

**ETUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DE  
L'ÉCOULEMENT AU VOISINAGE D'UNE PLAQUE  
IMMERGÉE DANS LA HOULE.**

B. BOULIER, A. HÉMON, E. RIVOALEN, J. BROSSARD

Laboratoire de Mécanique de l'Université du Havre  
BP540, 76058 Le Havre cedex,

**Résumé**

L'étude présentée ici porte sur la formation et l'évolution de filaments tourbillonnaires générés par une plaque plane placée horizontalement dans la houle. Cette étude expérimentale est complétée par une simulation numérique. Deux techniques expérimentales complémentaires permettent de caractériser le comportement de l'écoulement dans le plan vertical médian du canal : des visualisations par bulles d'hydrogène créées par électrolyse et des mesures de vitesses par vélocimétrie laser. Une modélisation numérique bidimensionnelle de l'écoulement par une méthode particulière permet de retrouver dans le champ proche de la plaque la dynamique tourbillonnaire observée expérimentalement.

**Summary**

The present work is about the formation and the evolution of vortex shedding by a flat plate placed horizontally in the swell. This study covers both experimental and numerical aspects. Two types of experiment permit to analyze the behavior of the flow in a longitudinal and middle vertical plane of the flume : visualisations by hydrogen bubbles and velocity measurements by laser velocimetry. A numerical simulation of the flow by a vortex particle method finds the true vortex dynamic, in the vicinity of the plate observed experimentally in the flume.

# 1 Introduction

Ce sujet tire son origine des différentes études menées sur les systèmes capables d'amortir la houle. La protection des côtes, des ports ou des plans d'eau maritimes est un problème difficile à résoudre, surtout dans le cas où la profondeur est importante. Les objectifs à atteindre sont à la fois de diminuer l'énergie des houles arrivant à la côte en changeant le sens des flux d'énergie, de minimiser l'agitation en amont de l'ouvrage et de ne pas trop limiter la navigation côtière. Une solution possible est de placer sous la surface de l'eau parallèlement au littoral une série de dalles planes horizontales. Ce type de protection de côte, réalisé par exemple au large de Barcelone pour protéger le plan d'eau olympique, a fait l'objet de diverses études numériques, théoriques et expérimentales [1,2,3,4,5]. Les travaux de Patarapanich (1984,1989) et de Guevel & al (1986) portent sur l'amortissement de la houle par ce type d'ouvrage. Ils modélisent le phénomène d'amortissement par une approche en théorie potentielle de diffraction-radiation. Guevel *et al* expliquent le comportement hydrodynamique d'une dalle immergée, qu'ils désignent par "effet du mur d'eau", comme la mise en mouvement oscillatoire globale de la masse d'eau située sous la plaque. Les études expérimentales s'attachent à mesurer les performances de la plaque immergée en terme de réflexion, transmission, par des mesures de niveau de surface libre. Les efforts de la houle sur l'ouvrage sont également un problème abordé dans le but de dimensionner l'ancrage d'une telle structure.

La configuration expérimentale d'une plaque placée dans la houle a déjà fait l'objet d'études menées au Laboratoire de Mécanique des Fluides du Havre [5] avec une optique un peu différente : le problème n'y est pas étudié pour son aspect génie côtier uniquement, mais surtout pour l'aspect hydrodynamique de l'écoulement généré par la configuration. Le problème y est abordé d'un point de vue bidimensionnel, par visualisation et vélocimétrie laser. Les travaux effectués par J.Brossard ont permis de mettre en évidence que cette plaque était à l'origine de la formation de structures tourbillonnaires intenses. Ces structures tourbillonnaires prennent de l'énergie à la houle et peuvent la dissiper plus rapidement par turbulence. Elles participent ainsi à l'amortissement de la houle.

Les inconvénients majeurs d'un tel système de protection sont les efforts d'ancrage et les problèmes d'affouillement que la plaque peut occasionner au pied de l'ouvrage. En effet l'écoulement qui s'organise autour d'une plaque dans la houle peut poser des problèmes de stabilité du fond : les structures tourbillonnaires générées dans l'écoulement par la présence de la plaque peuvent dans certains cas persister longtemps et même si la plaque est située loin du fond, on verra qu'un écoulement global peut s'organiser et balayer le fond à proximité de l'ouvrage (figure 6 et [5,6]).

Une étude hydrodynamique du problème a été réalisée [7], afin de comprendre l'organisation de l'écoulement. Nous ne ferons qu'évoquer le point de vue génie côtier.

Les points que nous voulions éclaircir sont les suivants aussi bien du point de vue expérimental que numérique :

- processus de formation des filaments tourbillonnaires
- compréhension de l'organisation bidimensionnel de l'écoulement, organisation des structures tourbillonnaires entre elles.

Dans la suite de notre exposé nous emploierons les termes "aval" et "amont" (par rapport au sens de propagation de la houle) pour désigner respectivement les côtés plage d'amortissement

et batteur.

La figure 1 montre l'organisation générale des structures tourbillonnaires en allées alternées, visualisée par bulles d'hydrogène (cf. section 2.1). Sur les figures, la houle se propage de la gauche vers la droite.

## 2 Dispositif expérimental

La veine utile mesure  $3m \times 0,3m \times 0,3m$ . Aux extrémités de cette veine, des prolongements de PVC de 80 cm chacun accueillent d'un côté le batteur, de l'autre la plage d'amortissement.

Le canal est posé sur une charpente métallique qui permet le serrage des parois de celui-ci. Les parois latérales et le fond de la veine sont en Plexiglas, matériau dont les qualités optiques permettent des prises de vues ainsi que des mesures par Vélocimétrie Laser (V.L.). Le batteur génère une houle régulière, afin d'avoir un écoulement de base bien connu. Cet écoulement est défini par : la hauteur d'eau ( $d = 0.25m$ ), la période de la houle ( $T_h = 1.11s$ ) et l'amplitude crête à creux de la houle ( $H = 1.68 \cdot 10^{-2}m$ ).

La configuration que nous avons adoptée est orientée uniquement sur l'étude des tourbillons et non l'amortissement de la houle. Nous avons donc choisi les paramètres simplifiant l'analyse et en particulier permettant de créer des tourbillons en modifiant peu la houle .

La corde de la plaque est petite (43 mm) devant les longueurs d'onde de houle ( $\approx 1/30$ ). Cette faible corde lui permet de se trouver dans un écoulement de base quasi-uniforme à un instant donné (le déphasage entre les bords amont et aval est de l'ordre de 0.2 rad). Elle permet aussi d'avoir une houle avec plaque peu modifiée par rapport à la houle sans plaque, la réflexion due à la plaque étant négligeable. La corde de la plaque est cependant suffisamment grande pour produire des tourbillons intenses pour être facilement observés.

La plaque occupe toute la largeur du canal. Ses bords ont été chanfreinés pour que le détachement tourbillonnaire s'effectue en un point fixe connu à l'avance, ce qui facilite la localisation optimale de la zone de production de bulles.

Dans un but de simplification, la plaque est positionnée afin de pouvoir négliger les effets dus à la surface libre et au fond : elle est immergée loin de la surface libre (10 cm) et du fond (15 cm). C'est ce qui nous a fait choisir une hauteur d'eau dans le canal assez importante.

Deux techniques expérimentales complémentaires sont utilisées pour étudier cet écoulement :

- des mesures V.L. dans le domaine proche de la plaque. Le principe de reconstitution du champ de vitesse périodique moyen est le suivant : un encodeur relié au batteur à houle par une courroie crantée délivre des impulsions au système d'acquisition pour repérer la phase de la houle. En un point de l'écoulement, la mesure va consister à acquérir un nombre prédéfini de mesures de vitesses qui seront classées en  $N$  phases. Nous avons choisi  $N = 50$  ce qui nous donne une résolution temporelle de l'ordre de 0.055s avec la période de la houle  $T_H = 1.11s$ . Le nombre de mesures par point d'espace est 10000 pour 50 phases, ce qui nous donne une moyenne de 200 mesures par phase. Ce mode d'acquisition a pour conséquence que le champ cinématique mesuré ne correspond pas à une valeur instantanée (comme le ferait par exemple la technique P.I.V (Particle Image Velocity), mais à un champ moyen construit sur un très grand nombre de vagues (on parlera de "vague moyenne"). On verra les conséquences de ce

mode opératoire.

Le repérage temporel des figures sera noté en quatorzièmes de période de houle pour les résultats provenant des visualisations ou en numéro de phase pour les résultats de V.L. avec la phase 37 pour  $t=0$  et environ quatre phases de V.L. pour  $1/14^e$  de période de houle. La date  $t = 0$  correspond au passage de la crête de la vague à la verticale du bord aval de la plaque (vitesses de houle horizontales).

- des visualisations par bulles d'hydrogène ; associées à un traitement d'image, elles permettent de suivre la cinématique de la formation des structures tourbillonnaires et de comprendre l'organisation globale de l'écoulement dans le canal. Ces résultats vont déterminer le domaine de validité de l'utilisation de la V.L. pour la reconstitution d'une vague moyenne.

On va maintenant détailler cette technique de visualisation par bulles.

## 2.1 Visualisation par électrolyse

Différentes techniques sont utilisables pour les visualisations de l'écoulement. Les plus couramment utilisées consistent à utiliser des traceurs dont on suit l'évolution spatio-temporelle par un système vidéo. Le traceur peut être de différents types : sous forme de colorant (fluorescéine ...), sous forme de particules (alumine, Rilsan ...) ou encore de micro bulles (hydrogène). Nous avons mis en oeuvre une méthodologie de visualisation dont l'exploitation quantitative est possible. Elle utilise comme marqueur des bulles d'hydrogène produites par électrolyse de l'eau. Ces bulles ont la propriété de migrer sous l'effet du gradient de pression vers les zones de basses pressions et donc nous permettent de marquer les coeurs tourbillonnaires (cf. section 3) dont nous étudions la dynamique. La condition pour que les bulles marquent correctement les zones de rotationnel est qu'elles se trouvent dans la zone de gradient de pression où elles peuvent migrer vers un minimum de pression qui correspond au cœur du tourbillon.

La configuration expérimentale choisie nous amène à générer les bulles à proximité du point de décollement des nappes tourbillonnaires, c'est à dire aux arêtes de la plaque. Pour cela nous avons utilisé une plaque d'acier inoxydable, recouverte de peinture noir mat, qui sert d'isolant et permet de limiter les réflexions lumineuses lors des visualisations. Les arêtes de cette plaque sont dépeintes par grattage pour mettre à nu le métal des bords. Ainsi seules ces parties produiront des bulles.

Pour fixer le domaine bidimensionnel d'observation, nous avons réalisé la sélection du plan vertical médian du canal par tomographie laser.

## 3 Étude expérimentale bidimensionnelle

Cette méthode de visualisation a permis l'enregistrement d'images vidéo. Nous avons relevé sur les images numérisées la position au cours du temps de tous les filaments créés pendant quelques périodes (fig. 2).

Les structures se détachent toujours du même endroit mais les trajectoires ne demeurent identiques, pour des structures tourbillonnaires successives, que dans les premiers instants de leur évolution. En réalité les filaments tourbillonnaires ondulent ; d'un filament à l'autre les ondulations ne sont pas strictement identiques. Ainsi dans le plan laser les filaments, même s'ils ont une ligne moyenne qui suit une trajectoire identique d'une période à l'autre, n'intersectent

pas le plan laser au même endroit. Ces visualisations nous montrent des trajectoires différentes pour ce qui peut être pris pour un phénomène bidimensionnel alors que les écarts de position proviennent pour une part des instabilités tridimensionnelles transversales. Les déformations tridimensionnelles diffèrent d'un filament tourbillonnaire à l'autre au bout de quelques instants de vie des filaments, et les positions des filaments s'en trouvent décalées légèrement.

Ce phénomène d'aberration provoqué par l'utilisation d'une technique destinée aux processus 2D dans le cas 3D se produit également lors de la reconstitution de la vague moyenne. Pour cette raison nous ne chercherons à comparer les champs cinématiques mesurés et calculés que dans le domaine proche de la plaque. Cette constatation limite le domaine sur lequel les mesures de vitesse par V.L. sont réalisées à un rectangle à 30mm × 30mm, ce qui ne recouvre pas la totalité des observations vidéo.

La figure 3 représente le champ de vitesse à deux phases de la période de houle. Cette figure est complétée par le calcul du rotationnel pour comprendre l'organisation tourbillonnaire de l'écoulement. On va maintenant comparer ce champ de tourbillon et la position des bulles, afin de vérifier que ces dernières marquent réellement les extremums de rotationnel.

### 3.1 Comparaison champ de rotationnel - position des bulles d'hydrogène

Nous suivons l'enroulement des nappes de bulles aux bords de la plaque par traitement d'image. Nous avons superposé figure 4, pour l'une des phases de la houle, la position de la nappe de bulles d'hydrogène (repérées par les symboles \*), et le champ de rotationnel obtenu pour une vague moyenne, représenté sous forme de courbes isorotationnelles.

Les bulles ne sont pas des traceurs inertes, cependant la visualisation des enroulements de bulles permet de comprendre comment la nappe de rotationnel formée s'enroule en spirale tout en subissant une convection globale : au départ de la formation des tourbillons, les bulles semblent marquer les lignes d'émission passant par les arêtes de la plaque. Mais ces arêtes sont le lieu de production du rotationnel (c'est là que le cisaillement se produit principalement), ainsi les bulles associées aux particules fluides passant en ces lieux, et donc transportant le tourbillon, marquent ici les lignes de rotationnel et pas nécessairement les lignes d'émission.

La comparaison des isorotationnelles et de la position des bulles (figure 4 ou pour plus de détails [7]) confirme que les bulles forment une nappe correspondant à la nappe de rotationnel générée par la plaque, nous pourrions donc dès lors admettre l'équivalence : nappe de bulles - nappe de rotationnel. Nous pouvons donc suivre la cinématique des structures tourbillonnaires par les bulles, pour chaque vague. Cette localisation est plus précise que la V.L. En effet :

- Les bulles ne se regroupent pas instantanément en une ligne fine, mais forment de belles spirales, qui correspondent aux enroulements de la nappe de rotationnel. Le champ V.L. de vitesses a une résolution insuffisante pour résoudre cette structure ;
- Comme on l'a vu, la V.L. nécessite une intégration sur plusieurs vagues. Cette reconstitution d'une vague moyenne intègre les fluctuations, ce qui augmente encore le "lissage".

Quand la structure tourbillonnaire se trouve convectée dans l'écoulement, le gradient de pression provoque le regroupement de la plus grande partie des bulles avoisinantes : la vue par plan laser montre seulement une tache assez large du cœur (figure 1). Le regroupement des bulles en un ligne bien marquée, correspond à la destructuration, sous l'effet de la viscosité, de la nappe spi-

ralée de rotationnel qui forme un filament tourbillonnaire. Cette analyse confirme l'avantage que représentent les bulles pour notre étude, car elles montrent à la fois la formation des nappes de rotationnel, et le cœur du filament tourbillonnaire où elles finissent par se regrouper. Cette technique est particulièrement bien adaptée à notre configuration expérimentale car nous pouvons générer les bulles à proximité du point de décollement supposé des couches de rotationnel. Elles se trouvent ainsi immédiatement guidées par le gradient de pression associé à la nappe.

### 3.2 Les allées tourbillonnaires

La figure 5 représente la position à des instants successifs de la nappe de bulles (ou son équivalent à la période suivante) émise au bord aval. Elle montre qu'au cours d'une période ont été formées d'une manière quasi symétrique deux paires de tourbillons contrarotatifs à l'aval et à l'amont. Au cours du temps, l'écoulement périodique va produire une succession de filaments tourbillonnaires contra-rotatifs qui formeront des allées tourbillonnaires alternées. Les positions respectives des filaments sont telles que l'allée formée à l'amont va se propager vers la surface libre alors que celle formée à l'aval va être advectée vers le fond du canal. A la vitesse auto-induite par l'allée tourbillonnaire se superpose l'effet de la houle : les trajectoires des filaments (fig. 2) sont globalement une propagation d'allée tourbillonnaire avec une oscillation due à la houle. A allées est associé un écoulement global autour de la plaque, dans lequel apparaît une recirculation importante sous la plaque [6]. Près du fond, cette recirculation engendre un écoulement moyen qui peut être vu comme un jet horizontal à l'aplomb de la plaque (cf figure 6).

Cet aspect de l'écoulement sera à prendre en compte pour les études d'amortissement de houle par ce système de plaque immergé. En effet, dans le cas d'un fond meuble, ce phénomène peut créer des problèmes d'affouillement et de stabilité de l'ouvrage.

## 4 Modélisation numérique

### 4.1 Hypothèses de calcul

Le modèle numérique présenté maintenant est réalisé dans le cadre des écoulements instationnaires bidimensionnels incompressibles de fluide parfait. Une formulation intégrale conduit à une résolution relativement simple du problème. Ici seule la plaque, considérée comme une surface sans épaisseur, est discrétisée. La houle est considérée comme un champ potentiel perturbé par la présence de la plaque et du sillage. L'échappement tourbillonnaire aux bords de la surface portante est réalisé par des particules tourbillonnaires qui sont ensuite transportées dans l'écoulement. En supposant le fluide parfait, on se place dans le cadre des écoulements à viscosité évanescence. Le raccord entre le sillage tourbillonnaire et la plaque est obtenu en appliquant la condition de Kutta Joukowski aux deux bords de la plaque.

### 4.2 Résolution numérique

Le caractère potentiel de l'écoulement de base non perturbé que nous étudions permet de décomposer en chaque point du domaine fluide, le champ de vitesse en une somme de champs élémentaires. On peut écrire la vitesse  $\vec{U}(\vec{x}, t)$  en chaque point  $\vec{x}$  du domaine fluide comme

la somme des contributions élémentaires suivantes :

$$\vec{U} = \vec{U}_h + \vec{U}_\omega + \vec{U}_p \quad (1)$$

- $\vec{U}_h$  est le champ de vitesse potentiel de la houle défini analytiquement par le modèle de Stokes en profondeur finie.
- $\vec{U}_\omega$  est le champ associé au sillage tourbillonnaire.  
Ce sillage émis aux deux bords de la plaque est régi par l'équation de Helmholtz, qui se réduit à une équation scalaire en écoulement 2D : l'écoulement étant incompressible, la vitesse  $\vec{U}_\omega$  est calculée par la formule de Biot-Savart qui donne l'expression du champ de vitesse sous forme intégrale. La forme discrète de cette équation est obtenue à partir d'un ensemble fini de filaments tourbillonnaires.
- $\vec{U}_p$  est le champ de vitesse de l'écoulement permettant de vérifier les conditions aux limites sur la plaque. Le potentiel total est harmonique et vérifie la condition de glissement sur la plaque.

La simulation consiste en une marche en temps pendant laquelle l'évolution des particules tourbillonnaires est traitée de façon lagrangienne.

### 4.3 Résultats et comparaisons

Les comparaisons numérique-expérimental portent sur la cinématique au voisinage de la plaque. Nous reprenons les résultats de la section 3 relatifs à l'analyse du champ de rotationnel obtenu par V.L. dans un domaine de 30mm × 30mm à proximité du bord aval de la plaque (par rapport au sens de propagation de la houle). Les paramètres de la simulation sont identiques à ceux de l'expérience en canal. Le profil est représenté par son squelette discrétisé en 50 segments. Le pas en temps de la simulation est :  $\Delta t = 0.003$  s ; il faut donc environ 370 pas de temps pour représenter une période de houle.

L'instant initial du calcul correspond à la "mise en route du batteur", il faut donc un temps d'adaptation pour obtenir un régime périodique de l'écoulement (extinction du transitoire). Au début du calcul, la plaque reçoit instantanément l'écoulement de houle, mais plusieurs périodes sont nécessaires avant que le régime périodique (au niveau des structures tourbillonnaires produites) soit établi. Les résultats présentés ici sont obtenus après 5 périodes de houle.

#### 4.3.1 Les champs de rotationnel

Les calculs effectués sont comparés aux résultats expérimentaux sous forme de champs de rotationnel (figures 7). Sur les figures correspondant au calcul et notées "numériques" la plaque est représentée par un segment de droite. Les échelles sont identiques pour les niveaux de rotationnel et nous notons un bon accord entre le modèle et l'expérience sur les niveaux et la répartition du rotationnel dans l'écoulement.

L'expérience nous indique que la nappe tourbillonnaire qui va se développer sous le niveau de la plaque prend naissance dans la structure tourbillonnaire supérieure, sous forme d'une langue de rotationnel de signe positif, qui s'insère dans cette structure négative. La naissance de cette structure provient de l'induction du filament tourbillonnaire supérieur sur la couche limite supérieure de la plaque. Les vitesses induites par le filament font décoller la couche limite et produisent un

entraînement de particules fluides porteuses de rotationnel positif. Le modèle non visqueux que nous utilisons ne peut pas reproduire ce phénomène, car il ne produit pas de couche limite sur la plaque, et donc pas de rotationnel en dehors des arêtes.

#### 4.3.2 Circulation d'un filament tourbillonnaire modélisé

Pour comparer la quantité de rotationnel émise dans l'écoulement on va maintenant calculer la circulation associée aux différentes structures tourbillonnaires, pour s'assurer que la quantité de rotationnel présente dans les structures formées est similaire entre l'expérience et la simulation. Nous allons donc évaluer la circulation des filaments tourbillonnaires, numériquement et expérimentalement.

Le calcul de la circulation dans le code est obtenu simplement par sommation des circulations attachées aux filaments contenues dans les structures détachées du bord de la plaque. Expérimentalement la circulation est calculée soit par intégration de la vorticité sur la surface contenant la structure (intégration) ou par ajustement d'une gaussienne sur la structure (ajustement). La comparaison des résultats est faite dans le tableau 1. Cette comparaison est satisfaisante, compte tenu du modèle fluide utilisé.

<i>filament &gt; 0 (sens horaire sur la figure)</i>		<i>filament &lt; 0 (sens trigo. sur la figure)</i>			
$\Gamma$ ( $10^{-3}m^2/s$ ) numérique	$\Gamma$ ( $10^{-3}m^2/s$ ) expérimental		$\Gamma$ ( $10^{-3}m^2/s$ ) numérique	$\Gamma$ ( $10^{-3}m^2/s$ ) expérimental	
	intégration	ajustement		intégration	ajustement
1.39	$1,12 < \Gamma < 1,4$	1,2	-2,09	$-1,6 < \Gamma < -1,2$	$-1,9 < \Gamma < -1,2$

Tableau 1: *Récapitulatif des principaux résultats de circulation*

## 5 Conclusion

Les travaux qui sont présentés dans cette étude contribuent à la compréhension de la formation et de l'évolution de filaments tourbillonnaires dans la houle. Nous mettons en évidence les raisons de la formation d'allées tourbillonnaires alternées par une organisation des filaments guidée par la houle. Cette organisation particulière présente la caractéristique d'induire la propagation vers la surface libre de la nappe formée au bord amont relativement au sens de propagation de la houle, et vers le fond de la nappe formée au bord aval. L'écoulement général ainsi créé sera à prendre en compte pour une utilisation de ce système de plaque comme amortisseur de houle.

L'analyse du champ de vitesse obtenu par vélocimétrie laser, sur un domaine proche du bord aval de la plaque, permet de valider la technique de visualisation par bulles d'hydrogène, de quantifier la circulation des structures tourbillonnaires et d'en caractériser les zones de basse pression. Nous avons montré une limite de la V.L. en vague moyenne pour l'analyse des champs de vitesses. Cette technique produit une diffusion artificielle des champs (rotationnel et autres grandeurs déterminées à partir des vitesses) par l'intégration des perturbations dans le temps.

La modélisation numérique effectuée grâce à un modèle particulière permet de retrouver de façon satisfaisante les résultats expérimentaux bidimensionnels à proximité du bord aval. Cette concordance permet de valider les hypothèses effectuées sur l'analyse des résultats.

#### PERSPECTIVES

L'étape suivante de ce travail consiste à étudier d'un point de vue numérique le comportement d'une plaque dans le cas où elle joue le rôle d'amortisseur de houle (longueur de plaque de l'ordre de la longueur d'onde de houle). L'idée consiste à coupler le code surface portante décrit dans la section 4 avec un code surface libre déjà éprouvé [8]. La houle est alors générée par un "bateur tourbillon" et les équations de surface libre sont écrites sur la position exacte de la frontière.

Une prise en compte de l'évolution tridimensionnelle du sillage tourbillonnaire pourra se faire en couplant au modèle d'émission 2D qui génère les structures tourbillonnaires, un modèle particulière 3D de sillage qui fera évoluer les structures. Lors de l'émission de ces structures, une perturbation longitudinale pourra être considérée, conduisant probablement à un modèle plus complet de l'écoulement réel autour de la plaque. Dans le même ordre d'idée, un modèle Navier-Stokes peut être utilisé au voisinage de la plaque, associé au modèle particulière pour l'évolution lointaine du sillage.

## Références

- [1] HURLY SIEW. On surface waves incident on a submerged horizontal plate.
- [2] E. LANDEl et J.M. MANZONE P. GUEVEL. Le phénomène d'un mur d'eau oscillant et son application pour protéger un site cotier soumis à l'action de la houle. *PIANC AIPCN*, 52, 1986.
- [3] PATARAPANICH. Maximum and zero reflection from submerged plate. *Jal of Waterway, Port, Coastal and Ocea Eng.*, 10, 1984.
- [4] M. PATARAPANICH et H.F. CHEONG. Reflection and transmission characteristics of regular and random waves from a submerged horizontal plate. *Coastal Engineering*, 1989.
- [5] J. BROSSARD. Contribution à l'étude de la turbulence à travers l'analyse d'un écoulement généré par la houle entre deux plaques. *Thèse de 3e cycle*, 1986.
- [6] B. BOULIER & M. BELORGEY. Ecoulement tourbillonnaire et zone d'affouillement généré par la houle en présence d'une plaque immergée. *Actes des journées Génie civil - Génie Côtier*, 1994.
- [7] B. BOULIER Evolution spatio-temporelle de structures tourbillonnaires dans la houle. *Thèse de l'Université du Havre*, 1996.
- [8] F. ROUFFI *Thèse de l'Université de Paris VI*, 1993.
- [9] C. REHBACH. Calcul numérique d'écoulements tridimensionnels instationnaire avec nappes tourbillonnaires. *La recherche aérospatiale*, 1977.

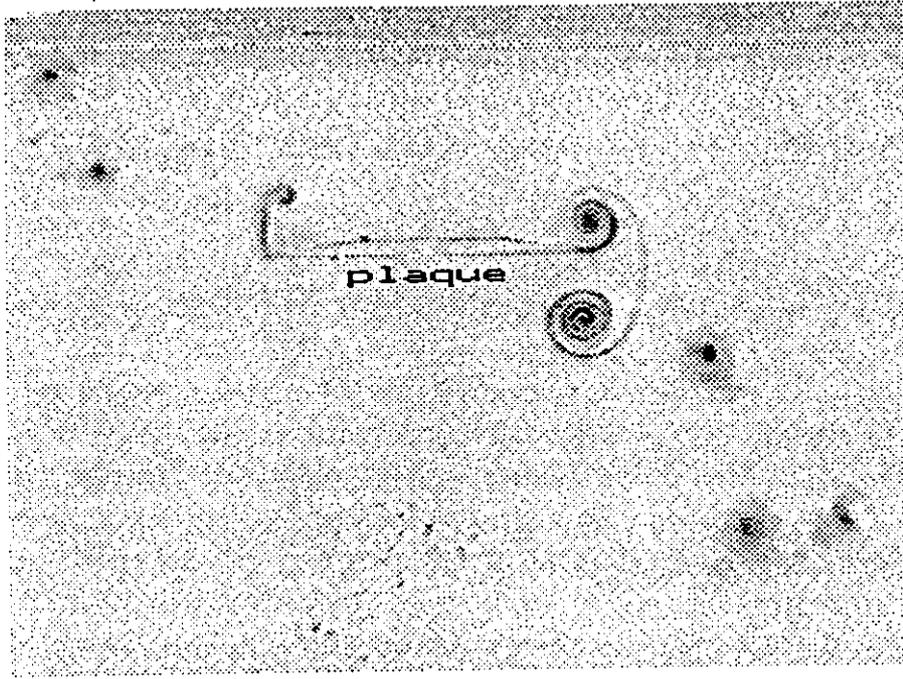


Figure 1: Visualisation par bulles d'hydrogène de l'écoulement dans le plan vertical de symétrie du canal. La houle se propage de la gauche vers la droite. Vue d'ensemble des allées tourbillonnaires formées aux arêtes de la plaque

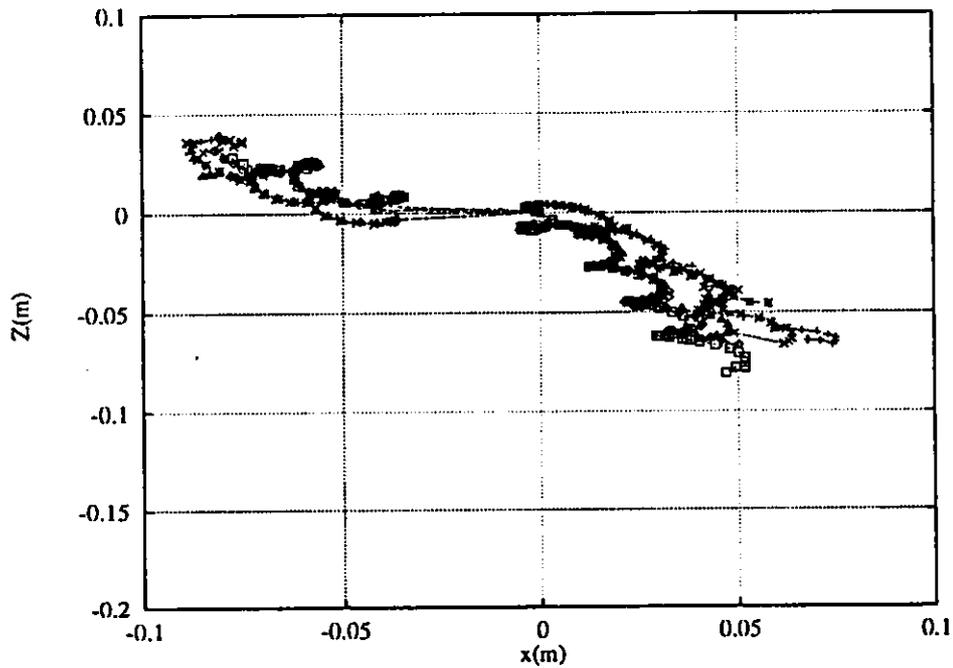


Figure 2: Trajectoire de tous les filaments tourbillonnaires émis par la plaque pendant quatre périodes de houle

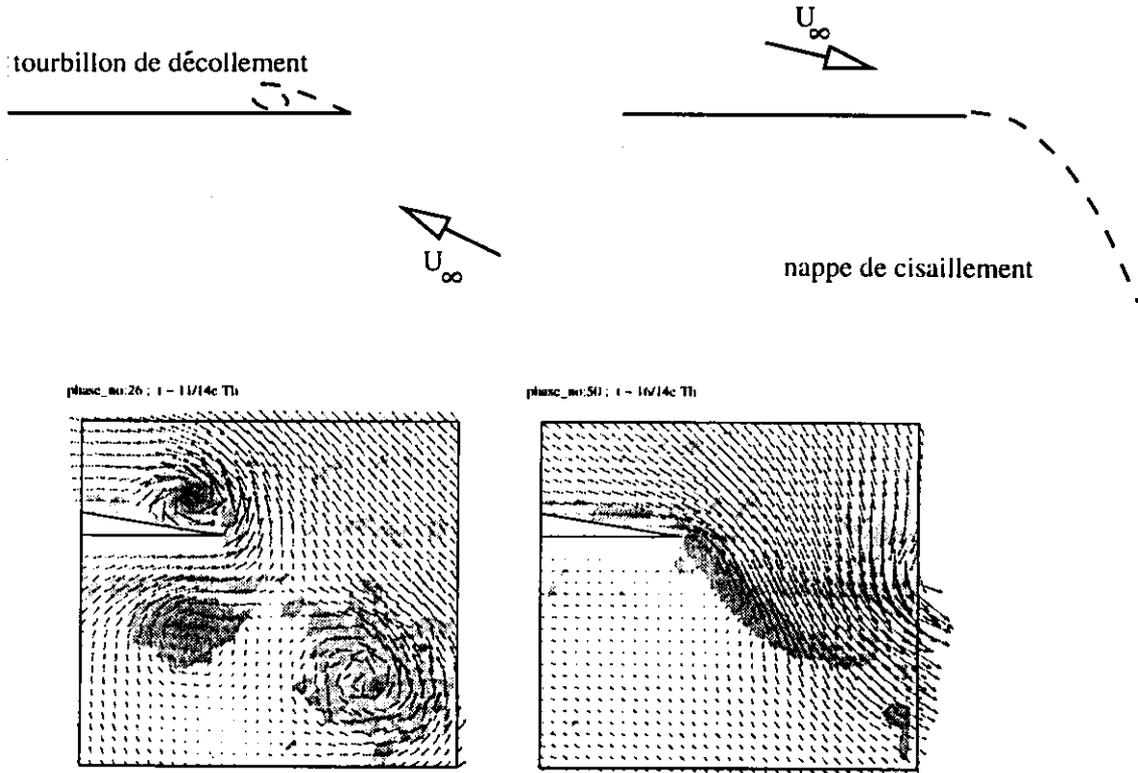


Figure 3: *Formation des structures tourbillonnaires, schématisation du processus (en haut) et champ de vitesse correspondant (en bas) : à gauche formation d'une structure tourbillonnaire par décollement ; à droite formation d'une nappe tourbillonnaire par recollement des couches limites supérieure et inférieure*

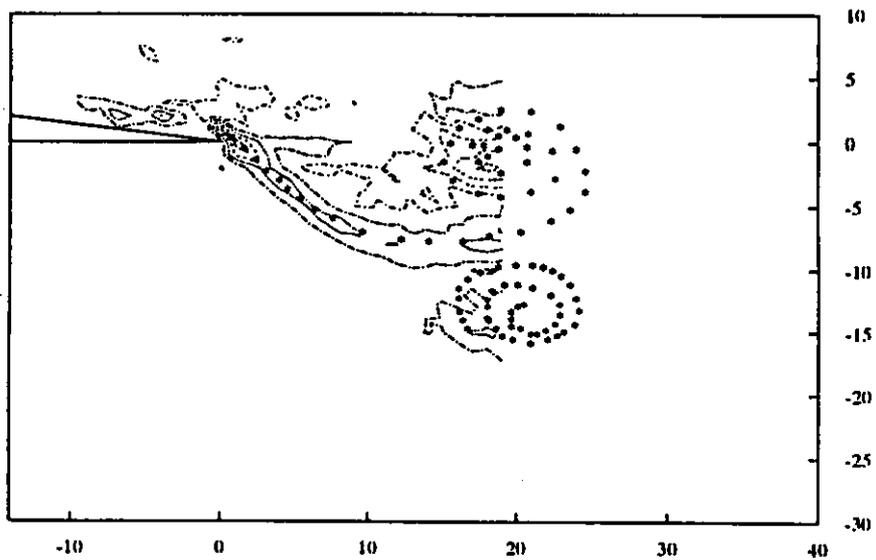


Figure 4: *Nappe de bulles et lignes d'isovorticité à  $t = 3/14 Th$*

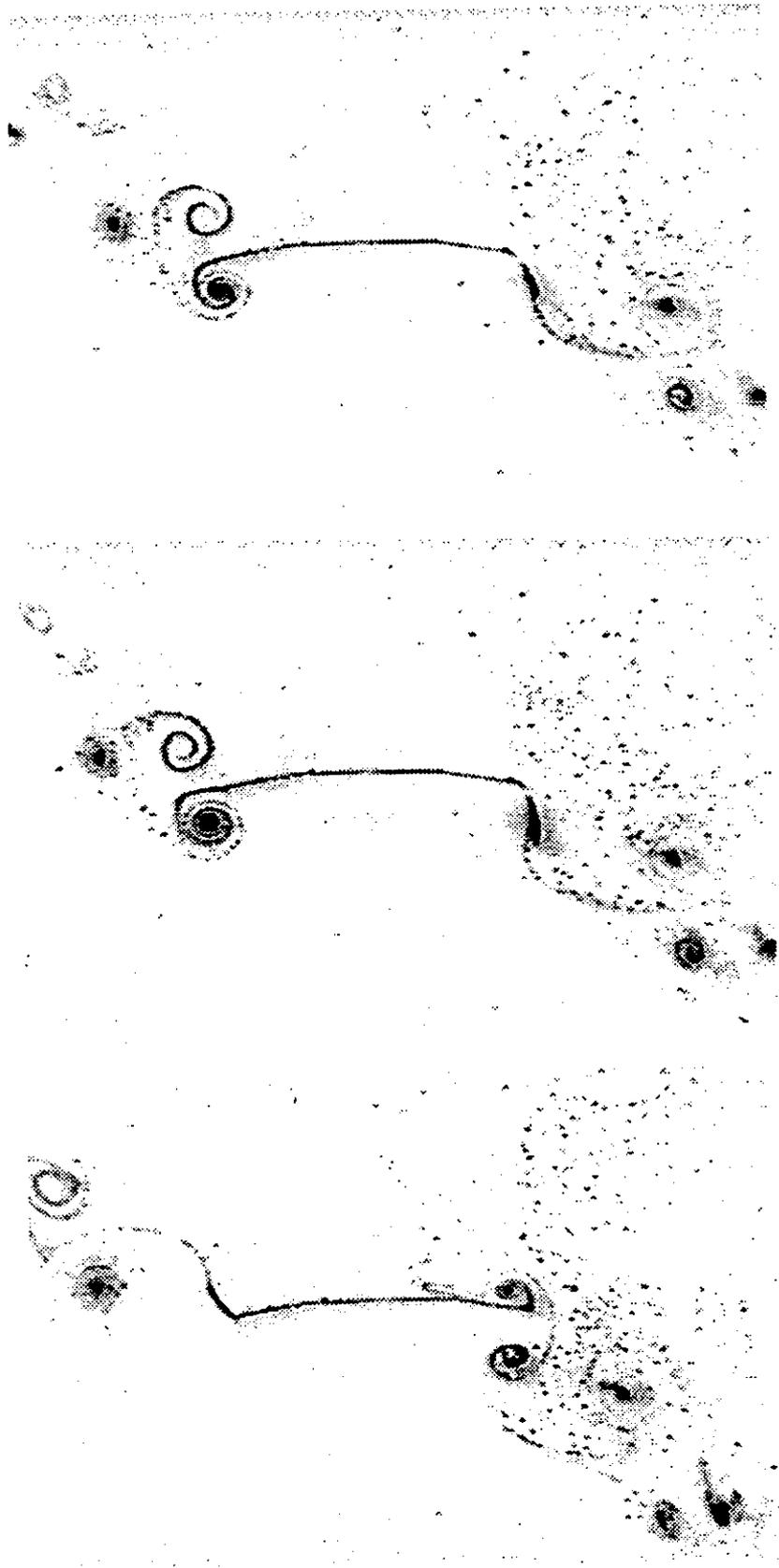


Figure 5: *Formation des structures tourbillonnaires autour de la plaque placée dans la houle*

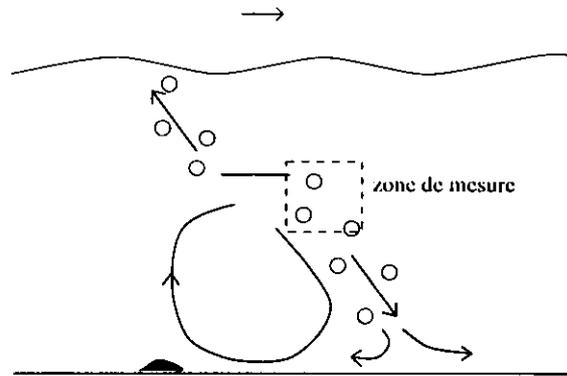


Figure 6: Schématisation de l'écoulement global autour de la plaque : les allées tourbillonnaires génèrent des jets, le jet aval balaie le fond du canal et par une recirculation sous la plaque, forme un bourrelet de dépôt à l'amont de la plaque

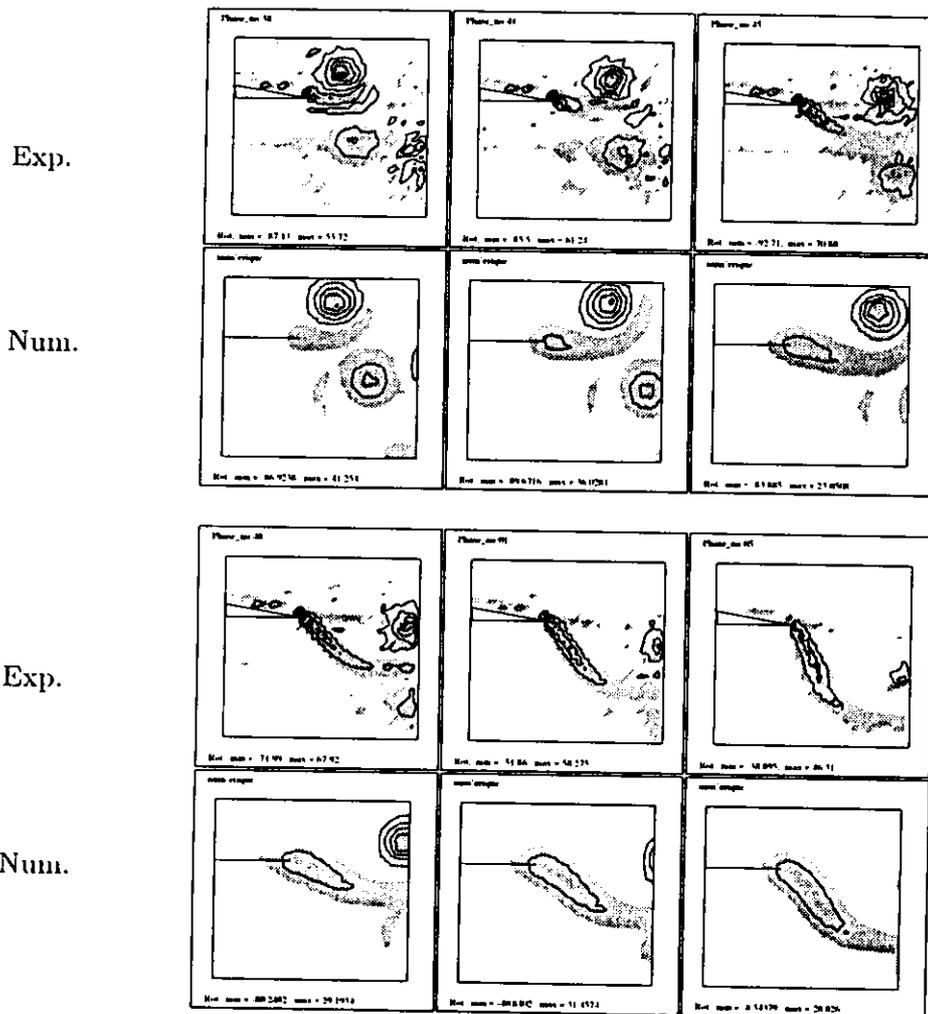


Figure 7: Comparaison des champs de vorticité expérimentaux et des champs de vorticité numériques (les lignes de niveau sont identiques sur les deux représentations)

