



ÉCOULEMENT TOURBILLONNAIRE ET ZONE D'AFFOUILLEMENT GÉNÉRÉS PAR LA HOULE EN PRÉSENCE D'UNE PLAQUE IMMERGÉE

B. BOULIER et M. BELORGEY

Laboratoire de Mécanique des Fluides du Havre
Quai Frissard - B.P.265 - 76055 Le Havre Cedex

Résumé

Notre étude porte sur l'écoulement généré au voisinage d'une plaque plane placée horizontalement dans un écoulement de houle bidimensionnelle, dans le but de l'amortir.

Cette plaque est à l'origine de la formation de deux nappes tourbillonnaires.

Une nappe se développe au bord amont de la plaque (relativement au sens de propagation de la houle) et se propage vers la surface libre; l'autre nappe se développe au bord aval et se propage vers le fond.

La nappe aval participe à une recirculation de grande amplitude sous la plaque et est à l'origine de phénomènes d'affouillement qui peuvent nuire à la stabilité de l'ouvrage.

Abstract

Our study concerns the flow generated in the vicinity of an horizontal wall set in a bidimensional wave flow, in order to damp down it. This wall generates two swirling layers.

One of them develops from the upper stream edge of the wall (relatively to the direction of propagation of the swell) and is propagated towards the free surface. The other develops from the downstream edge and is propagated towards the bottom.

The downstream layer participates to a large amplitude recirculation under the wall and generates a washout phenomena which may be prejudicial to the stability of the structure.

I INTRODUCTION

La protection des côtes nécessite souvent la mise en place d'ouvrages capables d'amortir ou d'arrêter la houle. Parmi les constructions possibles, il existe un amortisseur de houle constitué d'une plaque immergée horizontalement dans l'écoulement. Les effets d'une telle plaque sur la transmission et la réflexion de la houle ont

déjà fait l'objet de diverses études [1][2][3][4]. Les travaux que nous présentons ici portent sur l'écoulement engendré par la présence de la plaque. Une première étude a été effectuée au Laboratoire de Mécanique des Fluides du Havre [5][6] où la formation de tourbillons au bord aval de la plaque (relativement au sens de propagation de la houle) a été mise en évidence, par visualisation par injection de colorant et par Vélocimétrie Doppler Laser.

Nous avons poursuivi cette étude dans le but de comprendre les mécanismes de formation et d'évolution des tourbillons en adaptant la méthode de visualisation par bulles d'hydrogène. Ainsi, connaissant le comportement de l'écoulement autour de l'ouvrage il est possible d'en prévoir l'effet sur le fond et de prévenir les problèmes liés à l'affouillement.

Afin de simplifier le problème nous avons utilisé une plaque de petite dimension (corde notée l) par rapport aux longueurs d'onde (L) de houle utilisées. ($0,038 < l/L < 0,046$)

Nous avons mis en évidence la formation de deux nappes tourbillonnaires :

- une au bord de fuite amont qui se propage vers la surface libre.
- une au bord de fuite aval qui se propage vers le fond

La formation des tourbillons, initialement rectilignes, est étudiée dans un premier temps du point de vue bidimensionnel de manière à analyser la zone d'affouillement engendrée par l'impact des tourbillons sur le fond.

Nous avons ainsi pu caractériser celle-ci en fonction de la cambrure de la houle.

Cependant la durée de vie des tourbillons ainsi que leur énergie dépendent de phénomènes d'instabilités qui introduisent un aspect tridimensionnel très marqué, qui distord les filaments tourbillonnaires.

II MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

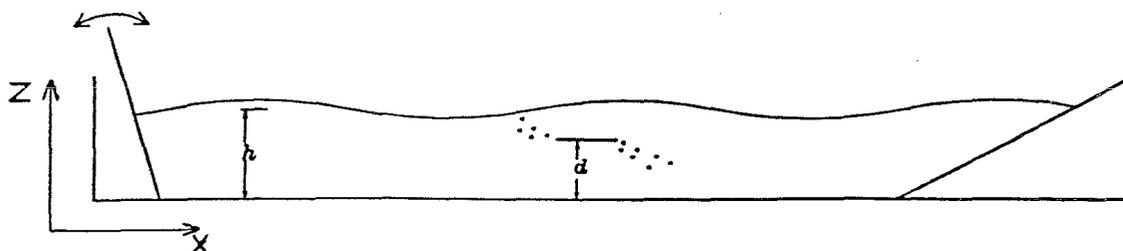


Figure 1 : Montage expérimental

L'approche choisie pour cette étude est l'observation directe du coeur tourbillonnaire.

La technique expérimentale que nous avons utilisée est la visualisation par bulles d'hydrogène, technique par laquelle on observe l'organisation de bulles gazeuses de très faible diamètre, créées par électrolyse.

L'électrolyse nécessite la mise en place dans l'eau de deux électrodes. La cathode d'où se dégageront les bulles d'hydrogène est un fil déployé le long du bord de fuite de la plaque, l'anode est une pièce d'inox disposée sous la plage d'amortissement de la houle.

Les bulles créées dans l'eau se concentrent au coeur du filet tourbillonnaire sous le simple effet du gradient de pression [7].

Cette technique possède une bonne résolution spatiale (les bulles définissent directement le coeur tourbillonnaire) et permet une visualisation immédiate en trois dimensions.

L'utilisation de l'électrolyse engendrant des problèmes de corrosion il a été nécessaire de construire un canal spécial dont aucune partie en contact avec l'eau n'est métallique.

- Un canal de petites dimensions a été utilisé (longueur de veine utile 3m, largeur et hauteur 30cm).

- La hauteur d'eau au repos est $d=0.2m$

- La plaque servant d'obstacle dans l'écoulement fait 30 cm de large et a une corde $l=5$ cm pour une épaisseur de 3 mm. Elle occupe toute la largeur du canal et peut être placée à différentes immersions. Sa corde a été choisie de petite dimension par rapport aux longueurs d'onde de houle utilisées (L) de manière à pouvoir considérer l'écoulement au niveau de la plaque comme uniforme à un instant donné ($0,038 < l/L < 0,046$).

- Les houles générées pour ces expériences sont quasiment monochromatiques. Les périodes utilisées sont : 0,95s - 1s - 1,05s - 1,1s.

- Les observations ont été effectuées dans les trois directions de l'espace et enregistrées sur bande vidéo.

- Les images acquises ont été traitées numériquement sur station INDIGO Silicon Graphics.

Pour les besoins de notre étude les coordonnées spatiales dans le canal sont repérées de la manière suivante (fig. 1):

- l'axe X est l'axe longitudinal du canal orienté positivement dans le sens de propagation de la houle
- l'axe Y : axe transversal horizontal du canal
- l'axe Z : axe vertical ascendant.

III GENERATION DES TOURBILLONS

La plaque placée dans le champ de houle constitue un obstacle autour duquel le champ de vitesse est instationnaire, elle génère des tourbillons qui se dégagent des arêtes transversales à la direction de propagation de la houle et absorbe ainsi une partie de l'énergie de celle-ci.

L'émission de tourbillons sur les bords de la plaque peut être assimilée à l'émission d'un tourbillon de démarrage comme on peut en observer au bord de fuite

d'un profil portant mis en mouvement impulsivement, ou dont l'incidence varie.

La plaque occupant toute la largeur du canal on peut considérer dans un premier temps le montage sous un aspect bidimensionnel dans le plan (X,Z).

A chaque période et à chaque bord de fuite il y a émission de deux tourbillons contrarotatifs.

L'un formé durant la demi-période où les vitesses ont une composante verticale $v_z < 0$, l'autre durant la demi-période suivante.

Au cours d'une période il y a donc émissions de quatre tourbillons et pour une succession de périodes l'ensemble des tourbillons forme deux nappes tourbillonnaires constituées par une succession de tourbillons alternés.

Nous observons expérimentalement une différence de comportement entre la nappe tourbillonnaire formée à l'aval (relativement au sens de propagation de la houle) et celle formée à l'amont. La nappe aval se propage vers le fond alors que la nappe amont se propage vers la surface libre.

La différence de trajectoire entre les deux nappes vient de la disposition relative des tourbillons dans les nappes.

Ainsi pour la configuration de l'expérience l'organisation des tourbillons dans les nappes s'explique de la manière suivante :

Les vitesses associées à un écoulement de houle sont instationnaires et au cours d'une période leur direction tourne de 2π dans un sens imposé par le sens de propagation de la houle. Si on considère une propagation de gauche à droite, la direction des vitesses dans la houle tournera dans le sens horaire. La trajectoire des particules dans la houle est elliptique. (fig. 2.f)

En posant $t=0$ au passage du creux, nous avons alors l'évolution suivante en décomposant une période de la houle T_{houle} (fig. 2):

Nous partons de la configuration de la figure 2-a où sont présents à proximité de la plaque deux tourbillons A et B ; A de signe positif à l'amont, B négatif à l'aval.

- entre $t=0$ et $t=1/4T_{houle}$ (passage de fig 2.a à fig 2.b) :

Nous sommes dans la partie I de la trajectoire orbitale de la houle.

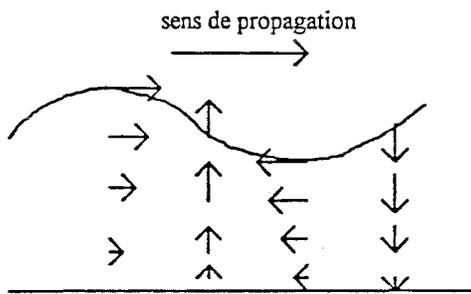
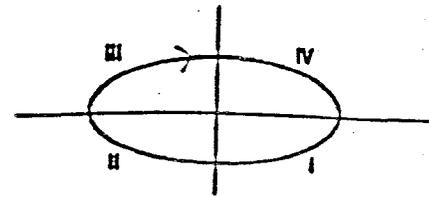
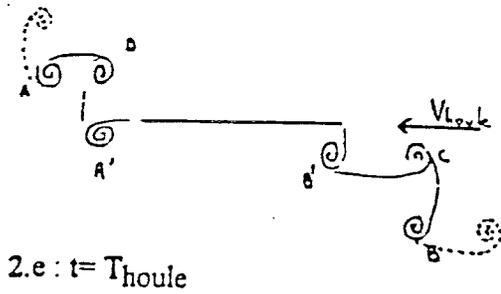
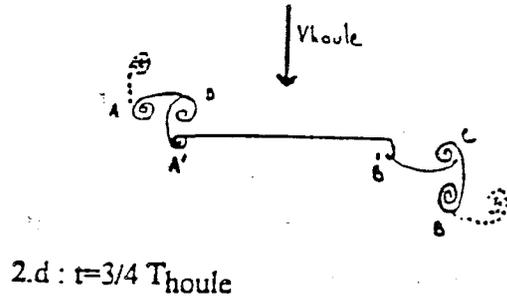
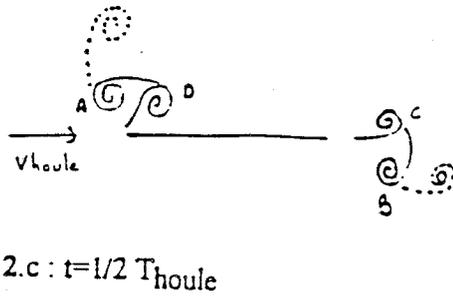
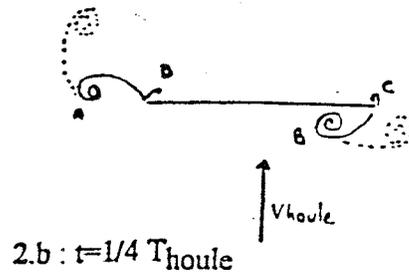
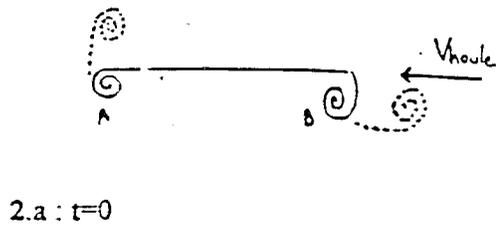
Les vitesses passent de l'horizontale dirigées vers l'amont à la verticale dirigées vers le haut. Ce mouvement provoque une advection vers l'amont puis vers la surface libre des tourbillons A et B présents dans la configuration initiale.

Il y a début de formation de deux nouveaux tourbillons $C > 0$ et $D < 0$ au dessus du niveau de la plaque

- entre $t=1/4T_{houle}$ et $t=1/2T_{houle}$ (fig 2.b à fig 2.c) :

La trajectoire "normale" de la houle est celle de la partie II de la figure 2.f. Les vitesses tournent pour devenir horizontales dirigées vers l'aval.

L'advection des tourbillons A et B se poursuit, mais le tourbillon B est bloqué dans son mouvement sous la plaque, le tourbillon A peut passer au dessus du niveau de la plaque. Les tourbillons C et D continuent leur formation. L'ensemble commence à être advecté vers l'aval.



vitesses dans la houle

Fig. 2 : Etapes de la génération des tourbillons

- entre $t=1/2T_{\text{houle}}$ et $t=3/4T_{\text{houle}}$ (fig 2.c à 2.d) :

On est dans la partie III de la trajectoire orbitale.

Le tourbillon D est venu se placer au-dessus de la plaque, le tourbillon C s'est éloigné en aval.

Le passage à la verticale dirigée vers le fond des vitesses fait descendre le tourbillon C sous le niveau de la plaque alors que D est à son tour généré par la plaque.

Deux nouveaux tourbillons sont en formation A' et B' sous le niveau de la plaque.

- entre $t=3/4T_{\text{houle}}$ et $t=T_{\text{houle}}$ (fig 2.d à 2.e) :

Les vitesses voient leur direction tourner pour redevenir comme dans la configuration de la figure 2.a.

La configuration obtenue au bout d'une période est donc, à chaque bord de fuite, émission de deux tourbillons, dont la position relative est directement liée au sens du mouvement orbital de la houle et à son amplitude. L'effet bloquant de la plaque impose que la nappe aval se forme sous le niveau de la plaque et la nappe amont au dessus du niveau de la plaque.

On obtient ainsi au cours du temps deux allées tourbillonnaires alternées qui imposent un mouvement vers la surface libre de la nappe amont et vers le fond de la nappe aval.

IV TRAJECTOIRE DES TOURBILLONS EMIS AUX ARETES DE LA PLAQUE

La trajectoire des tourbillons est la superposition de deux effets dissociables :

- une advection elliptique de faible amplitude engendrée par l'écoulement de houle

- un mouvement propre du tourbillon, induit par la présence des autres tourbillons, c'est à dire le mouvement de propagation d'une allée tourbillonnaire alternée.

La figure 3 représente un exemple des trajectoires observées expérimentalement. On y voit les trajectoires de 4 tourbillons négatifs (T_n) et deux positif (T_p) observés pendant 1,2 s. L'intervalle de temps entre les points est 0,08 s. Les caractéristiques de l'écoulement sont :

- $T_{\text{houle}}=1\text{s}$

- amplitude $a=12\text{mm}$

- profondeur $d=0,2\text{m}$

- immersion de la plaque $h=0,5\text{cm}$

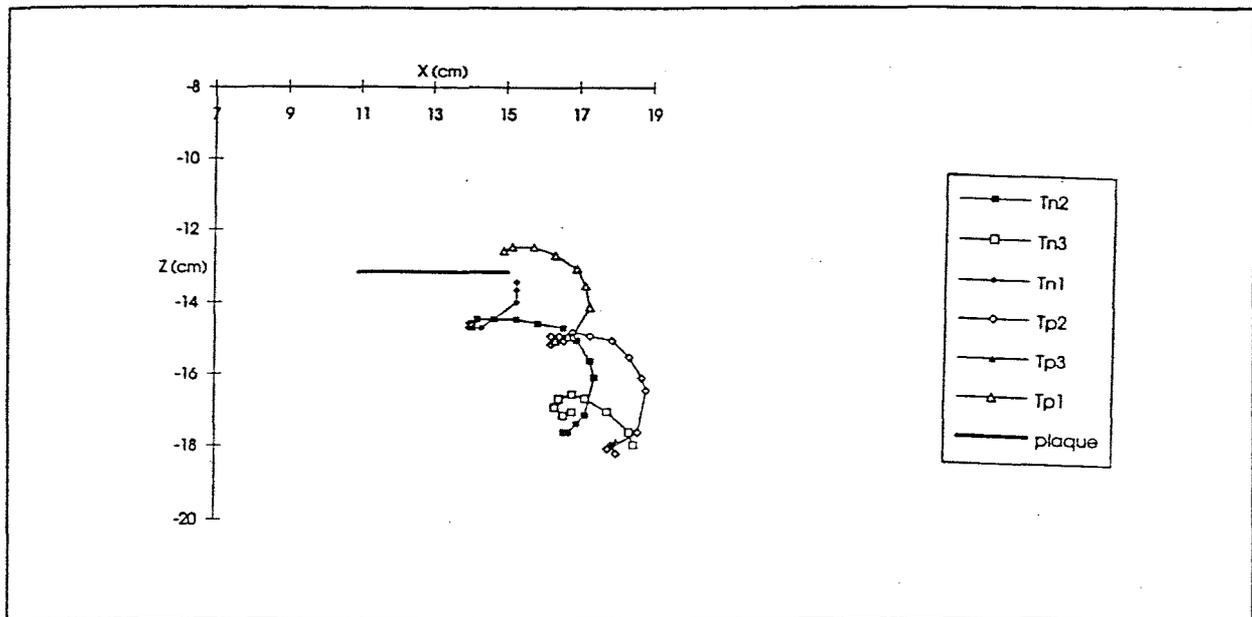


Figure 3 : Exemples de trajectoires dans la houle

C'est le champ de vitesses dû à l'effet des tourbillons les uns sur les autres qui donne l'allure générale du mouvement, la houle crée une oscillation autour de la trajectoire moyenne.

Le champ de vitesses dû aux tourbillons, peu après leur émission, est celui d'une allée tourbillonnaire alternée. La trajectoire sera donc tangente à la médiane entre les lignes reliant les tourbillons de même signe. Le sens de propagation des nappes tourbillonnaires sera celui des vitesses induites au niveau des tourbillons [8]. On voit

donc que la position des tourbillons émis impose la direction de la trajectoire

C'est l'inversion de l'ordre d'alternement et la position relative des tourbillons positifs et négatifs dans les nappes qui fait que l'une se propage vers le fond alors que l'autre monte vers la surface libre

Nos résultats montrent que seule la nappe aval se propage vers le fond, nous présentons donc ici les caractéristiques de son développement car c'est elle qui est susceptible d'intervenir dans les phénomènes d'affouillement.

V ASPECT GENERAL DE LA TRAJECTOIRE DE LA NAPPE AVAL

Si on fait abstraction des mouvements elliptiques, la trajectoire de la nappe tourbillonnaire aval est incurvée vers l'amont (fig. 4)

Ce mouvement doit provenir d'une différence d'intensité entre les tourbillons positifs et les tourbillons négatifs qui pourrait être expliquée par la différence de formation entre ces deux types de tourbillons liée à la nature elliptique des trajectoires dans la houle

Si on regarde par exemple les deux tourbillons C et B' (fig. 2), le tourbillon C est le résultat d'un décollement et d'un enroulement de l'écoulement derrière un obstacle (fig. 2.b) qui sera alimenté par la couche limite inférieure de la plaque (fig 2.c), alors que le tourbillon B' est d'abord le résultat de la couche limite supérieure de la plaque (fig. 2.c) qui finit par décoller et s'enrouler (fig. 2.d). Ainsi cette différence dans la formation des tourbillons peut-elle expliquer une différence d'intensité.

Il est à noter que vue l'épaisseur de la plaque (3 mm), on peut supposer que les vitesses dans la houle sur les deux faces sont identiques bien que décalées dans le temps et que, par conséquent, les couches limites doivent être équivalentes.

Un autre phénomène peut intervenir dans la différence d'intensité entre les tourbillons positifs et négatifs, c'est le sens des trajectoires elliptiques de la houle qui peut influencer sur le rotationnel des tourbillons comme cela à déjà été constaté lors de l'étude de l'écoulement autour de cylindres placés dans la houle [9].

De prochaines mesure devraient éclaircir ce point.

Les expériences nous montrent que les tourbillons eux même se déstructurent au bout d'environ deux à six périodes (suivant les conditions). Mais les bulles entraînées permettent d'observer un mouvement de fluide jusqu'au fond, comme un jet, et une circulation sous la plaque.

La déstructuration précoce des tourbillons nous amène à considérer la zone d'influence des tourbillons plutôt que la trajectoire proprement dite (fig. 4).

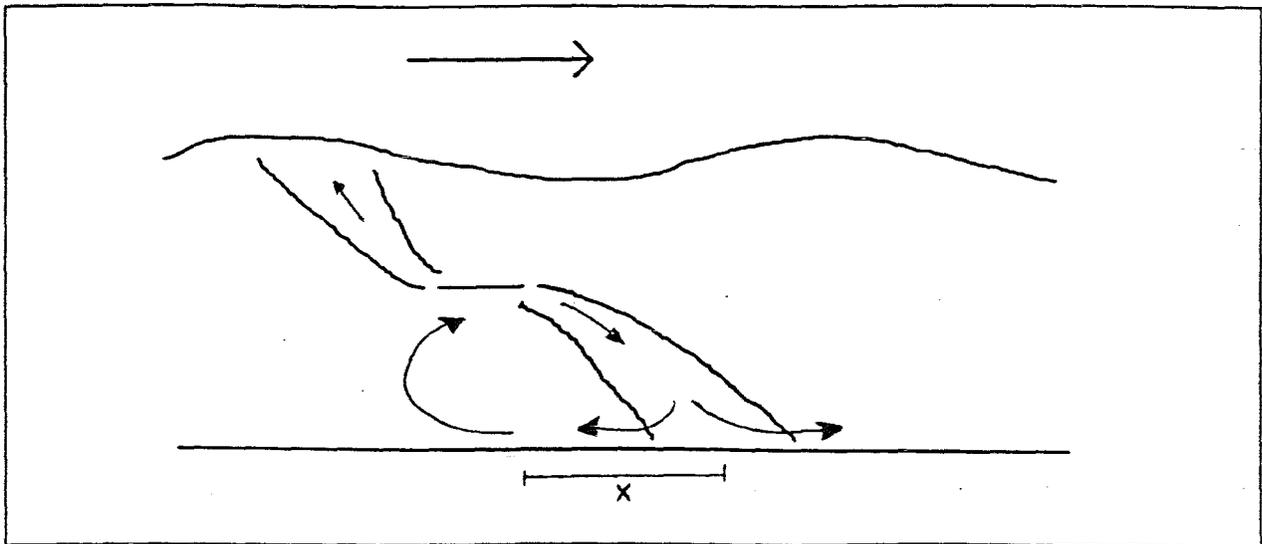


Figure 4 : Aspect général de l'écoulement dans le plan (X,Z).

Dans la caractérisation de la nappe aval, nous avons tracé, figure 5, les relevés de la distance horizontale entre l'impact de la nappe au fond et l'aplomb du bord de fuite

X en fonction de la cambrure de la houle. Nous voyons ainsi que ce rapport est une fonction exponentielle décroissante de la cambrure pour les houles étudiées.

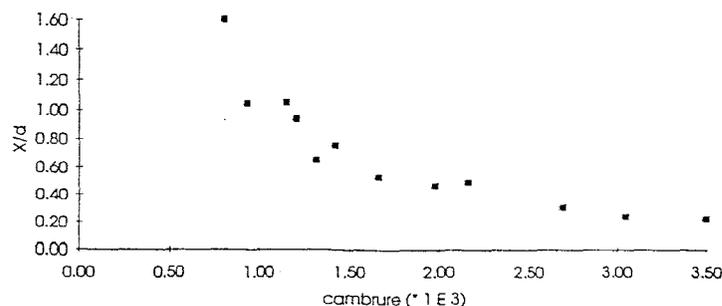


Figure 5 : Influence de la cambrure de la houle sur la distance d'impact de la nappe tourbillonnaire aval.

L'effet de jet que produit la nappe avale sur le fond se traduit par un déplacement des sédiments de part et d'autre de la zone d'impact. Le fond du canal d'expérimentation est balayé sur environ trois cordes, et vers l'amont il se forme un bourrelet de sédiments en amont du point d'impact

Sous la plaque, on observe une grande circulation, capable d'entraîner les bulles d'hydrogène, de période voisine de $10 T_{houle}$.

VI ASPECT TRIDIMENSIONNEL

Les tourbillons émis aux bords de la plaque n'ont pas un comportement bidimensionnel comme nous l'avons

supposé pour expliquer la montée et la descente des nappes tourbillonnaires.

Nous avons en effet mis en évidence une déstabilisation des tourbillons, dont le coeur (visualisé par notre méthode expérimentale) se déforme en ondulant, se met en hélice par les extrémités et finit par se déstructurer.

La figure 6 donne une vue à 45° de la nappe tourbillonnaire et on y voit très bien les ondulation des filaments.

Les interactions tourbillonnaires modifiées par les déformations tridimensionnelles des tourbillons agissent aussi dans la dissipation des structures tourbillonnaires.

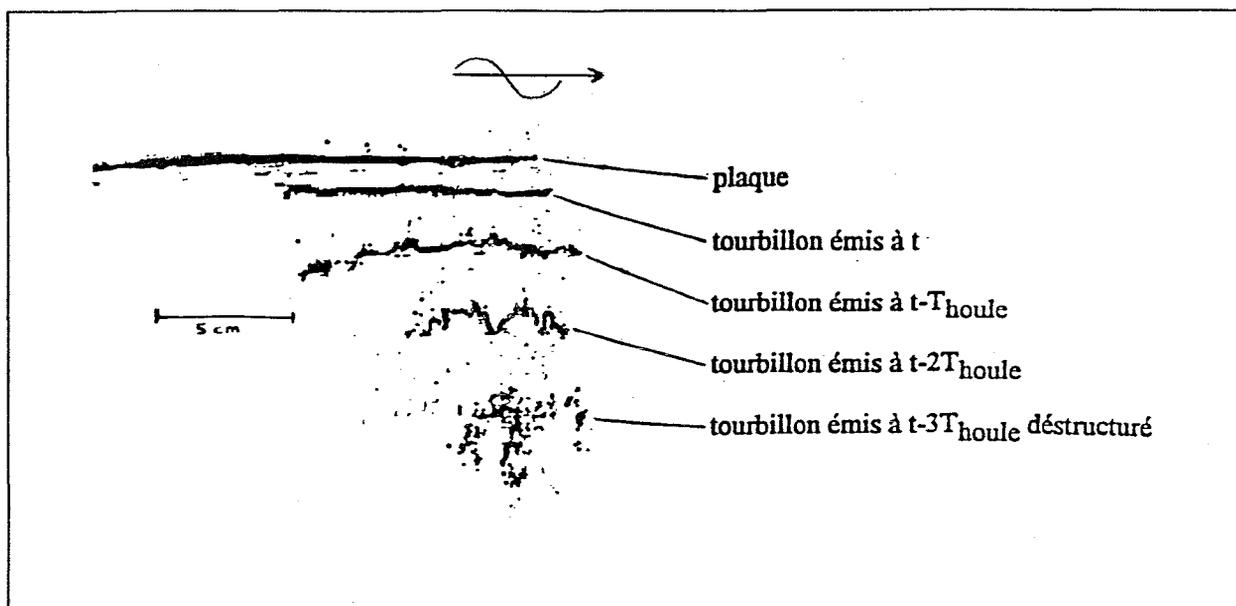


Figure 6 : Aspect tridimensionnel de l'écoulement (vue à 45° dans le plan (X,Y)).

CONCLUSION

Notre étude nous a permis de caractériser l'écoulement engendré par une plaque plane placée horizontalement dans un écoulement de houle, devant servir d'amortisseur de houle.

Notre résultat principal est que deux nappes tourbillonnaires, formées d'une succession de tourbillons contrarotatifs, se dégagent des bords de fuite de la plaque :

- la nappe générée au bord amont se propage vers la surface libre
- la nappe générée au bord aval se propage vers le fond.

Notre étude visant à prédire les phénomènes d'affouillement porte sur la nappe aval pour laquelle les caractéristiques les plus importantes sont les suivantes :

- La trajectoire globale de la nappe tourbillonnaire aval est incurvée vers l'amont et participe à une recirculation générale sous la plaque avec transport sédimentaire.
- La distance entre le lieu d'affouillement et la verticale au bord de fuite en fonction de la cambrure de la houle

nous donne une relation exponentielle décroissante dans la gamme étudiée.

Nous voyons donc que l'utilisation d'une plaque comme amortisseur de houle génère un écoulement très particulier dont il faudra tenir compte lors de la mise en oeuvre ; cet écoulement pouvant nuire, à l'aval de l'ouvrage, à la stabilité du fond.

Pour une meilleure compréhension des phénomènes, il faudra étudier les effets 3D, dus à des instabilités, à l'origine de la déstructuration des tourbillons et d'une forte production de turbulence.

Par ailleurs la nappe amont qui se propage vers la surface libre constitue un rideau de tourbillons faisant obstacle à la propagation de la houle et participe ainsi au phénomène d'amortissement du système global.

Une prochaine étude devrait nous permettre d'en préciser les effets.

Références

- [1] Guevel, Landel. 1986. Techniques nouvelles de brise-houle et de protection des sites côtiers. PIANC, AIPCN, 52.
- [2] Patarapanich. 1984. Maximum and zero reflection from submerged plate. J of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., 10, 171-181.
- [3] Patarapanich. 1989. Reflection and transmission characteristics of regular and random waves from submerged horizontal plates. Coastal Eng., 13, 161-182.
- [4] Siew, Hurly. On surface waves incident on a submerged horizontal plate.
- [5] Brossard. 1986. Contribution à l'étude de la turbulence à travers l'analyse d'un écoulement généré par la houle entre deux plaques. Thèse de 3^e cycle, Rouen.
- [6] Brossard, Belorgey. 1987. Contribution à l'étude des fluctuations dans un écoulement complexe. C.R.A.S., 305, II, 939-942.
- [7] Douady, Couder, Brachet. Direct observation of the intermittency of intense vorticity filaments in turbulence. Physical Review Letters, 67, 8.
- [8] Guyon, Hulin, Petit. Hydrodynamique physique. Edition CNRS.
- [9] Lambert E. (à paraître). Thèse de l'Université du Havre.

QUESTION DE MONSIEUR GUEVEL

Ce travail, essentiellement expérimental, est-il poursuivi par vous-même ou par vos collègues du Laboratoire de Mécanique des Fluides du Havre par une approche théorique fondée, par exemple, sur une méthode particulière très bien adaptée au cas d'un obstacle présentant des arêtes vives?

RÉPONSE

Parallèlement à notre étude expérimentale, une collaboration avec E. Rivoalen nous a permis de débiter une modélisation numérique du problème.

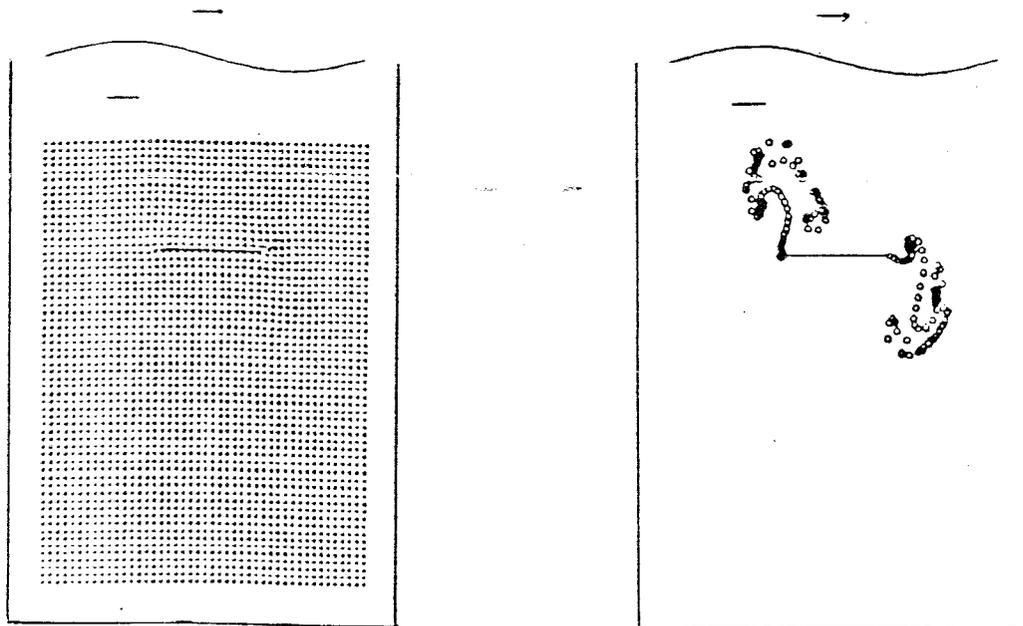
Cette simulation a été réalisée dans le cadre des écoulements de fluide parfait incompressible tridimensionnel et instationnaire.

La méthode utilisée est particulièrement bien adaptée à l'étude des écoulements irrotationnels "presque partout" sauf dans des zones limitées de l'écoulement.

Pour représenter des zones rotationnelles, nous utilisons une méthode de tourbillons ponctuels en considérant que les deux points anguleux de plaque sont générateurs de la vorticité au sein de l'écoulement.

La formulation du problème est intégrale et seules les frontières du domaine, c'est-à-dire la plaque, sont à mailler.

Les figures ci-dessous représentent un exemple des résultats obtenus.



Champ de vitesse et ligne d'émission des particules