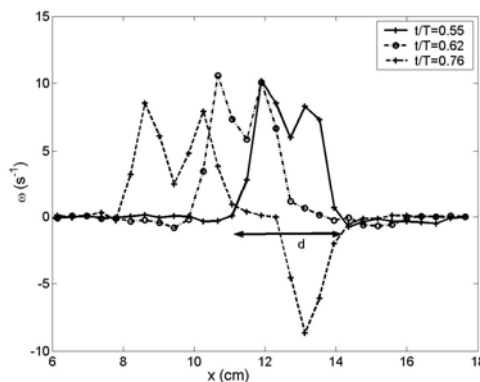


Figure 6. Coupe de vorticité au coeur du tourbillon à différentes phases.

On observe sur l'ensemble de ces figures que les tourbillons formés présentent une distribution de vorticité annulaire. Ces observations sont confirmées sur les champs zoomés (non représentés ici) et la figure 6 qui représente une coupe du champ de vorticité, moyenné sur 20 périodes, passant par le cœur du tourbillon à différentes phases de la période. On retrouve bien une distribution annulaire de la vorticité dans le tourbillon. Le diamètre d du tourbillon est estimé à 3cm environ. Le « déficit » de vorticité au centre du tourbillon nous conduit à formuler différentes hypothèses. La première hypothèse concerne le dispositif expérimental. En effet, les bulles d'hydrogène sont générées à l'extrémité de la plaque, à l'endroit même où sont formés les tourbillons. Elles se concentrent donc dans le cœur du tourbillon qui apparaît comme une tache blanche sur les images de particules. Le logiciel PIV peut alors avoir du mal à distinguer les particules au cœur du tourbillon. Une solution, pour remédier à ce problème serait de ne pas générer les bulles à l'extrémité de la plaque mais ailleurs dans la zone de visualisation ou ensemercer le milieu avec des particules. Une deuxième hypothèse est la présence des déformations 3D des tourbillons (figure 2) qui sont associées à des vitesses axiales (relativement au tourbillon) qui peuvent être assez importantes [2]. Ces vitesses entraînent les particules dans une direction perpendiculaire au plan laser et le logiciel PIV ne peut donc calculer les vitesses au centre du tourbillon.

Enfin, la figure 7 représente le champ de vitesse moyenné sur toutes les phases d'une période, pour les 20 périodes. On aperçoit très nettement une cellule de recirculation sous la plaque générée par l'écoulement d'advection vers le fond. L'écoulement moyen juste en dessous de la plaque, proche de son extrémité aval, est donc toujours de l'amont vers l'aval. On aperçoit également l'impact fort de l'écoulement d'advection des tourbillons sur le fond. Ce phénomène peut avoir des conséquences très importantes en terme de transport sédimentaire d'où l'importance de bien comprendre la dynamique tourbillonnaire.

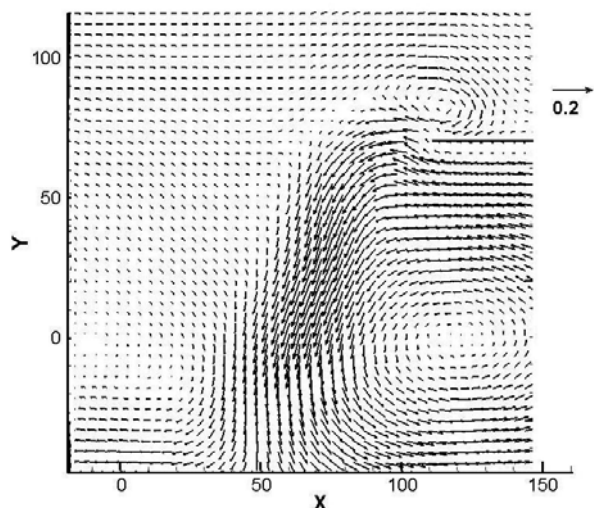


Figure 7. Champ de vitesse moyenné sur toute une période.

4 Conclusions et perspectives

Cette étude présente des résultats préliminaires sur la dynamique tourbillonnaire générée par l'interaction de la houle avec une structure immergée. La structure est ici une plaque plane horizontale immergée dans un canal à houle. La houle incidente est monochromatique. Les filaments tourbillonnaires générés aux extrémités de la plaque ont une évolution fortement tridimensionnelle. L'axe du tourbillon ondule de plus en plus jusqu'à l'éclatement du tourbillon. Cependant la détermination des caractéristiques du tourbillon dans un plan 2D, perpendiculaire à leur axe est une première étape à l'étude de ces phénomènes 3D.

Dans un premier temps, la dynamique tourbillonnaire est donc étudiée dans un plan 2D vertical situé en aval de la plaque à la mi-largeur du canal. Les champs de vitesse et de vorticité sont déterminés par méthode PIV. A chaque période un tourbillon est formé à l'extrémité de la plaque et advecté vers le fond du canal. Sa durée de vie est de l'ordre d'une période et demi de sorte qu'il persiste toujours une vorticité résiduelle non négligeable au fond du canal. Les tourbillons formés présentent une distribution de vorticité annulaire dont l'analyse exige une investigation plus approfondie. Nous avons considéré, pour le moment, une seule fréquence de houle. Les paramètres contrôlant l'intensité et la taille des tourbillons, ainsi que leur évolution en fonction de différentes caractéristiques de houle sont en cours d'étude.

Cette étude correspond à un travail en cours et présente un grand nombre de perspectives. Concernant l'étude 2D nous projetons de nouvelles séries d'expérience en générant les bulles d'hydrogène ailleurs qu'à l'extrémité de la plaque de manière à caractériser plus précisément le cœur du tourbillon, ou à ensemencher. Il serait alors intéressant d'observer avec une meilleure résolution la zone de formation du tourbillon juste au dessus de la plaque pour vérifier si la structure annulaire du tourbillon correspond à un phénomène physique. Enfin, nous projetons de poursuivre cette étude pour une large gamme de fréquences de houle de manière à déterminer le ou les paramètres qui caractérisent l'intensité, la taille et la durée de vie de ces structures tourbillonnaires.

Il serait également intéressant de déterminer la vitesse axiale du tourbillon par stéréoPIV. Ceci nous permettra de mieux comprendre la dynamique 3D des tourbillons. Finalement, une visualisation avec deux caméras dans des directions perpendiculaires sur toute la largeur du canal nous permettra de déterminer l'évolution tridimensionnelle des tourbillons, notamment la longueur d'onde la plus instable et les mécanismes responsables de leur déstabilisation.

Références

- [1] Boulier B., Hémon A., Rivoalen E., Brossard J., Etude expérimentale et numérique de l'écoulement au voisinage d'une plaque immergée dans la houle. 6^{ème} Journée Hydrodynamiques, Nantes, 1997.
- [2] Boulier B., Evolution spatio-temporelle de structures tourbillonnaires dans la houle, thèse, 1996.