



## 15<sup>ÈMES</sup> JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

### EFFET DE L'AERATION LORS D'IMPACTS HYDRODYNAMIQUES : ESSAIS ET SIMULATIONS

#### *ON THE INFLUENCE OF AERATION ON WATER ENTRY PROBLEMS: EXPERIMENTS AND SIMULATIONS*

**A. EL MALKI ALAOUI, M. EL HIMER, N. JACQUES**

Institut de Recherche Dupuy de Lôme  
FRE CNRS 3744 – IRDL  
UBS / ENSTA Bretagne / UBO / ENIB / CNRS  
2 rue François Verny, 29806 BREST Cedex 9  
[aboulghit.el\\_malki\\_alaoui@ensta-bretagne.fr](mailto:aboulghit.el_malki_alaoui@ensta-bretagne.fr)  
[mehdi.el\\_himer@ensta-bretagne.fr](mailto:mehdi.el_himer@ensta-bretagne.fr)  
[nicolas.jacques@ensta-bretagne.fr](mailto:nicolas.jacques@ensta-bretagne.fr)

#### **Résumé :**

Dans cette étude, nous proposons les résultats d'une campagne d'essais d'impacts hydrodynamiques réalisés grâce à la machine de choc de l'ENSTA Bretagne, en intégrant un dispositif permettant de générer des bulles de manière contrôlée dans le bassin. Préalablement à ces essais, les taux de vide générés par l'aérateur ont été caractérisés en fonction du débit d'air injecté à l'aide d'une sonde optique. Au cours de ces essais, le débit d'air injecté a été varié pour obtenir des taux de vide moyens  $\alpha_0$  compris entre 0.35% et 1.1%.

#### **Summary**

In this study, we propose the results of hydrodynamic impact tests realized with the shock machine of ENSTA Brittany, by integrating a device allowing to generate bubbles in the tank. During those tests the average void fraction considered are between 0.35 % and 1.1 %.

## 1. Introduction

L'étude de l'impact entre un corps rigide et un mélange liquide-gaz est importante lors de la conception de divers dispositifs en génie côtier et en architecture navale, incluant les brise-lames ou les enceintes de confinement de gaz naturel liquéfié. L'impact hydrodynamique a été souvent étudié dans la littérature dans le cas où le fluide est monophasique et incompressible. Cependant, les effets de l'aération et de la compressibilité du milieu diphasique eau-air restent peu connus. Dans cette étude, l'objectif principal est d'évaluer l'influence de l'effet de l'aération sur les chargements générés lors d'un impact entre un solide et un liquide aéré. En particulier, on cherche à déterminer les liens existants entre la fraction volumique d'air présente dans l'eau et les efforts hydrodynamiques. Pendant ces recherches les essais ont été réalisés à l'aide de la machine de choc de l'ENSTA-Bretagne, en intégrant un dispositif permettant de générer des bulles de manière contrôlée dans le bassin de la machine.

Les simulations numériques ont montrées que le coefficient de slamming baisse avec l'aération à cause de la compressibilité du mélange eau-air [Carcattera & Ciappi 2000, Skalak & Feit 1966]. L'objectif des essais est de confirmer expérimentalement cette tendance et de mettre ainsi en évidence l'effet de la compressibilité sur les efforts d'impact.

## 2. Dispositif expérimental

### 2.1. Moyens d'essai

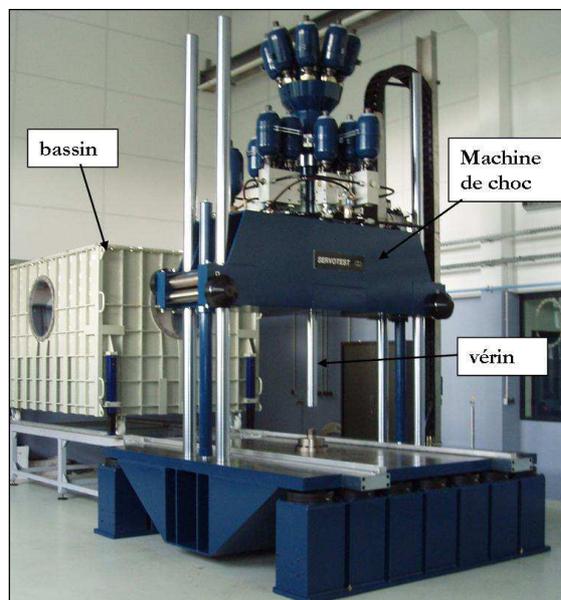


Figure 1 : Machine d'essai avec le bassin

Les essais d'impact sur eau (tossage) ont été réalisés sur la machine de choc hydraulique au sein de l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme à l'ENSTA-Bretagne (Figure 1). Ce moyen d'essai possède l'avantage de conserver une vitesse constante (contrôlée à 5% près) durant la pénétration de la structure dans l'eau. Le guidage de la pièce est également bien réalisé tout au

long du tossage comparativement aux essais de type lâché (drop test) non guidé. L'objectif du banc expérimental est de permettre la mesure des grandeurs hydrodynamiques (forces, pressions, champ de vitesse et de déplacement) apparaissant lors du choc d'un solide sur un domaine fluide de grande dimension. Pour cela, nous avons utilisé des capteurs adaptés aux essais (Figure 2).

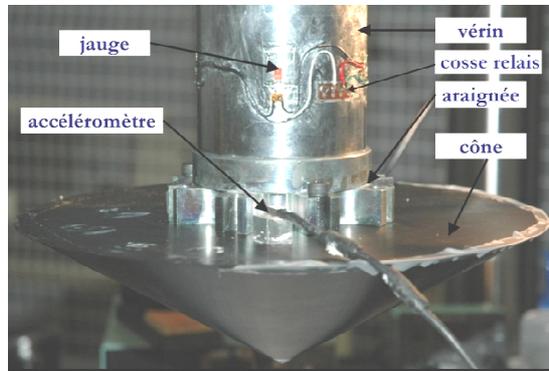


Figure 2 : Cône avec les différents capteurs de mesures fixés sur l'extrémité basse du vérin

## 2.2. Générateur de bulles (aérateur) :

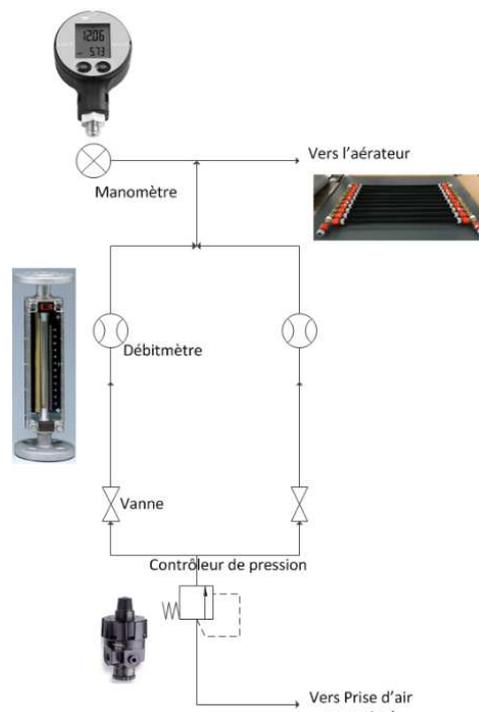


Figure 3 : Schéma du dispositif de contrôle et de mesure de l'injection d'air dans l'aérateur

Afin d'assurer une aération homogène, un aérateur constitué de tubes microporeux disposés en parallèle couvrant la largeur du bassin a été fabriqué et mis en place au fond de la cuve. Les tubes microporeux couramment utilisés en jardinage sont fabriqués par l'extrusion d'un mélange de caoutchouc et de polyéthylène. Ils sont raccordés de part et d'autre à des nourrices qui permettent de les alimenter en air comprimé. Pour mesurer et contrôler le débit

et la pression de l'air injecté, le dispositif schématisé dans la Figure 3 est utilisé. Il est constitué des éléments suivants :

- Un régulateur de pression de marque NORGREN avec une pression d'entrée jusqu'à 20 bar et peut délivrer jusqu'à 8 bar en pression de sortie ;
- Deux débitmètres de marque BROOKS montés en parallèle. La gamme de mesure du premier débitmètre est de 20 à 200 litres standards par minute, la gamme du second débitmètre est de 150 à 1100 litres standards par minute ;
- Un manomètre à affichage digital de marque KELLER qui permet de mesurer des pressions inférieures à 4 bar.

Le contrôleur de pression permet de détendre l'air du circuit d'air comprimé vers la gamme de pression utile. La molette de réglage du contrôleur permet de régler précisément la pression de l'air injecté. Celle-ci étant mesurée par le manomètre. Le circuit d'air comprimé fournit une pression de 6 à 7 bar, tandis que la pression absolue de l'air injecté varie entre 1.2 et 1.5 bar.

### 2.3. Mesure et contrôle du débit d'air

L'objectif est d'établir la relation entre la pression et le débit massique d'air à travers l'aérateur. Cette relation dépend de la porosité des tubes et de la surface totale traversée par l'écoulement d'air. A cette fin, des mesures simultanées du débit d'air à travers l'aérateur et de la pression d'air en entrée de l'aérateur ont été effectuées. Cette relation débit-pression caractérise l'aérateur car un écart important par rapport à cette relation est symptomatique d'un changement de la perméabilité dû à une fuite ou une obstruction dans l'aérateur. Pour cela, cette relation est régulièrement vérifiée. Les tests d'impact sur eau aérée ont été réalisés avec quatre différents débits d'injection d'air dans l'aérateur. Ces débits et les pressurisations correspondantes sont présentés dans le Tableau 1.

Pressions $P$ (mBar)	1231	1345	1465	1680
Débits $Q$ ( $L_{std}/min$ )	108.3	174.6	236.4	327

Tableau 1 : Débits d'injection de l'air comprimé dans l'aérateur et pressions correspondantes

### 2.4. Caractérisation de la zone d'impact

Une sonde optique et un module optoélectronique ont été utilisés pour mesurer le taux de vide dans le panache de bulles généré par l'aérateur. La pointe de la sonde est constituée d'une fibre optique, dans laquelle est injecté un signal lumineux produit par le module optoélectronique. La discrimination des phases repose sur la différence d'indice optique entre l'air et l'eau. Ainsi la quantité de lumière réfléchiée vers le module optoélectronique varie selon que la pointe est immergée dans l'air ou dans l'eau. Ce signal optique est converti en signal de tension électrique par le module optoélectronique, et le changement de la tension permet de détecter le passage de bulles à travers la pointe (Mäkiharju et al. 2013; Barrau et al. 1999).

La sonde optique a été fixée sur un porte sonde, lui-même arrimé au vérin de la machine de choc. La position horizontale  $Y$  de la sonde est réglée en déplaçant le chariot du porte

sonde (grâce à une manivelle). La position verticale  $Z$  est réglée en actionnant le vérin hydraulique. La position  $Y = 0$  est définie comme la position horizontale de l'axe du vérin. La position  $Z = 0$  est définie comme la position verticale de la surface libre. Désirant couvrir le diamètre du cône, trois positions horizontales ont été considérées :  $Y = \pm 16 \text{ cm}$  et  $Y = 0$ ; ainsi que six profondeurs  $Z = 0$ ;  $Z = 10 \text{ mm}$ ;  $Z = 20 \text{ mm}$ ;  $Z = 50 \text{ mm}$ ;  $Z = 100 \text{ mm}$  et  $Z = 350 \text{ mm}$ .

Les résultats des mesures du taux de vide pour chaque débit sont présentés dans la Figure 4, Figure 5, Figure 6 et Figure 7. On constate que le taux de vide varie globalement peu entre les différentes positions. Ainsi le taux de vide peut être considéré comme suffisamment homogène sur la zone d'impact. Comme attendu le taux de vide moyen augmente avec le débit mais reste toujours en deçà de 1.5% .

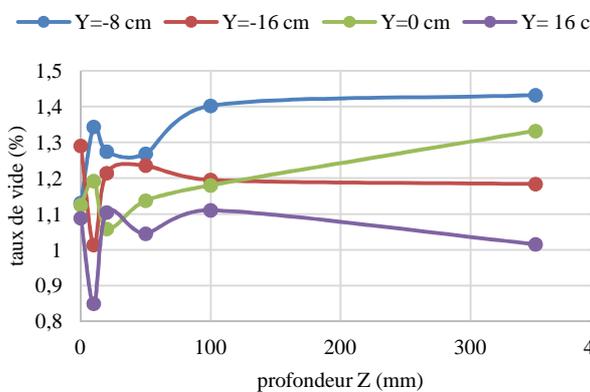


Figure 4: Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q = 327 \text{ Lstd/min}$

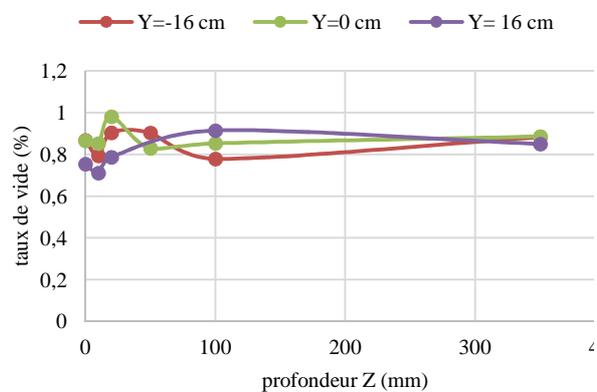


Figure 5: Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q = 236.4 \text{ Lstd/min}$

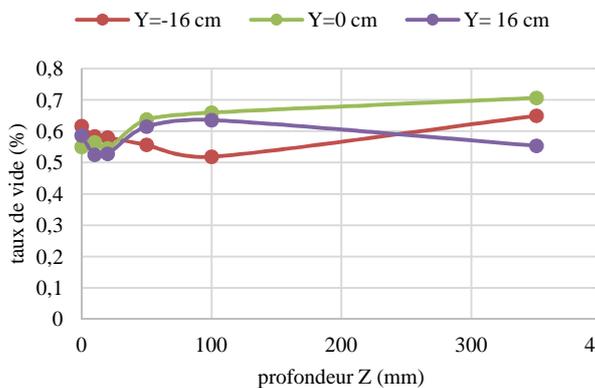


Figure 6: Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q = 174.6 \text{ Lstd/min}$

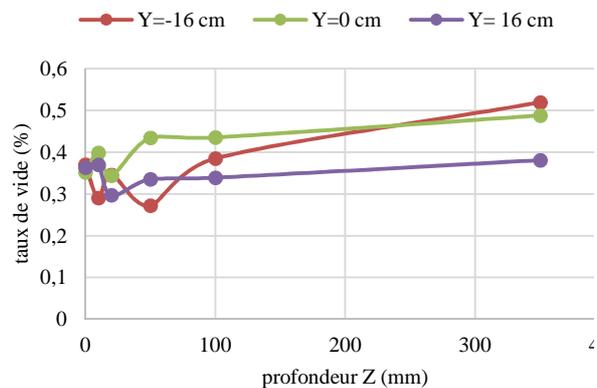


Figure 7: Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q = 108.3 \text{ Lstd/min}$

### 3. Essai de slamming sur eau pure

L'objectif de ces essais est d'obtenir l'évolution de l'effort hydrodynamique agissant pendant l'impact d'un cône rigide avec un angle de relèvement  $\beta = 7^\circ$  sur la surface d'eau calme. La Figure 8, présente un exemple de la réponse dynamique liée au tossage. La durée d'interaction fluide-structure exploitable se limite par exemple à la partie du signal comprise

entre les instants 0 ms et 1.97 ms (Figure 9). Durant la pénétration du solide dans l'eau, la force hydrodynamique augmente jusqu'à une valeur maximale, ensuite elle chute brutalement, ce qui correspond à la situation où le cône est entièrement immergé. Sur la Figure 9Figure 8, nous avons représenté l'effort expérimental issu de la mesure du pont de jauges, l'effort inertiel issu du produit de la masse inertielle avec la mesure de l'accéléromètre. Par soustraction nous obtenons l'effort hydrodynamique. De plus, selon la théorie dimensionnelle, l'évolution de la force hydrodynamique en fonction du temps est parabolique pour le tossage d'un cône rigide sur l'eau. Cela correspond bien à la forme de l'effort trouvé expérimentalement.

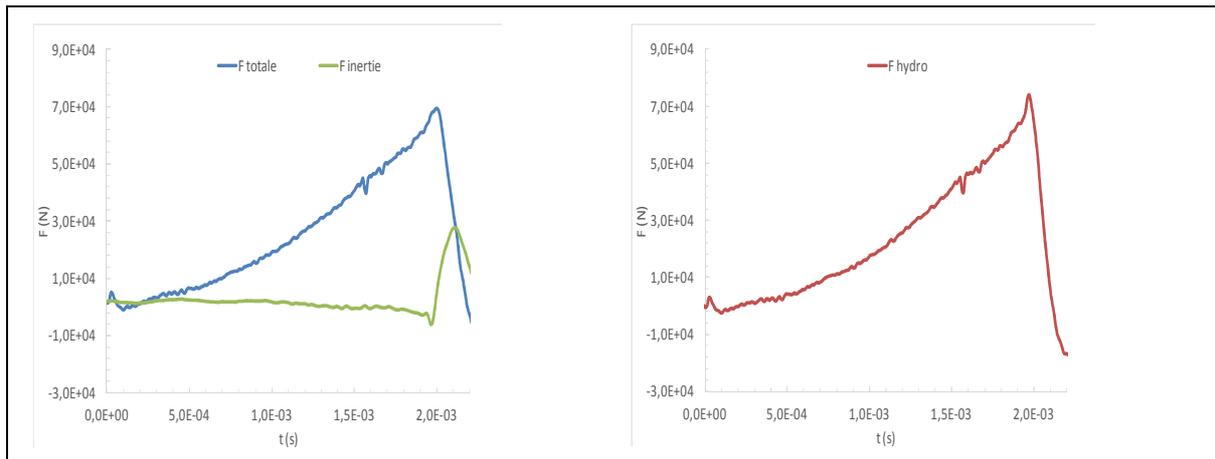


Figure 8 : Effort expérimental et inertiel en fonction du temps [gauche], effort hydrodynamique en fonction du temps [droite] ( $\beta = 7^\circ$  à 8 m/s)

Plusieurs essais ont été réalisés avec différentes vitesses afin d'obtenir l'effort hydrodynamique adimensionnel caractéristique du cône. Selon la théorie dimensionnelle, en supposant l'eau comme un fluide parfait (incompressible et non visqueux) et une vitesse  $V$  de pénétration constante du cône dans l'eau, le paramètre adimensionnel de tossage, faisant intervenir l'effort hydrodynamique d'impact résultant  $F$ , dépend uniquement de l'angle de relèvement  $\beta$ .

la valeur du paramètre de tossage  $f(\beta)$  dont l'expression pour un cône est :

$$f(\beta) = \frac{F \tan^3(\beta)}{\rho V^4 t^2} \quad (1)$$

avec  $t$  le temps et  $\rho$  la masse volumique de l'eau. Ce paramètre est donc théoriquement constant dans le temps, pour une géométrie de cône donnée. Les expériences ont confirmé cette assertion Figure 9 [EL MALKI ALAOUI et al. 2012 & 2015].

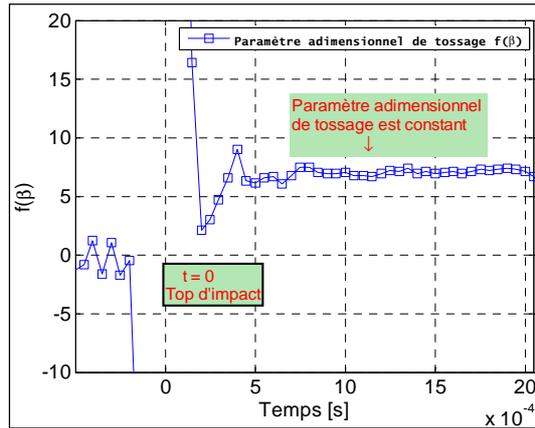


Figure 9: Valeur du paramètre adimensionnel  $f(\beta)$  en fonction du temps (cône  $7^\circ$  à  $8\text{ m/s}$ )

#### 4. Essai sur eau aérée

Dans cette campagne 15 tests ont été réalisés avec le même cône d'angle de relèvement  $\beta = 7^\circ$  à la même vitesse d'impact  $V_i = 8\text{ m/s}$ . Pour chaque débit d'air (voir Tableau 1) 3 à 5 tests ont été réalisés.

Pour vérifier la reproductibilité des mesures, dans la Figure 10 les signaux de force hydrodynamique pour les différents essais avec aération ( $Q=108.3$ ) sont superposés. La figure montre que les valeurs de la force hydrodynamique sont proches durant l'impact.

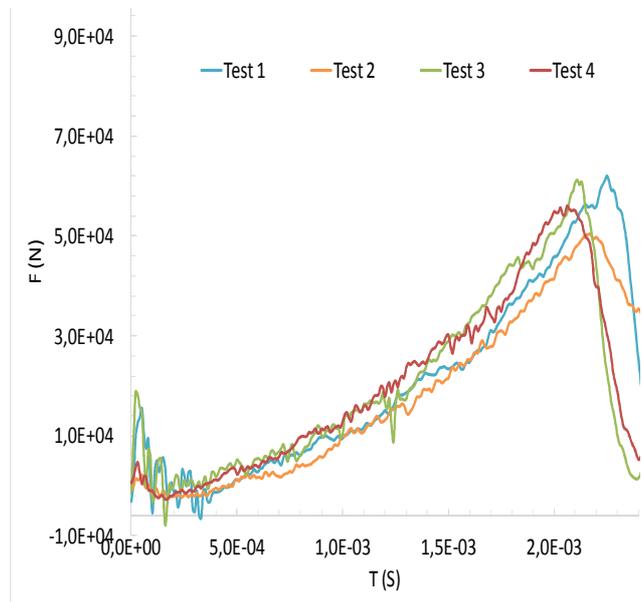


Figure 10 Signaux de force hydrodynamique mesurés lors des essais avec aération

Dans la Figure 11, on compare les signaux de force hydrodynamique mesurés pendant des tests d'impact sur eau pure et sur eau aérée. La première courbe est issue d'un test sur eau pure ( $\alpha_0 = 0\%$ ), les deux autres courbes sont issues de tests avec des taux de vide  $\alpha_0 = 0.56\%$  et  $\alpha_0 = 1.1\%$ . Dans tous les cas, la force d'impact augmente avec le temps jusqu'à atteindre son maxima à l'instant de l'immersion complète du cône. Cette figure met en

évidence la réduction de la force d'impact avec l'augmentation du taux de vide  $\alpha_0$ . En effet, si l'on compare le tests d'impact sur eau pure et le test d'impact sur eau aérée avec un taux de vide  $\alpha_0 = 1.1\%$ , on observe une réduction de la force maximale de près de 28 kN en présence d'aération.

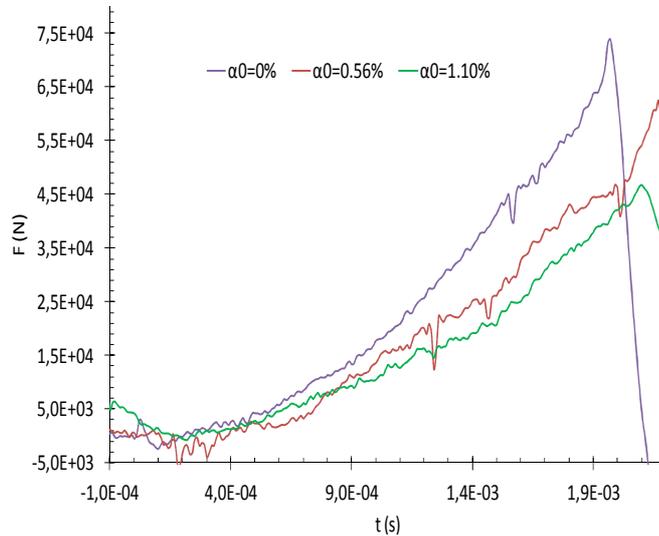


Figure 11 : Evolution de l'effort hydrodynamique en fonction du temps pour deux taux de vide

Pour quantifier cette réduction, on calcule à chaque instant le rapport  $F/F_0$ , avec  $F$  la force hydrodynamique obtenue pour un essai sur eau aérée et  $F_0$  la force obtenue pour l'essai sur eau pure. Ce rapport est appelé facteur de réduction de la force. Les résultats présentés dans la Figure 12 montrent que ce facteur de réduction tend vers une valeur constante, sauf au début de l'impact où les efforts sont faibles. Le rapport varie entre 0.4 et 0.5 soit une réduction de la force de plus 50% avec l'aération.

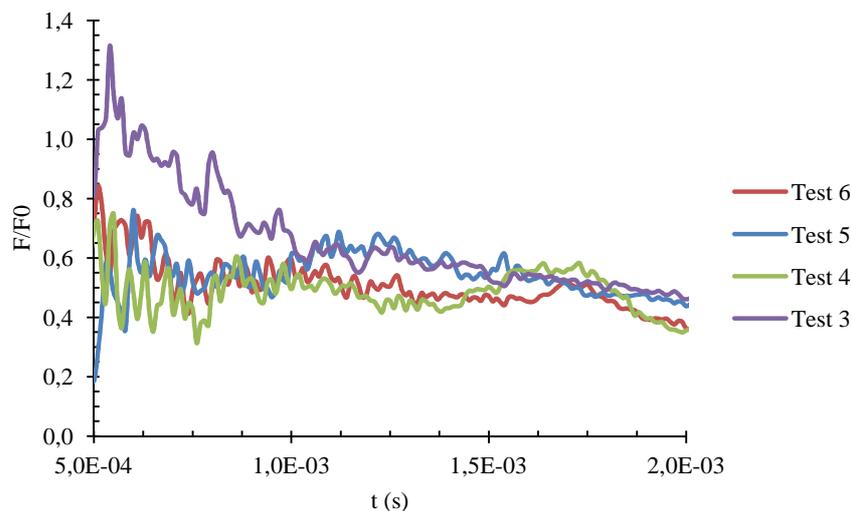


Figure 12 Facteur de réduction de la force pour les différents essais

On montre également que la force d'impact est proportionnelle à  $t^2$  dans tous les cas. Cependant le taux de réduction de la force d'impact avec le temps semble diminuer avec l'augmentation de  $\alpha_0$ . Pour confirmer cela, on va mettre en évidence l'influence de l'aération sur le coefficient de slamming  $f$  défini comme suit :

$$f = F \cdot \frac{\tan^3(\beta)}{\rho_0 V_i^4 (t - t_0)^2}$$

Où  $\rho_0$  est la densité initiale du mélange air-eau et  $t_0$  l'instant du premier contact entre le cône et la surface libre. L'estimation de  $f$  nécessite la connaissance de la masse volumique initiale du mélange  $\rho_0$ . Celle-ci est calculée à partir du taux de vide  $\alpha_0$  pour un débit donné d'air:

$$\rho_0 = (1 - \alpha_0)\rho_L$$

Où  $\rho_L$  est la masse volumique de l'eau et  $\alpha_0$  le taux de vide moyen. Ce dernier est estimé à partir des résultats des mesures par sonde optique. On considère que les tests avec le même débit ont le même taux de vide moyen  $\alpha_0$ . Le taux de vide étant faible, la densité du mélange est très proche de la densité de l'eau  $\rho_0 \approx \rho_L$ .

Les valeurs de  $f$  pour chaque valeur de  $\alpha_0$  sont représenté dans la Figure 13. On distingue globalement une tendance à la baisse du coefficient de slamming avec l'augmentation du taux de vide. En effet, l'ensemble des valeurs de  $f$  obtenues lors d'essais d'impact sur eau aérée sont bien inférieurs à 6.8 (valeur moyenne dans le cas de l'eau pure) [EL MALKI ALOUI et al. 2012].

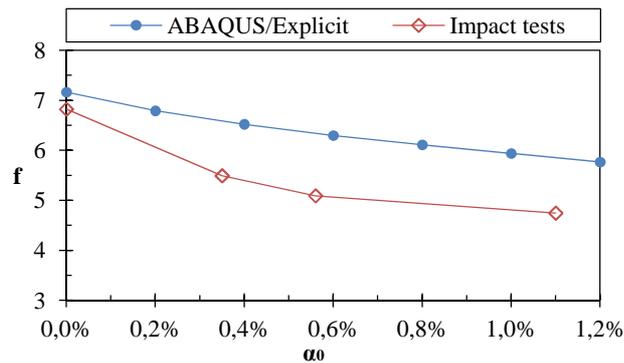


Figure 13 : Coefficients de slamming pour différents taux de vide

Les résultats expérimentaux (Figure 13) pour chaque taux de vide sont comparés aux valeurs obtenues par le modèle numérique décrit dans la référence [EL HIMER et al.]. Ces résultats confirment la baisse du coefficient de slamming avec le taux de vide, en accord avec nos résultats numériques. Cette baisse est visible dès le plus bas débit d'air, correspondant à un taux de vide moyen de  $\alpha_0 = 0.35\%$ . Pour ce débit le coefficient d'impact atteint  $f = 5.45$  soit une baisse de 20% par rapport aux tests d'impact sur eau pure. Cette baisse atteint 30% pour les tests avec le taux de vide moyen le plus élevés  $\alpha_0 = 1.2\%$ .

## 5. Conclusion

Dans cet article, les résultats des essais d'impact sur eau pure et aérée ont été présentés. Pour cette campagne, un aérateur couvrant le fond du bassin a été fabriqué. Le taux de vide produit par cet aérateur a été mesuré par sonde optique pour quatre débits différents d'air et pour différentes positions dans la zone d'impact. Notre attention s'est portée sur l'effet de l'aération sur le coefficient de slamming. Nos résultats mettent en évidence la réduction de

l'effort hydrodynamique et par conséquent le coefficient de slamming avec l'augmentation du taux de vide. Ainsi par exemple, on note que le coefficient d'impact baisse de 30% pour un taux de vide moyen de  $\alpha_0 = 1.2\%$ . Cette tendance est en accord avec les résultats de simulations numériques.

Les premiers tests effectués mettent en évidence une dispersion des mesures d'efforts en présence d'aération plus marquée que pour des impacts sur eau pure. Ce phénomène est attribué à l'instationnarité du panache de bulles. En effet, l'injection de l'air induit un écoulement à grande échelle de l'eau dans le bassin. Cet écoulement affecte la trajectoire des bulles. Les écoulements diphasiques sont généralement instationnaires avec la présence de zones de recirculation. Cela cause des hétérogénéités de la fraction volumique qui évolue au cours du temps [0 et al.]. Ainsi entre deux essais, la densité de bulles dans la zone d'impact ne sera pas identique même si le débit d'injection est le même.

Un plus grand nombre d'essais est nécessaire pour mieux caractériser l'effet de l'aération. Une analyse statistique des résultats est envisagée afin d'obtenir, non seulement la réduction d'effort pour un débit donnée, mais aussi pour quantifier la variabilité du phénomène d'impact sur eau aérée. De plus, des mesures de pressions au niveau de quatre capteurs positionnés à la surface du cône seront aussi réalisées.

## **6. Références :**

Barrau, E., N. Rivière, Ch. Poupot, and A. Cartellier. 1999. "Single and Double Optical Probes in Air-Water Two-Phase Flows: Real Time Signal Processing and Sensor Performance." *International Journal of Multiphase Flow* 25 (2): 229–56.

Carcattera, A. & Ciappi, E., 2000. Prediction of the Compressible Stage Slamming Force on Rigid and Elastic Systems Impacting on the Water Surface. *Nonlinear Dynamics*, 21, pp.193–220.

Dhotre, Mahesh T., and Brian L. Smith. 2007. "CFD Simulation of Large-Scale Bubble Plumes: Comparisons against Experiments." *Chemical Engineering Science* 62 (23): 6615–30.

EL Himer et al., Numerical Study of Hydrodynamic Impact on Bubbly Water, ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2015 May 31-June 5, 2015, St. John's, Newfoundland, Canada

El Malki Alaoui, A. Nême, A. Tassin, and N. Jacques. 2012. "Experimental Study of Coefficients during Vertical Water Entry of Axisymmetric Rigid Shapes at Constant Speeds." *Applied Ocean Research* 37 (August): 183–97.

El Malki Alaoui, Nême, A., Scolan, Y.M., 2015. Experimental investigation of hydrodynamic loads and pressure distribution during a pyramid water entry. *J. Fluids Struct.* 54, 925–935.

Hogg, Robert V., and Johannes Ledolter. 1992. *Applied Statistics for Engineers and Physical Scientists*. Macmillan Publishing Company.

Mäkiharju, Simo., Celine Gabillet, Bu-Geun Paik, Natasha a. Chang, Marc Perlin, and Steven L. Ceccio. 2013. "Time-Resolved Two-Dimensional X-Ray Densitometry of a Two-Phase Flow Downstream of a Ventilated Cavity." *Experiments in Fluids* 54 (7): 1561.

Peseux, B., Gornet, L., Donguy, B., 2005. Hydrodynamic impact: Numerical and experimental investigations. *J. Fluids Struct.* 21, 277–303.

Skalak, R. & Feit, D., 1966. Impact on the Surface of a Compressible Fluid. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 88(3), pp.325–331.

Tassin, A., Jacques, N., El Malki Alaoui, A., Nême, A., Leblé, B., 2010. Assessment and comparison of several analytical models of water impact. *Int. J. Multiphys.* 4, 125–140.