

Caractérisation de l'impact d'un jet plan plongeant impulsif – Application à l'étude du déferlement de la vague d'étrave.

Characterization of an impulsive plunging plane jet impact – Application to the study of a stem breaking waves

Raphaël D. RAJAONA, Luc RAKOTONDRAJAONA, Karim GALA,
Laboratoire de Mécanique, Physique et Géosciences
53 Rue de Prony
Université du Havre

Résumé

Une étude expérimentale de la reconnection d'un jet plan impulsif sur un plan d'eau au repos est présentée. L'étude se place dans le cadre de la caractérisation d'un déferlement plongeant notamment celle de la vague d'étrave d'un navire de surface. Le dispositif est constitué d'un injecteur permettant la formation d'un jet plan d'une épaisseur moyenne de 5 mm sur une largeur de 30 cm. La hauteur de chute est réglable ainsi que le débit du jet. La géométrie globale de l'impact fluide/fluide est étudiée ensuite par une technique de visualisation utilisant la séquence vidéo obtenue par deux caméras, utiles pour une vue de face et de profil. Les efforts d'impact mis en jeu sont mesurés en utilisant une balance hydrodynamique, constitué par un cylindre horizontal de 4 cm de diamètre et de 65 cm de long. La balance est pilotée par un système de positionnement permettant de mesurer les effets de la diffusion du jet en fonction de la profondeur.

Summary

An experimental study of an impulsive plunging plane jet impacting over a free surface otherwise at rest is presented. The study is conducted in the frame of the plunging breaking waves, specifically those observed at the bow of a surface vessel. The experimental setting consists of an injector able to generate a plane jet of 5 millimeters thickness and 30 centimeters width. The drop height between the injector and the free surface can be varied from 24 cm to 48 cm. The global pattern of the fluid/fluid impact is studied by using a visualization technique based upon video sequences given by two cameras available for front and lateral views. The momentum involved during the jet impact and the bubbles cloud inception is measured by using a hydrodynamic transducer, consisting of a horizontal cylinder of 4 cm diameter and 65 cm length. The transducer is piloted by a positioning system allowing the measurement of the jet diffusion for various depth values.

I Introduction

L'étude du déferlement marin constitue un problème difficile qui mobilise bon nombre de chercheurs [1][2][4][10]. Une majorité de ces études est cependant consacrée à l'étude du déferlement glissant [3][5][6]. Très peu de littérature est consacrée à l'étude du déferlement plongeant. Celui-ci arrive fréquemment pour un navire de surface. En effet, à certaines vitesses, un tel navire peut provoquer un déferlement observable au droit de l'étrave. Ce déferlement est caractérisé par la reconnection d'une lame d'eau qui longe la carène et se déverse ensuite sur les côtés de l'étrave. L'étude hydrodynamique de ce déferlement est complexe du fait de la nature diphasique de l'écoulement [7][8][9]. Il est constitué avant la reconnection par une lame plus ou moins épaisse incluant une masse d'eau, de la vorticité, des micros bulles d'air. Une fois la reconnection de cette lame avec la surface libre faite, l'impact fluide/fluide engendre divers phénomènes liés à la dissipation de l'énergie soit par la création de bulles d'une granulation non uniforme ou de gouttelettes d'eau et d'une couche de cisaillement libre sous la surface libre. Ces bulles d'air sont véhiculées le long de la carène sous la surface libre pour venir se mélanger avec le sillage propre du navire. La durée de vie des bulles dépend essentiellement de leur taille. Il est bien connu que les bulles les plus petites présentent la durée de vie la plus longue [11]. Elles sont donc les plus faciles à écouter et peuvent nuire ainsi à la discrétion de navire. A terme cette étude doit permettre d'aider à caractériser la forme de l'étrave d'un navire et d'en déduire les paramètres les plus significatifs pour ce type de déferlement. Le LMPG en collaboration avec la DGA, Bassin d'Essais des Carènes du Val-de-Reuil et le Laboratoire d'Acoustique Ultrasonore et d'Electronique de l'Université du Havre, entreprend un programme dédié à la caractérisation du déferlement de la vague d'étrave.

L'objet du travail expérimental présenté constitue une première étape et propose un modèle expérimental simplifié de la vague d'étrave en vue de préparer la méthode de mesures définitive. La déferlante plongeante est représentée par un jet plan stationnaire ou impulsif qui impacte une surface libre au repos. On présente quelques techniques expérimentales pour caractériser les différentes configurations de l'impact, en particulier on étudie l'évolution des efforts d'impact en fonction de la hauteur de chute et de la durée de l'impact et cela pour plusieurs profondeurs. L'accent sera mis sur l'étude du mécanisme de pénétration du jet, de formation des bulles puis de leur durée de vie.

Mots Clefs : Surface libre – Déferlement – nuages de bulles – Impact fluide/fluide – Instrumentation – visualisation.

II Méthodologie expérimentale

La cuve et la balance hydrodynamique

Nous avons adapté le montage expérimental utilisé lors de travaux précédents [3] et que nous rappelons ci après. Une cuve de 2m X 1m X 1m est remplie d'eau douce sur une hauteur de 80 cm avant l'expérience. La cuve permet une visualisation de l'écoulement interne provoqué par l'impact du jet plongeant. Les parois latérales et le fond sont en plexiglas. Au dessus de cette cuve un croisillon supporte la balance hydrodynamique qui permettra la mesure des efforts d'impact verticaux et horizontaux. La balance est un cylindre lisse horizontal soutenu par deux flasques. Il est instrument  et est muni d'un capteur de force à trois composantes de type KISTLER. Seules les composantes verticales et horizontales sont utilisées. Le flasque est lui-même solidaire d'un dispositif d'entraînement dont le déplacement

est obtenu par deux moteurs pas à pas permettant son positionnement avec un pas de 0.1 mm selon l'axe horizontal x et 0.125 mm selon l'axe vertical y. Les moteurs sont pilotés par une commande numérique. Une représentation schématique de la cuve, du croisillon, de la cuve amont, de l'injecteur et de la balance est illustrée sur la figure 1

L'Injecteur

Un dispositif de génération d'un jet plongeant plan impulsif a été mis en place.

Pour générer l'impact, on dispose d'une cuve amont permettant une charge de 80 cm d'eau. Cette cuve est alimentée par un moteur placé au fond de la cuve de visualisation. Le tuyau d'aspiration est placé dans le double fond de la cuve afin de ne pas perturber l'écoulement au voisinage de la zone d'impact. L'injecteur est constitué par deux plaques de 25 cm X 15 cm séparées de 5 mm, étanche sur le pourtour et pouvant laisser passer l'eau par la section de sortie, 25 cm X 5 mm. Une trappe actionnée manuellement permet d'ouvrir ou de fermer l'injecteur pendant la durée de l'impact. La trappe est constituée par une plaque articulée qui obture la sortie par compression d'un ressort. Ce dispositif est représenté sur la figure 2.a.

La figure 2.b. représente une coupe schématique de l'écoulement lors de l'impact. H la hauteur de chute sépare la section de sortie de la surface libre, l'immersion de la balance est la distance entre la surface libre moyenne et l'axe horizontal de la balance.

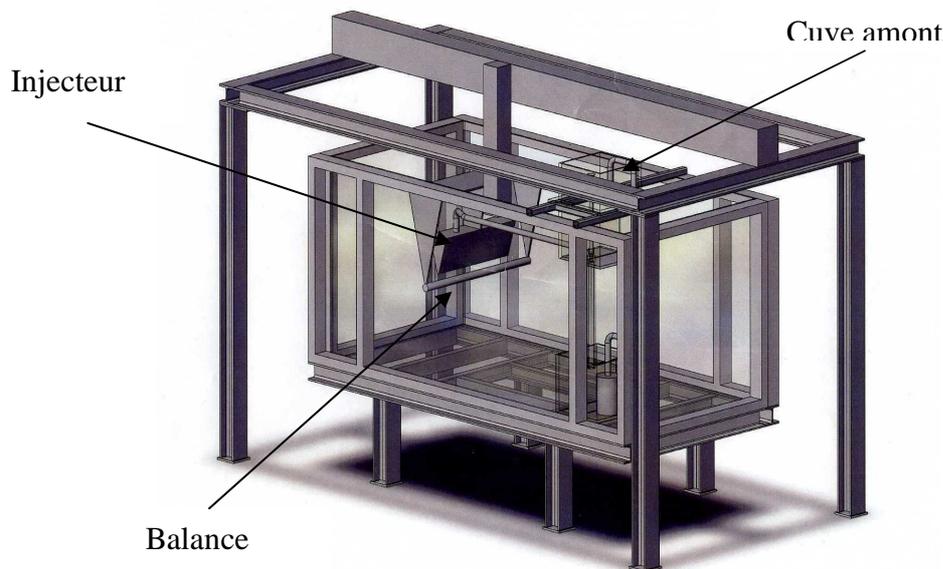


Figure 1 : Cuve de visualisation montrant l'injecteur 1, la balance 2, la cuve amont 3

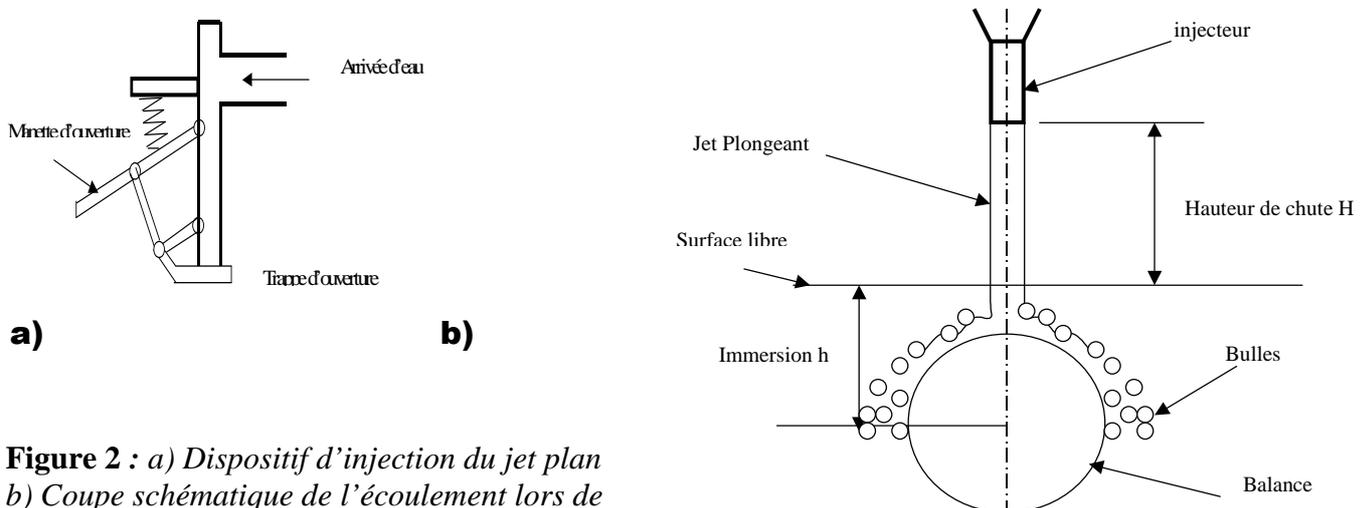


Figure 2 : a) Dispositif d'injection du jet plan
b) Coupe schématique de l'écoulement lors de l'impact.

La quantité d'eau injectée lors de l'impact est mesurée en utilisant une sonde permettant de relever le niveau d'eau dans la cuve amont. La durée de l'impact est mesurée à partir de l'analyse du signal de la sonde. Cette mesure est par la suite vérifiée à partir de l'enregistrement des efforts. Une chaîne d'acquisition permet de numériser les signaux relatifs au positionnement de la balance, aux efforts d'impact et au niveau d'eau dans la cuve amont.

Système de visualisation

Le système de visualisation est constitué d'une part d'une caméra permettant la visualisation de face puis une deuxième caméra est utilisée pour la vue de côté. L'éclairage est indirect et obtenu par un projecteur. Les images des deux caméras sont synchronisées par un flash laser qui permet de recaler les prises de vue. Il s'est avéré que le système d'éclairage doit être réglé avec beaucoup de minutie car les bulles ont un pouvoir réflecteur important qui nécessite un dosage de la lumière.

La technique de visualisation repose sur l'enregistrement d'une séquence représentant l'impact. On peut observer l'évolution de la phase diphasique qui correspond à l'amortissement de l'énergie par la formation de bulles et par la présence de vorticité. Pour cela deux caméras sont utilisées pour filmer une vue de côté et une vue de face du nuage de bulles. Lors des expériences de visualisation la balance n'est pas mise en place afin de ne pas perturber l'évolution du nuage de bulles sous l'eau. L'étude phénoménologique est faite à partir de l'analyse image par image sur les deux clichés.

Paramètres d'étude :

Les paramètres physiques retenus sont la quantité d'eau injectée, la hauteur de chute, la profondeur d'immersion de la balance. Le taux de vide dans le nuage dépend de la tension superficielle et des paramètres précédents. Car il apparaît que l'énergie du jet est majoritairement absorbée par la formation des bulles.

III Mise en œuvre de la méthode expérimentale

III.1. Etude du jet stationnaire

Une première étape consiste à étudier le phénomène dans le cas où le jet est stationnaire. Cette étape permet entre autre la mise au point de l'instrumentation et de la méthodologie.

La figure 3 montre l'évolution de l'effort vertical en fonction de l'immersion de la balance pour trois débits 0.78l/s, 0.85l/s et 0.35 l/s. L'expérience est réalisée pour trois hauteurs de chute 40 cm, 35, cm et 30 cm. On observe que l'effort diminue en raison de la diffusion du jet et du taux de bulles plus élevé en profondeur.

Evolution de l'effort en fonction du temps de versement à débit constant

Une seconde expérience a été réalisée en injectant la même quantité d'eau mais pour différentes durées. Le maximum de l'effort pour toutes les profondeurs étudiées correspond au temps de versement le plus court. Ce résultat est classique car la quantité de mouvement est proportionnelle au débit. Il est intéressant de le souligner car la création de bulles crée dépendra de la quantité d'eau impactant la surface libre.

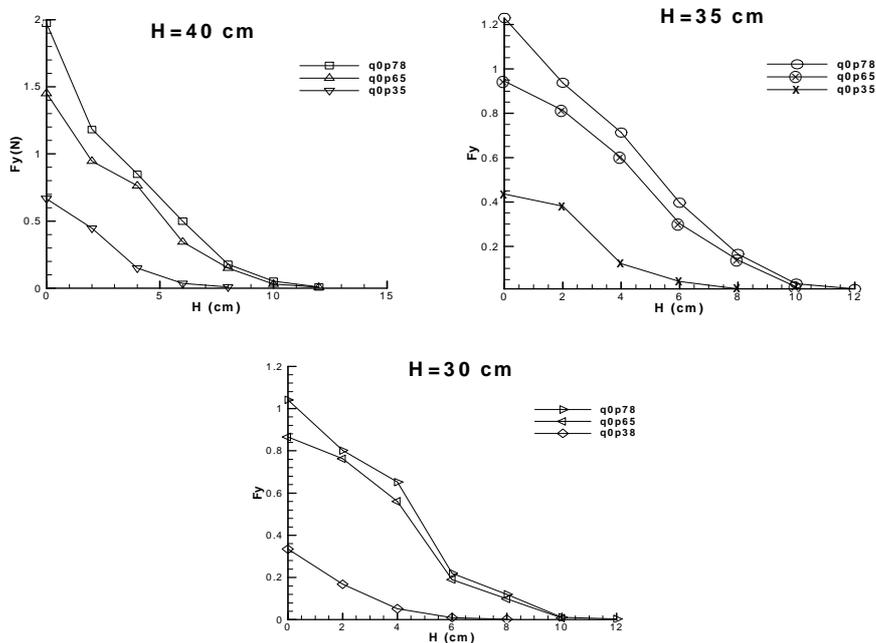


Figure 3 : Evolution des efforts verticaux en fonction de l'immersion de la balance et pour trois débits 0.78 l/s, 0.65 l/s et 0.35 l/s

Allure du nuage de bulles

Les images de la figure 4 représentent une vue de face et de profil du nuage de bulles pour un débit de 0.78l/s et une hauteur de chute de 30 cm. Ces images montrent que les côtés du nuage ont une pénétration plus grande. Les deux langues sur les bords proviennent de deux bourrelets qui forment les frontières latérales de la nappe et qui contient, donc, plus d'eau que la partie plane centrale.



a)



b)

Figure 4 : Vue de face et de profil d'un jet stationnaire pour un débit de 0.78l/s ; a) vue de face, on observe trois langues dues à la non uniformité de création des bulles et de la répartition de la quantité de mouvement dans le jet ; b) vue de côté, le jet s'épaissit en profondeur

Bruit émis par une bulle :

Un hydrophone a été installé au sein du domaine fluide et le bruit émis par une bulle unique générée en soufflant dans un tube a été analysé. L'application de la formule Minnaert permet de calculer le diamètre de la bulle. La bulle a été générée en soufflant dans un tube.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{3\gamma}{\rho R_0^2} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) - \frac{2\sigma}{R_0} \right]^{1/2}$$

où γ est la constante de l'air, R_0 le rayon de la bulle sphérique, σ la tension superficielle, f_0 la fréquence de résonance de la bulle

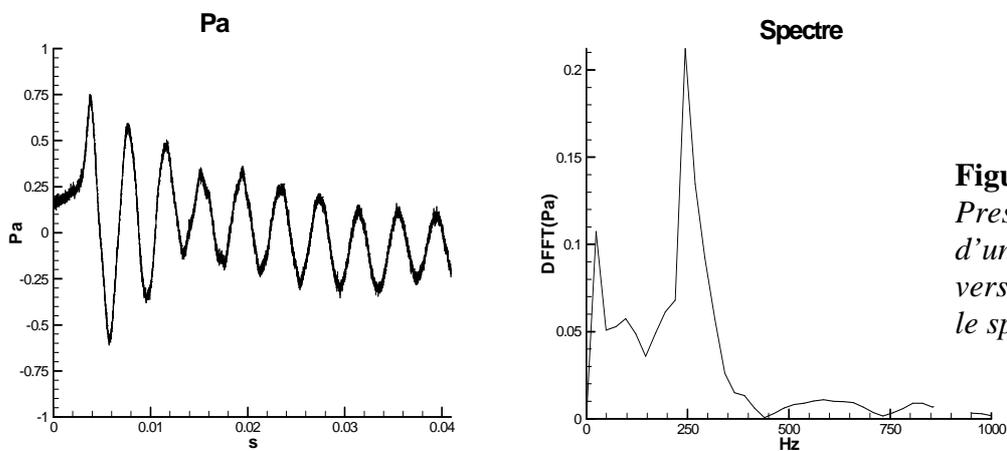
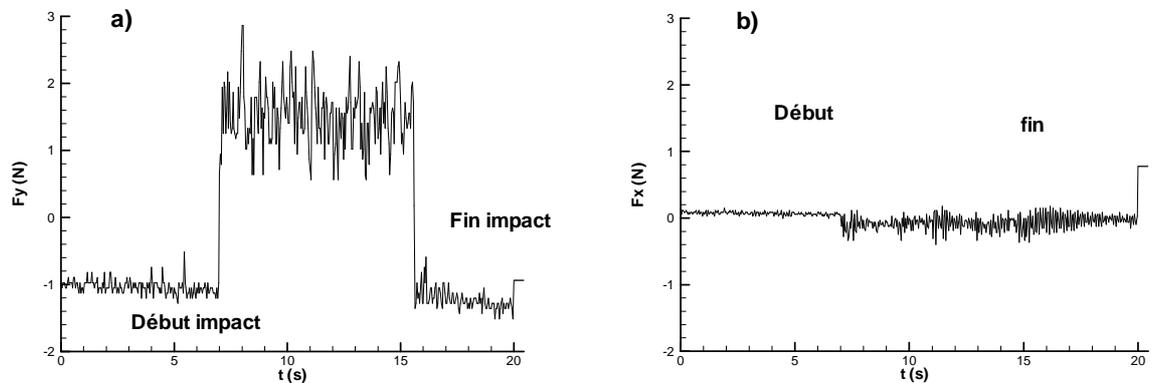


Figure 5 :
*Pression acoustique
d'une bulle remontant
vers la surface libre et
le spectre associé*

III.2. Etude du jet impulsif

Impact sur la balance dans l'air

Les expériences pour un jet impulsif dans l'air ont été réalisées pour plusieurs hauteurs de chute. Dans ce cas les variations de la force verticale ont été peu sensibles à la variation de hauteur.



Figures 6 *Evolution des efforts d'impact dans la direction verticale a) et horizontale b) sur la balance dans l'air. Les conditions expérimentales sont $H=29$ cm*

Le volume d'eau injecté varie entre 4 et 6 litres, selon les expériences. Ce volume est injecté sur une durée de 7 à 8 secondes. Nous avons aussi retenu cette durée pour avoir suffisamment de données permettant l'observation de la phase de pénétration du jet.

IV. Etude phénoménologique de l'impact :

IV.1. Vue de face

Nous avons représenté sur la figure 7 une série de clichés représentant l'évolution de la topologie de la pénétration de la lame d'eau pour une hauteur de chute (H) de 24,5 cm et une durée de 9,04s. Cette expérience correspond à une profondeur d'eau de 39,5 cm (la distance entre la surface libre et le fond de la cuve). Les images a-d illustrent le début de l'impact du jet avec la surface libre. On observe la dissymétrie de la lame pénétrant la surface libre. Ainsi la vitesse est plus grande le long des bords qu'au milieu et ceci est dû à la tension superficielle. Par ailleurs les bords de la nappe forment deux bourrelets contenant plus de particules d'eau que la partie centrale. Ce phénomène est aussi observé pour l'impact d'une masse d'eau sur une surface solide. Le phénomène de « digitation » du jet est alors attribuée à l'instabilité de la nappe et la création de bulles. La conséquence en est une plus grande vitesse de pénétration et la création d'une ou plusieurs bulles qui sont éjectées vers le fond d. Le jet continue à pénétrer sur les images e-f avec une « homogénéisation » de la partie du front et il atteint sa position limite basse dans f au bout de 4,44s. Notons qu'alors l'ensemble du nuage occupe le volume maximum. A partir de ce moment, toute la quantité d'eau apportée par l'impact est versée et les vitesses au sein du nuage de bulles changent de sens, toute la zone remonte en g-h. Nous notons la formation d'une onde de forme grossièrement ovalisée au niveau de la surface libre. On peut la voir clairement sur l'image i. Le bourrelet à la surface est créé par les grandes bulles d'air qui s'étalent en couronne avant d'éclater clichés j-k. Sur les clichés l-n, on observe que le temps de remontée vers la surface libre est plus court sur les bords qu'au milieu. Ce qui signifie sans doute que le diamètre des bulles est plus grand à cet endroit. La phase finale de l'impact du jet est montrée sur les images n-o, et sur p les dernières bulles d'air rejoignent la surface libre avant d'exploser.

Les observations générales que l'on peut retenir de cette analyse sont que la lame d'eau perd sa forme de jet plan une fois que l'impact a eu lieu. Sous la surface libre naissent des bulles et des structures qui se détachent de l'ensemble du jet au cours de la pénétration de la lame d'eau. La phase liquide se transforme au fur et à mesure de sa pénétration en mélange de bulles d'air et d'eau. Cette phase liquide est observable sur une distance de l'ordre du dixième de la profondeur de pénétration. Cette pénétration dure tant que la masse d'eau versée initialement n'a pas complètement impacté la surface. Lorsque la masse d'eau est déversée, on observe un mouvement ascensionnel de l'ensemble des bulles. Les bulles remontent sous l'effet de la poussée d'Archimède et au contact de l'interface forment un bourrelet avant d'éclater. L'arrivée des bulles sur la surface libre engendre des petites vagues de radiation qui s'éloignent du point d'impact.

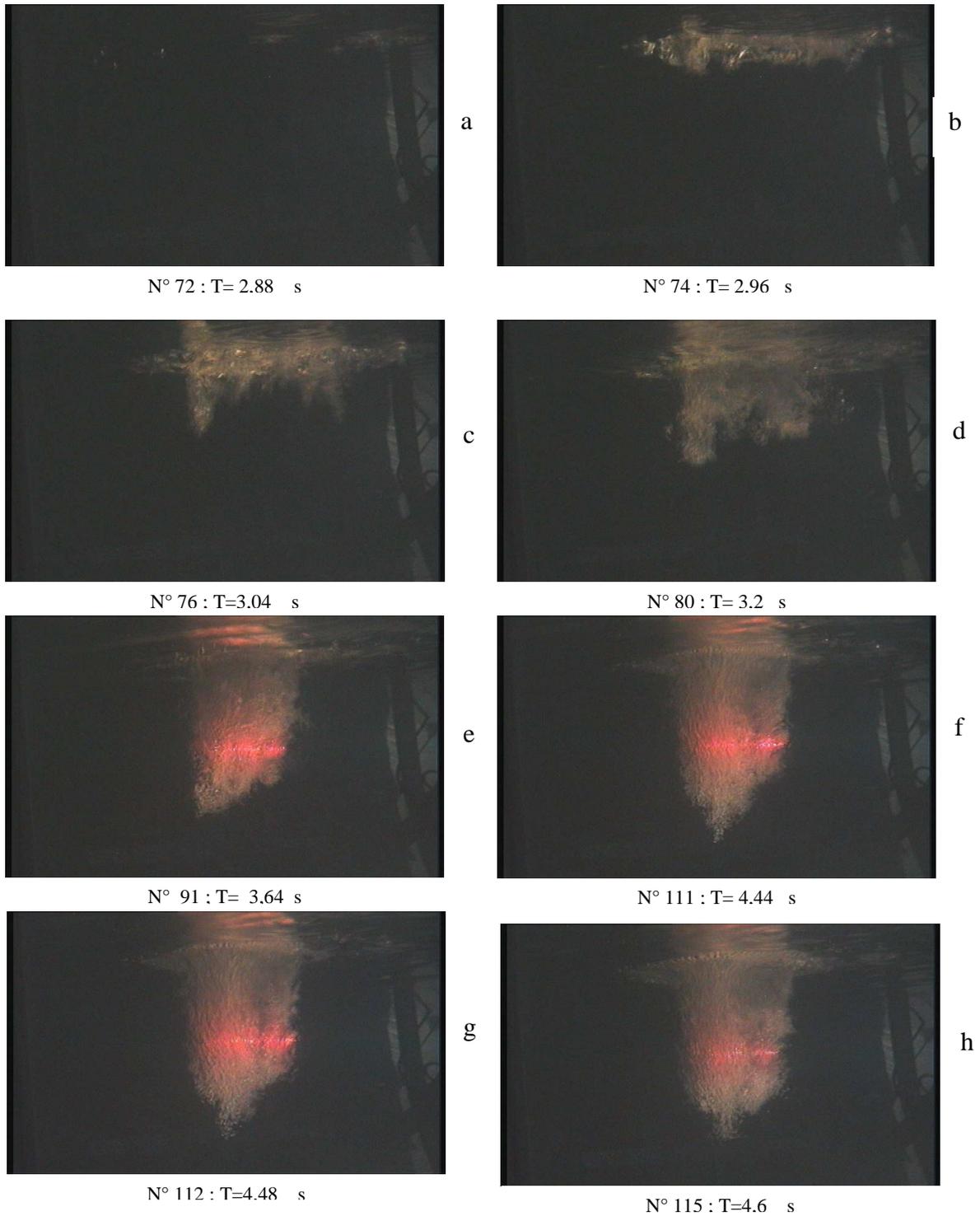


Figure 7.a.: Evolution de la topologie de la pénétration de la lame d'eau pour une hauteur de chute H de 24,5 cm, la distance entre l'injecteur et la surface libre, N° désigne le numéro de la séquence ; t le temps (s) écoulé à partir du début de l'impulsion.

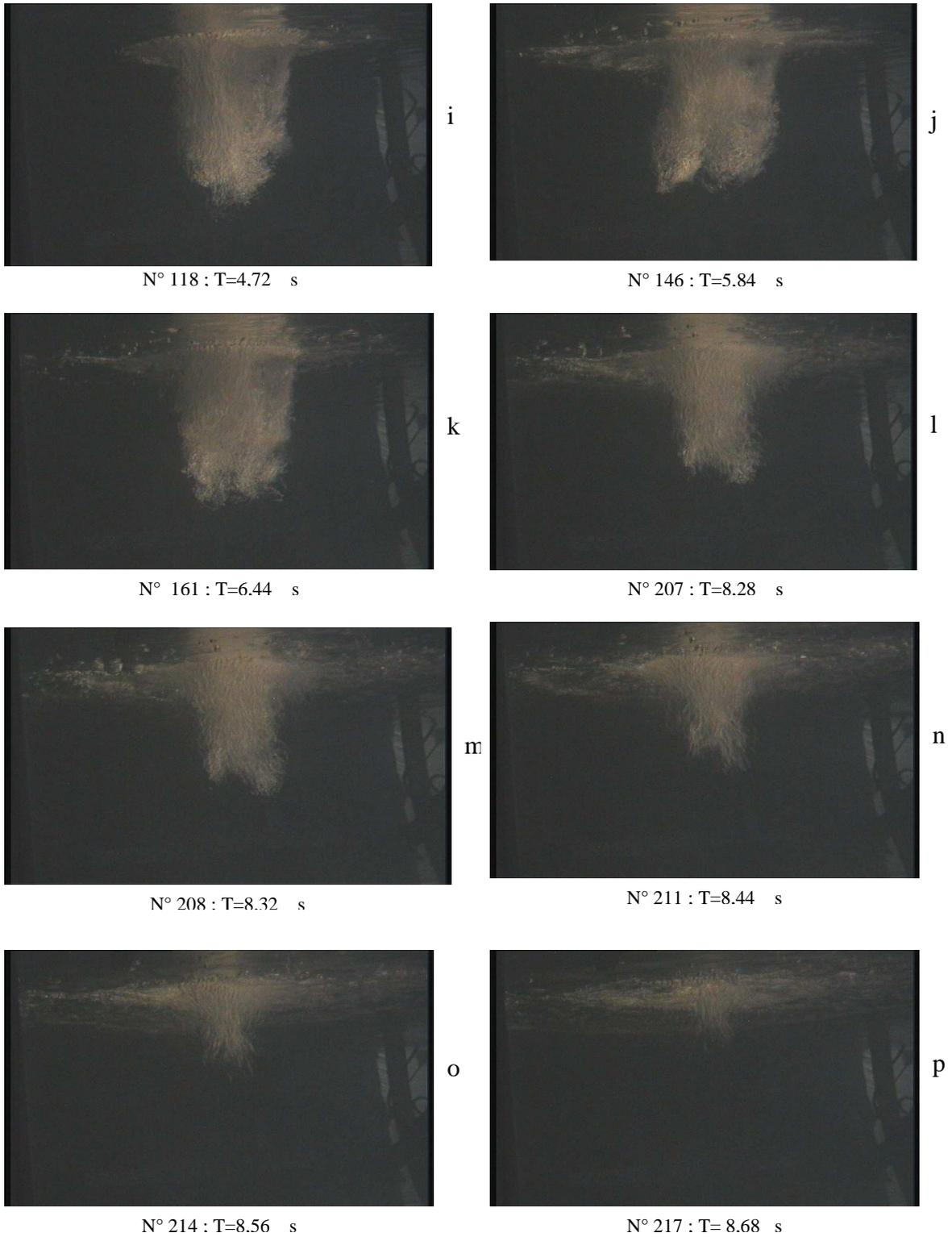


Figure 7.b.: Evolution de la topologie de la pénétration de la lame d'eau pour une hauteur de chute H de 24,5 cm, la distance entre l'injecteur et la surface libre, N° désigne le numéro de la séquence ; t le temps (s) écoulé à partir du début de l'impulsion.

IV.2. Vue de côté

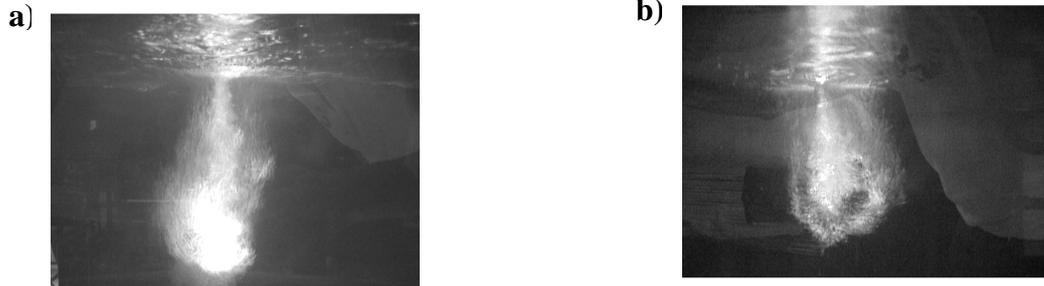


Figure 8 : *Vue de côté de l'impact de la lame d'eau a) impact sans détachement de la couronne ; b) impact avec détachement de la couronne*

La figure 8.a montre les deux couches cisaillement libre qui limitent le jet rentrant juste sous la surface libre. Cette couche s'épaissit à son tour pendant la descente pour conduire à une forme de « poire » observée par d'autres auteurs. Sur la figure 8.b on remarque un détachement d'une couronne de bulles à partir des bords extérieurs du jet. Une observation des évolutions de cette non présentée ici montre que ce détachement peut se présenter à plusieurs reprises pendant l'impact.

IV.3 Granulométrie et temps de remontée des Bulles :

Nous avons observé que la taille des bulles près de la surface libre croît avec la hauteur de chute. Cela s'explique par le fait que plus la hauteur de chute est grande plus l'énergie à absorber est plus importante. De même la profondeur de pénétration augmente avec le rapport H/D. Par ailleurs la largeur maximum du nuage de bulles est plus faible pour les grandes hauteurs de chute.

Le temps de pénétration du nuage est plus court que le temps de remontée comme on peut le voir sur le tableau suivant. La durée de pénétration est d'autant plus courte que les hauteurs de chute sont grandes pour une même quantité d'eau impactée:

Hauteur de chute	Temps de pénétration	Temps de remontée	Durée de vie du nuage
H/D=6,125	3,45s	6,63 s	10,08 s
H/D=9,625	3,04 s	5,25 s	8,29 s
H/D=12,125	2,85 s	5,40 s	8,25 s

Tableau 1 : *Comparaison des différentes durées pour chaque phase*

IV.4. Dimension du nuage de bulles :

L'évolution de la largeur maximum du nuage de bulles est liée à la hauteur de chute. Pour les petites hauteurs de chute on a un nuage de bulles plus épais Fig. 9.a par exemple

24,5cm. Par ailleurs on observe des pics sur la courbe de 48,5 dus à un phénomène de « respiration » globale du nuage, refoulement des bulles puis aspiration. La figure 9.b montre que la profondeur du nuage de bulles augmente avec la hauteur de chute. Pour une hauteur de chute plus grande, on aura une profondeur plus importante et une largeur moyenne du nuage de bulles plus faible.

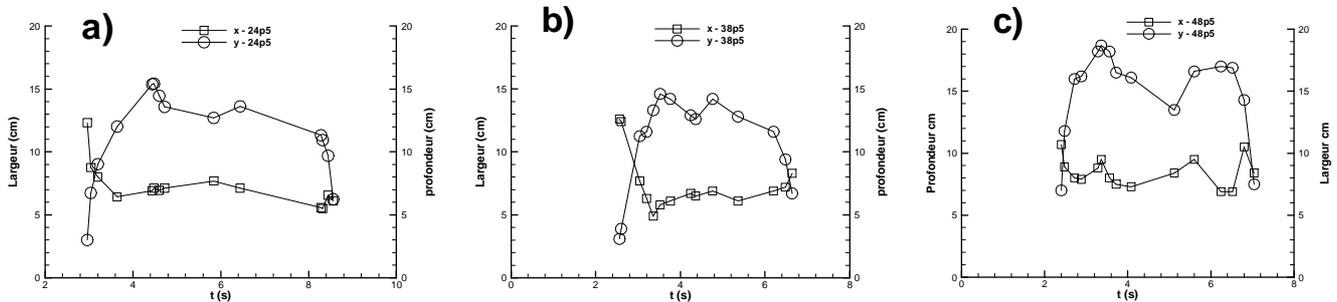


Figure 9 : Evolution de la largeur et de la profondeur du nuage de bulles
a) $H/D=6.12$; b) $H/D=9.62$; c) $H/D=12.12$

IV.5. Vitesse moyenne au sein du nuage

La vitesse moyenne pendant la pénétration est plus grande que celle de la remontée. Ceci est dû à l'énergie cinétique de l'impact du jet, la vitesse de remontée est plus longue parce que la remontée des bulles se fait jusqu'à la dissipation total de cette énergie.

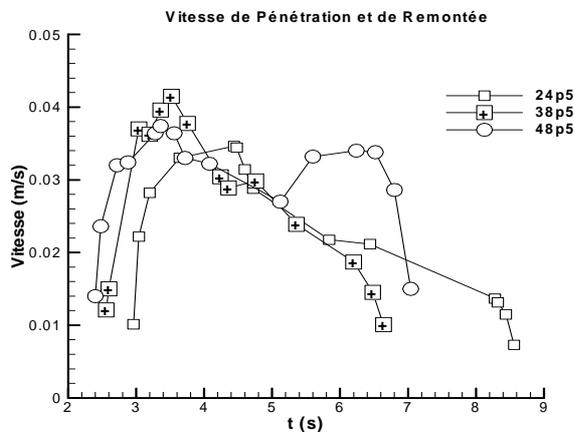


Figure 10 : Vitesse moyenne pour les 3 hauteur de chute de 24,5 cm

En conclusion, On remarque que, pour les faibles hauteur chute, le mouvement des bulles est presque uniforme et que le nuage s'organise sous forme d'une structure unique lors la pénétration et de la remontée. Par contre, pour les grandes hauteurs de chute On observe la formation de grandes structures tourbillonnaires, et une forte interaction apparaît entre un mouvement descendant et ascensionnel. Cela conduit à une sorte de « respiration » du nuage. Ceci correspond à un allongement et un raccourcissement du nuage et aussi dans certain cas à une éjection d'une couronne de bulles de plus petite granulométrie. Le système d'ondes observées à la surface libre provient à la fois du mouvement ascensionnel des bulles et de l'impact du jet. Ces vagues sont radiées autour de la zone d'impact.

V. Evolution des efforts d'impact

V.1.

Le début et la fin de l'impact sont repérés par les deux changements de pente brusques sur le signal des efforts F_y comme dans le cas des expériences dans l'air et la valeur moyenne des efforts F_y est déduite de l'analyse de la partie correspondant à l'impact. Cependant, ces deux pentes peuvent être difficiles à détecter, la solution a été de déduire la durée de l'impact à partir de la mesure du niveau d'eau du bac amont.

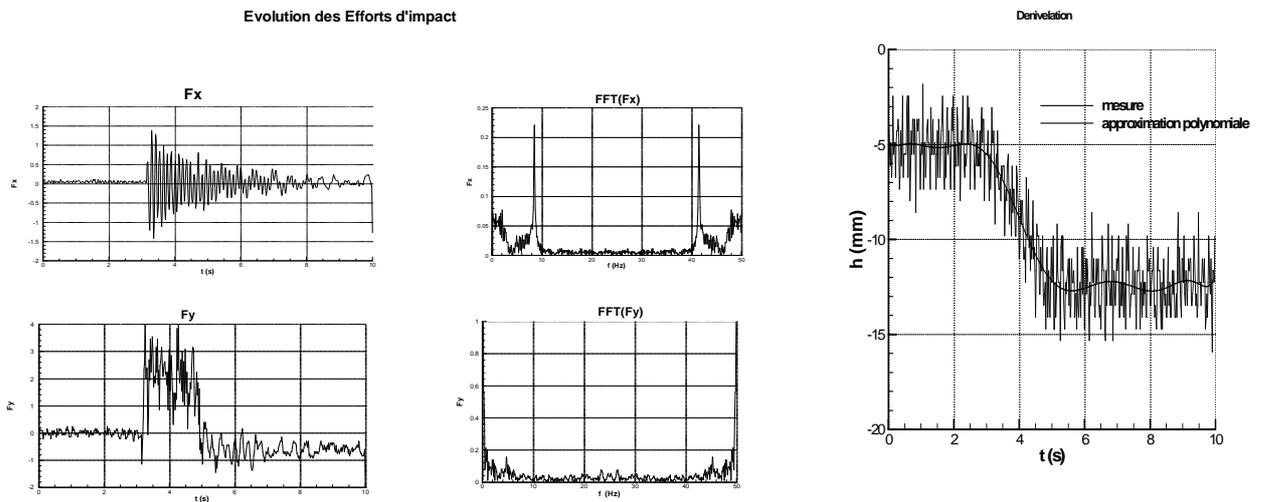


Figure 11 : Efforts vertical et horizontal dans l'eau et le signal de la sonde de dénivellation

A la fin de l'impact, on constate que l'évolution de F_y est différente du cas d'impact dans l'air (Cf. Fig. 6.a.). En effet, les bulles induisent des oscillations à faible fréquence (autour de 4.5 Hz). On observe des oscillations amorties sur F_x , elles sont dues aux vibrations latérales du support de la balance. Comme le signal de la sonde est très bruité, une méthode d'approximation polynomiale a été choisie pour lisser le signal. Le lissage retenu utilise un polynôme de degré 10.

V.2. Effets de profondeur et hauteur de chute :

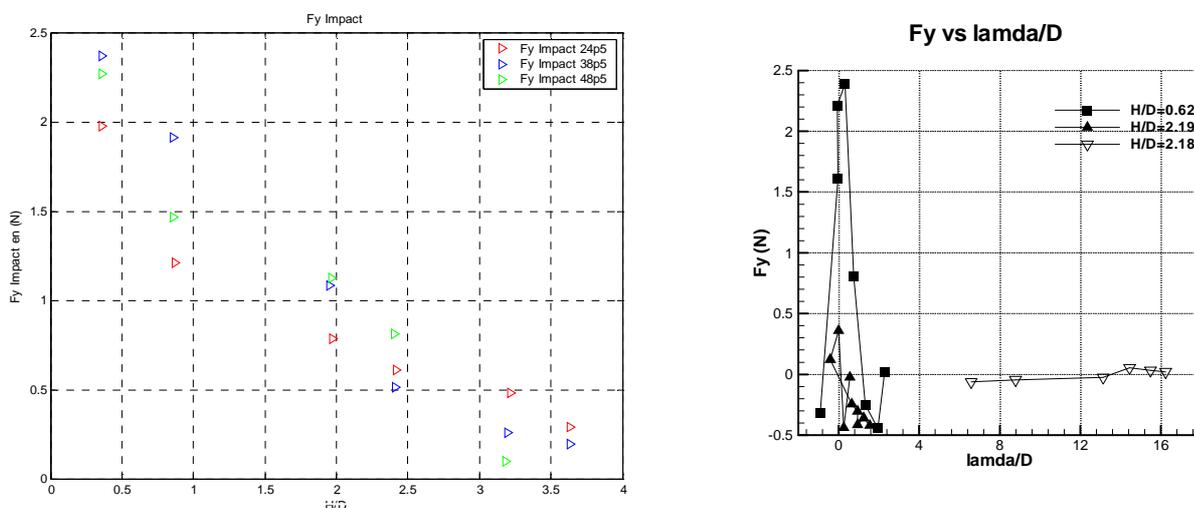


Figure 12 : Valeurs moyennes de la force d'impact pour différentes valeurs de H/D et λ/D ; a) variation en fonction de la profondeur ; b) variation en fonction de l'éloignement du point d'impact

L'évolution de la valeur moyenne de F_y est représentée sur la Fig. 12.a. On observe que cette diminue lorsque le paramètre H/D augmente. Cette diminution est due aux effets d'amortissements et de dissipation du jet au cours de la pénétration. Par ailleurs, lorsque la hauteur de chute augmente, la moyenne de F_y augmente. Ce fait est attribué aux forces de gravité.

On représente sur la figure 12. b. les évolutions des valeurs moyennes de F_y lorsque la paramètre λ/D varie. On constate une forte valeur de cette moyenne lorsque le jet impacte directement la balance, soit λ/D voisin de zéro. On constate aussi que ses effets sont très localisés et diminuent très rapidement dès que l'on s'éloigne du point d'impact. Cette observation est indépendante de la hauteur de chute.

V.3. Mesure de la fréquence de « respiration » du nuage

Pour mesurer cette fréquence, nous combinons un déplacement horizontal de la balance avec l'impact fluide/fluide. Le temps de déplacement est ajusté de telle sorte qu'une « synchronisation » se traduit par des oscillations fortement organisées de la force d'impact à la fréquence de respiration du nuage. Ces oscillations sont dues au double mouvement descendant et ascendant des bulles. La fréquence correspondante est de l'ordre de 4 Hz.

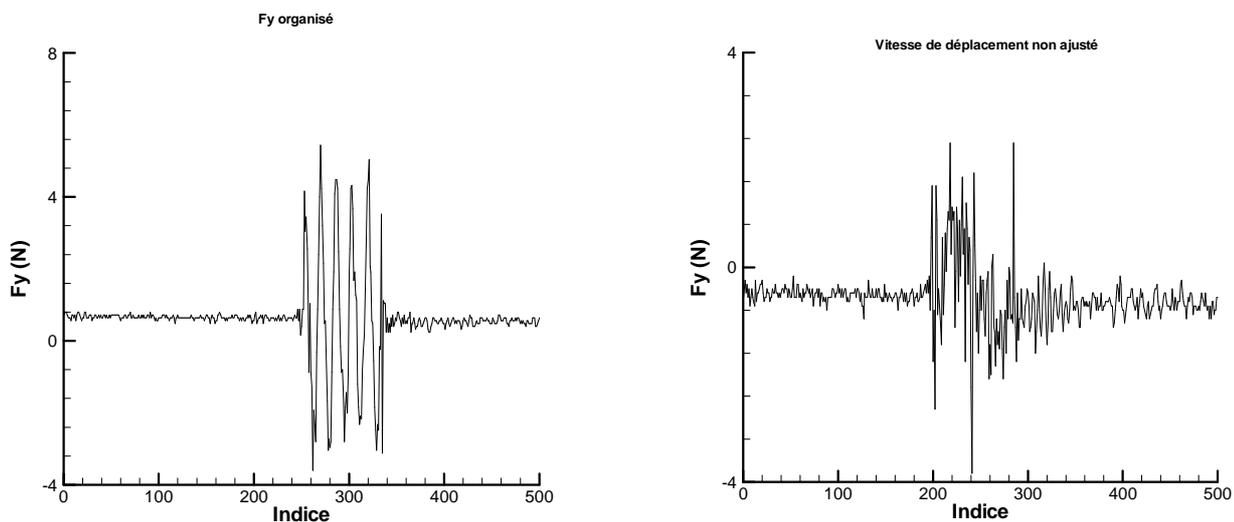


Figure 13 : Oscillations de la force d'impact dues à la « respiration » du nuage de bulles ;
a) mesure synchronisée ; b) mesure non synchronisée ;

VI. Conclusions et perspectives

Nous avons étudié l'impact d'un jet plan plongeant impulsif sur un plan d'eau au repos. Nous avons présenté une technique de caractérisation du jet par visualisation et par son effet sur une balance hydrodynamique. L'intérêt de cette étude préliminaire a été de mettre en évidence le mouvement d'ensemble du nuage de bulles et la mesure de l'absorption de l'énergie en fonction de la profondeur. Malgré le caractère intrusif de la balance au sein du nuage, il a été possible de mettre en évidence l'effet de la diffusion du nuage et le phénomène de respiration de l'ensemble du nuage. De même on montre que la granulométrie des bulles comporte différentes tailles qu'il conviendra de préciser lors de travaux futurs. La technique

de visualisation a permis de mesurer les effets globaux de la pénétration du jet sur sa géométrie.

Les perspectives de cette étude sont la mise en œuvre d'une technique optique pour la mesure des vitesses au sein du nuage et la mise en œuvre d'une technique acoustique pour mesurer le taux de vide dans le nuage. Pour ce qui est de la méthode optique, il s'agira plus spécifiquement d'utiliser une méthode fondée sur la technique du défaut de mise au point, développée au CORIA.

Enfin une méthode numérique est envisagée par l'utilisation de la méthode SPH qui est adaptée aux phénomènes à dynamique rapide.

VII. Remerciements

Ce travail constitue un travail préliminaire à l'Etude du Déferlement d'une vague d'étrave entreprise dans le réseau de Laboratoires de Normandie. Les auteurs remercient la Région Haute Normandie qui a financé la construction de la Cuve de visualisation et Le Bassin d'Essais des Carènes du Val-de-Reuil. Les auteurs remercient particulièrement Mr. Jean-Marc Quenez, Mr. Jean François Leguen et M. Stéphane Cordier pour les discussions.

VIII. Bibliographie

- [1] COINTE Raymond, « L'impact Hydrodynamique en deux dimensions, Applications à l'impact de vagues déferlantes, Première journées de l'hydrodynamique, Université de Californie à Santa Barbara », pp255-273.
- [2] RAJAONA Raphaël D., RAKOTONDRAJAONA Luc, LHOR Abdeltif, « Etude expérimentale du déferlement glissant derrière un cylindre en mouvement accéléré/décéléré sous la surface libre », 10èmes Journées de l'Hydrodynamique, Nantes 2005.
- [3] SHUBHRA K. MISRA, James T. KIRBY and BROCCCHINI Maurizio « The turbulent dynamics of quasi-steady spilling breakers - theory and experiments », University of Delaware, report n° CACR-05-08, July 2005, pp98-174.
- [4] H.BREDMOSE, M.BROCCCHINI, D.H.PEREGRINE and L.THAIS, «Experimental investigation and numerical modelling of steep forced water waves », Cambridge University. J.Fluid Mech. (2003), vol.490, pp. 217-249
- [5] M.BROCCCHINI, and D.H. PEREGRINE, «The dynamics of strong turbulence at free surfaces.part2.free-surface boundary conditions, Cambridge University .J.Fluid Mech. (2001), 449, pp255-29.
- [6] DUNCAN, J. H. (2001). « Spilling breakers». Ann. Rev. Fluid Mech., 33, 519-547.
- [7] LONGUET -HIGGINS, M. S. and CLEAVER R. P. (1994): « Crest instabilities of gravity waves. I. The inner solution. » J. Fluid Mech., 258, 115-129.
- [8] PEREGRINE D. H., « The turbulent dynamics of quasi-steady spilling breakers - theory and experiments ».
- [9] BANNER, M. L. and PHILLIPS, O. M. (1974). «On the incipient breaking of small scale waves». J. Fluid Mech., 65, 647-656.
- [10] SVENDSEN, I. A. and MADSEN, P. A. (1984). «A turbulent bore on a beach». J. Fluid Mech., 148, 73-96.
- [11] BUCKINGHAM Michael J., (1997). «Sound speed and void fraction profiles in the sea surface bubble layer». Applied Acoustics, Vol. 51, N° 3 225, 250.