



**HAL**  
open science

## On the influence of aeration on water entry problems: experiments and simulations

Aboulghit El Malki Alaoui, Mehdi Elhimer, Nicolas Jacques, Céline Gabillet

### ► To cite this version:

Aboulghit El Malki Alaoui, Mehdi Elhimer, Nicolas Jacques, Céline Gabillet. On the influence of aeration on water entry problems: experiments and simulations. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, 2019, 2019 (5-6), pp.74 - 80. 10.1051/lhb/2019031 . hal-02454228

**HAL Id: hal-02454228**

**<https://ensta-bretagne.hal.science/hal-02454228v1>**

Submitted on 1 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## Effet de l'aération lors d'impacts hydrodynamiques : essais et simulations

Aboulgheit El Malki Alaoui, Mehdi El Himer, Nicolas Jacques & Celine Gabillet

To cite this article: Aboulgheit El Malki Alaoui, Mehdi El Himer, Nicolas Jacques & Celine Gabillet (2019) Effet de l'aération lors d'impacts hydrodynamiques : essais et simulations, La Houille Blanche, 105:5-6, 74-80, DOI: [10.1051/lhb/2019031](https://doi.org/10.1051/lhb/2019031)

To link to this article: <https://doi.org/10.1051/lhb/2019031>



© Société Hydrotechnique de France, 2019



Published online: 23 Dec 2019.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 1



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

# Effet de l'aération lors d'impacts hydrodynamiques : essais et simulations

Aboulghit El Malki Alaoui<sup>1</sup>, Mehdi El Himer<sup>1,\*</sup>, Nicolas Jacques<sup>1</sup> et Celine Gabillet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IRDL, UMR CNRS 6027, 2 rue François Verny, 29806, Brest Cedex 9, France

<sup>2</sup> IRENav, Institut de Recherche de l'École Navale, 29240 Brest, France

Reçu le 16 février 2017 / Accepté le 5 août 2019

**Résumé** – Dans cette étude, nous présentons 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 %. Les résultats mettent en évidence une réduction sensible de la force d'impact avec l'augmentation du taux de vide.

**Mots clés** : impacts hydrodynamiques / tossage / aération / compressibilité / essais d'impact

**Abstract** – **On the influence of aeration on water entry problems: experiments and simulations.** In this study, we presents the results of hydrodynamic impact tests performed with the shock machine at ENSTA Brittany, by integrating a device allowing to generate bubbles in the tank. During these tests, the average void fractions considered are between 0.35 and 1.1%. Our results highlight a significant reduction of the impact force with the increase of the void fraction.

**Keywords**: hydrodynamic impacts / slamming / aeration / compressibility / impact tests

## 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 montré que le coefficient de slamming baisse avec l'aération à cause de la compressibilité du mélange eau-air (Skalak et Feit, 1966 ; Carcaterra et Ciappi, 2004).

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. La réduction de la force impact sur un cône due à l'aération a déjà été documenté et publié par les auteurs (Elhimer *et al.*, 2017). Dans cet article, on se propose de revenir sur ces essais en les détaillant et en généralisant nos conclusions au cas d'un objet impactant avec une géométrie différente. Ainsi le dispositif d'aération est présenté en détails, ainsi que les valeurs instantanées du facteur de la réduction de la force. Afin de généraliser nos résultats, des tests d'impact sur une pyramide (au lieu du cône) sont également présentés.

## 2 Dispositif expérimental

### 2.1 Moyens d'essai

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 (Fig. 1). Ce moyen

\*Correspondance : [mehdi.elhimer@safrangroup.com](mailto:mehdi.elhimer@safrangroup.com)

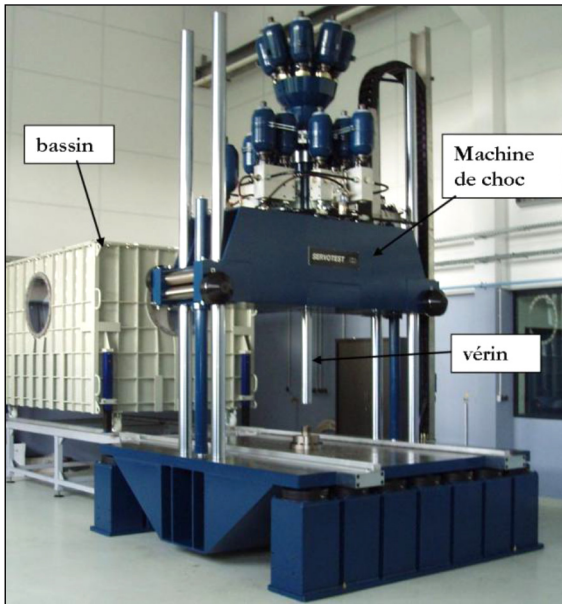


Fig. 1. Machine d'essai avec le bassin.

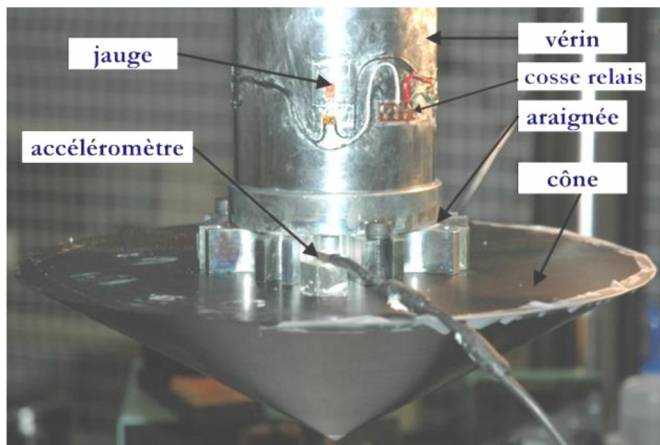


Fig. 2. Cône avec les différents capteurs de mesures fixés sur l'extrémité basse du vérin.

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 tassage 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 (Fig. 2).

## 2.2 Générateur de bulles (aérateur)

Afin d'assurer une aération homogène, un aérateur constitué de tubes micro-poreux disposés en parallèle couvrant la largeur du bassin a été fabriqué et mis en place au fond de la cuve. Les

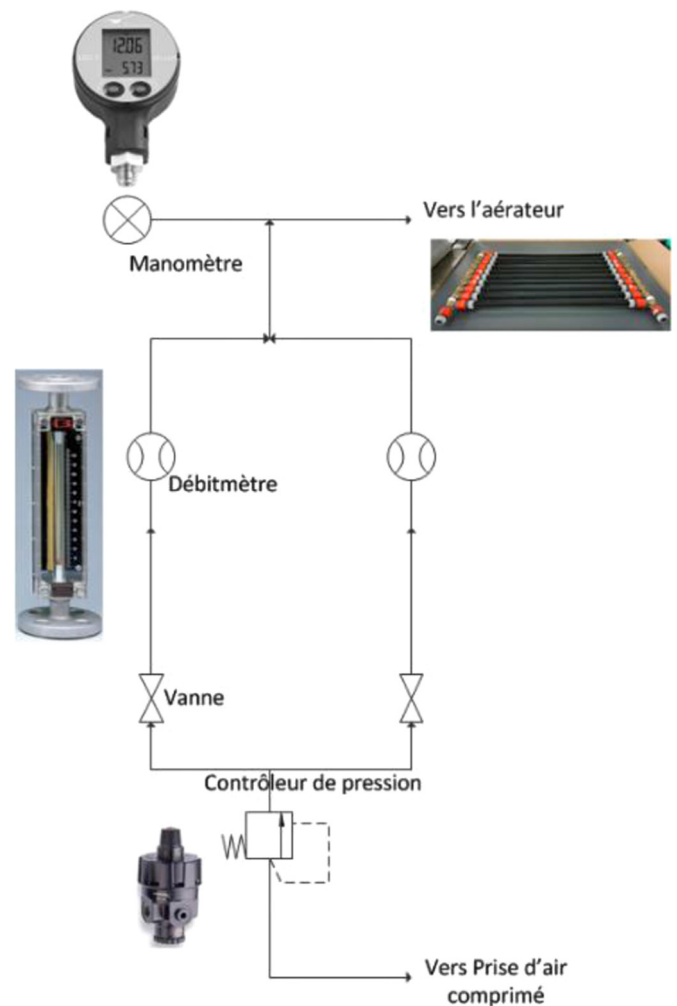


Fig. 3. Schéma du dispositif de contrôle et de mesure de l'injection d'air dans l'aérateur.

tubes micro-poreux 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

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

Pressions $P$ (mBar)	1231	1345	1465	1680
Débits $Q$ ( $L_{std}/min$ )	108,3	174,6	236,4	327

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

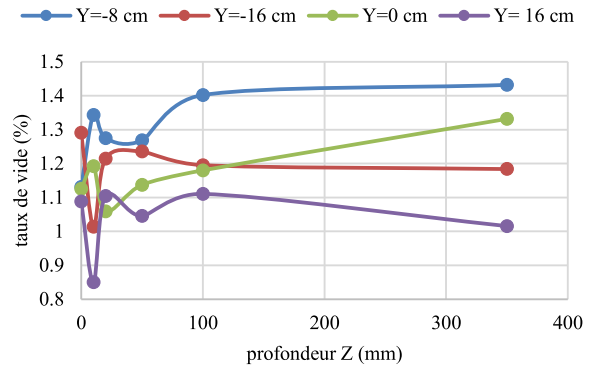
L'objectif est d'établir la relation entre la pression et le débit massique d'air à travers l'aérateur. Cette relation dépend de la porosité des tubes et de la surface totale traversée par l'écoulement d'air. À cette fin, des mesures simultanées du débit d'air à travers l'aérateur et de la pression d'air 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](#).

### 2.4 Caractérisation de la zone d'impact

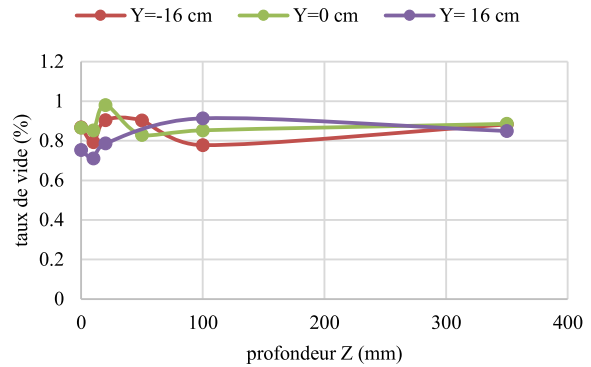
Une sonde optique et un module optoélectronique ont été utilisés pour mesurer le taux de vide dans le panache de bulles généré par l'aérateur. La pointe de la sonde est constituée d'une fibre optique, dans laquelle est injecté un signal lumineux produit par le module optoélectronique. La discrimination des phases repose sur la différence d'indice optique entre l'air et l'eau. Ainsi, la quantité de lumière réfléchi 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 ([Barrau \*et al.\*, 1999](#) ; [Mäkiharju \*et al.\*, 2013](#)).

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 :  $Y=\pm 16$  cm et  $Y=0$  ; ainsi que six profondeurs  $Z=0$  ;  $z=10$  mm ;  $Z=20$  mm ;  $Z=50$  mm ;  $Z=100$  mm et  $Z=350$  mm.

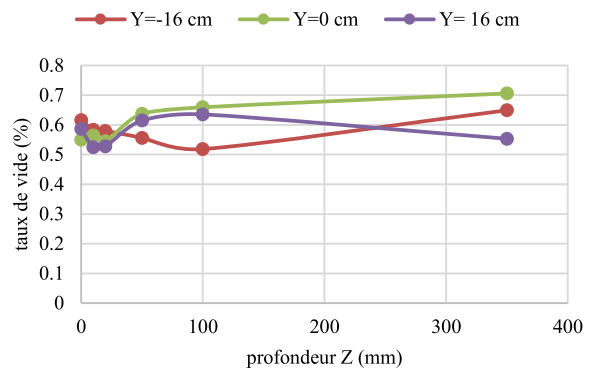
Les résultats des mesures du taux de vide pour chaque débit sont présentés dans les [figures 4–7](#) . On constate que le taux de vide varie globalement peu entre les différentes positions. Ainsi, le taux de vide peut être considéré comme suffisamment homogène sur la zone d'impact. Comme attendu, le taux de vide moyen augmente avec le débit mais reste toujours en deçà de 1,5 %.



**Fig. 4.** Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q=327 L_{std}/min$ .



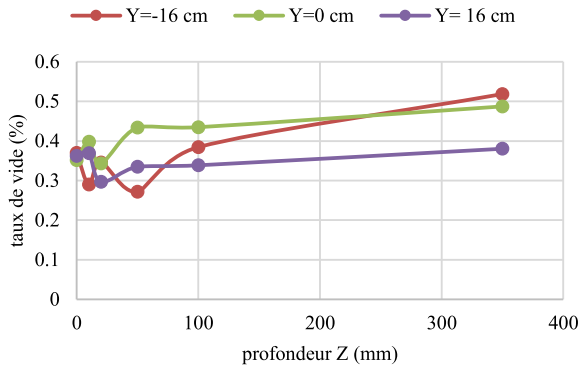
**Fig. 5.** Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q=236,4 L_{std}/min$ .



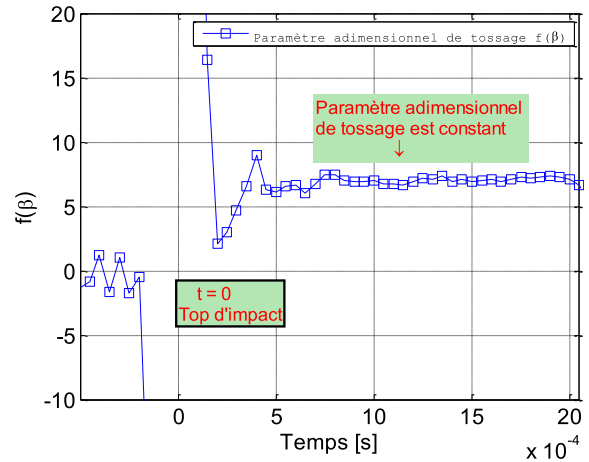
**Fig. 6.** Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q=174,6 L_{std}/min$ .

## 3 Essai de slamming sur eau pure

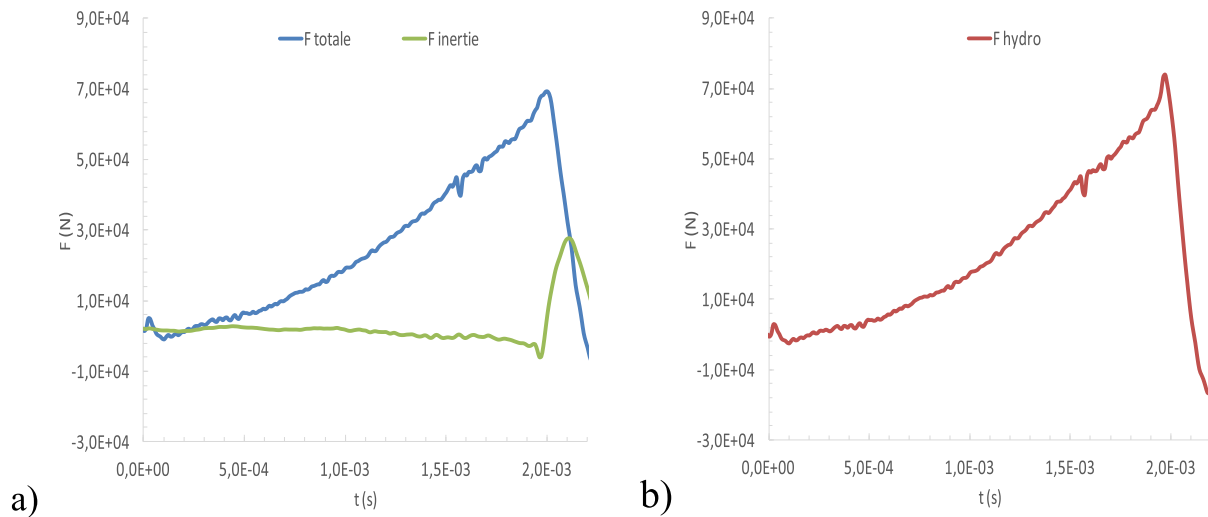
L'objectif de ces essais est d'obtenir l'évolution de l'effort hydrodynamique agissant pendant l'impact d'un cône rigide avec un angle de relèvement  $\beta=7^\circ$  sur la surface d'eau calme. La [figure 8](#) présente un exemple de la réponse dynamique liée au tossage. La durée d'interaction fluide-structure exploitable se limite par exemple à la partie du signal comprise entre les instants 0 et 1,97 ms ([Fig. 9](#)). Durant la pénétration du solide dans l'eau, la



**Fig. 7.** Taux de vide à différentes positions horizontales et verticales pour le débit d'air  $Q = 108,3 L_{std}/min$ .



**Fig. 9.** Valeur du paramètre adimensionnel  $f(\beta)$  en fonction du temps (cône  $7^\circ$  à 8 m/s).



**Fig. 8.** (a) Effort expérimental et inertiel en fonction du temps; (b) effort hydrodynamique en fonction du temps ( $\beta = 7^\circ$  à 8 m/s).

force hydrodynamique augmente jusqu'à une valeur maximale, ensuite elle chute brutalement, ce qui correspond à la situation où le cône est entièrement immergé. Dans la [figure 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.

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 :

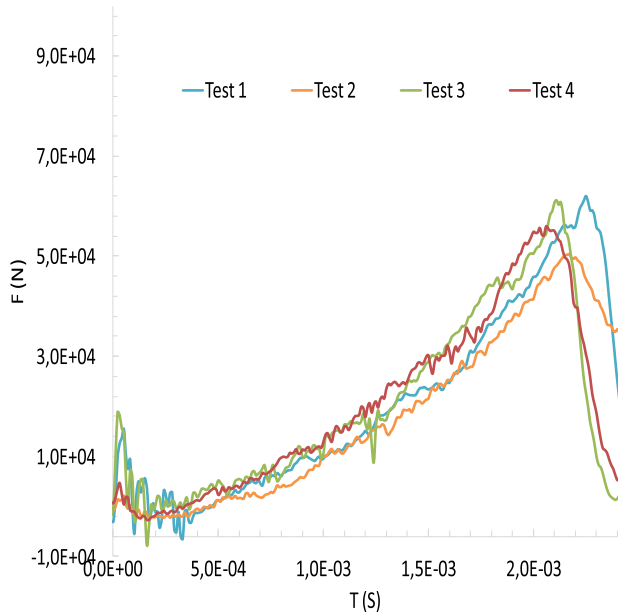
$$f(\beta) = \frac{F \tan^3(\beta)}{\rho V^4 t^2}, \quad (1)$$

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 ([Fig. 9](#)) ([El Malki Alaoui et al., 2012, 2015](#)).

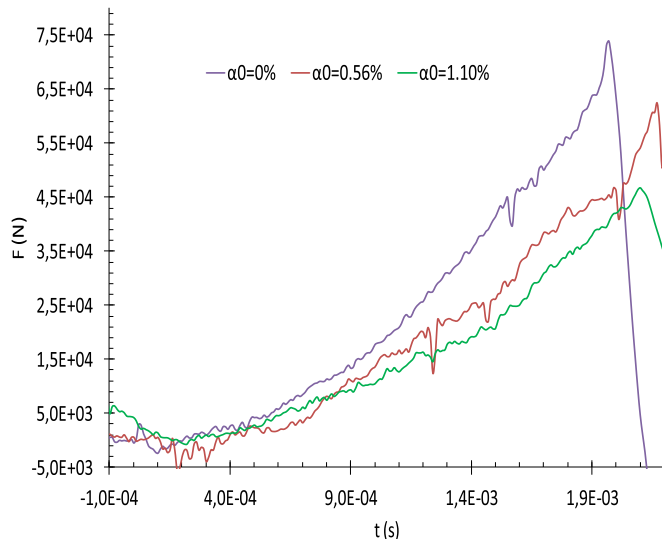
#### 4 Essai sur eau aérée

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  $V_i = 8$  m/s. Pour chaque débit d'air (voir [Tab. 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



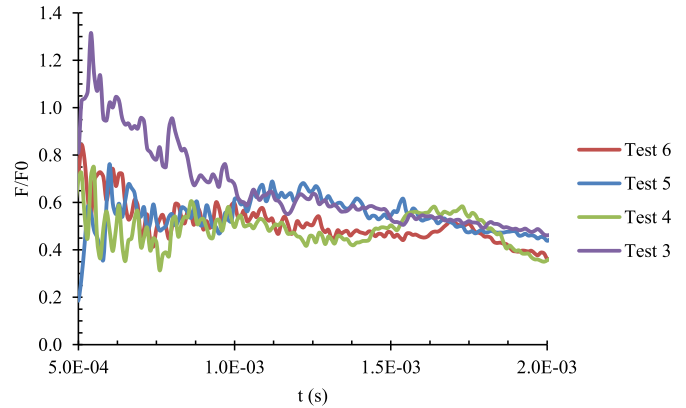
**Fig. 10.** Signaux de force hydrodynamique mesurés lors des essais avec aération.



**Fig. 11.** Évolution de l'effort hydrodynamique en fonction du temps pour deux taux de vide.

figure montre que les valeurs de la force hydrodynamique sont proches durant l'impact.

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.



**Fig. 12.** Facteur de réduction de la force pour les différents essais.

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.

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 inférieures à 6,8 (valeur moyenne dans le cas de l'eau pure) (El Malki Alaoui *et al.*, 2012).

Les résultats expérimentaux ([Fig. 13](#)) pour chaque taux de vide sont comparés aux valeurs obtenues par le modèle numérique décrit dans la référence (Elhimer *et al.*, 2015). Ces résultats confirment la baisse du coefficient de slamming avec

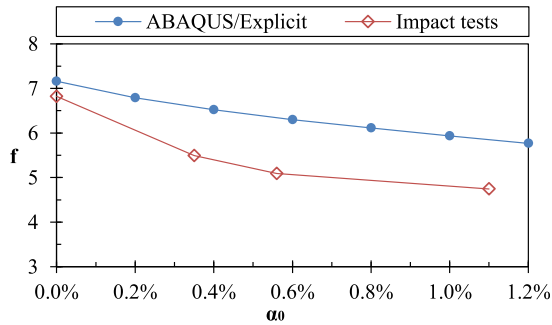


Fig. 13. Coefficients de slamming pour différents taux de vide.

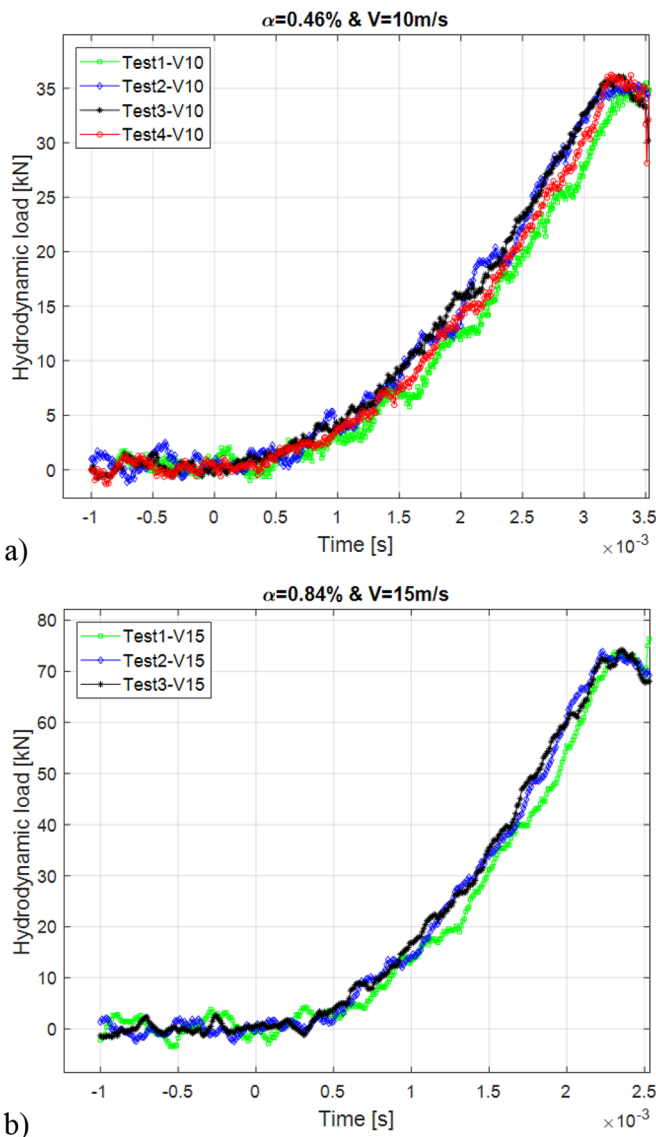


Fig. 14. Signaux de force d'impact sur la pyramide pour différents taux de vide et de vitesses d'impact.

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

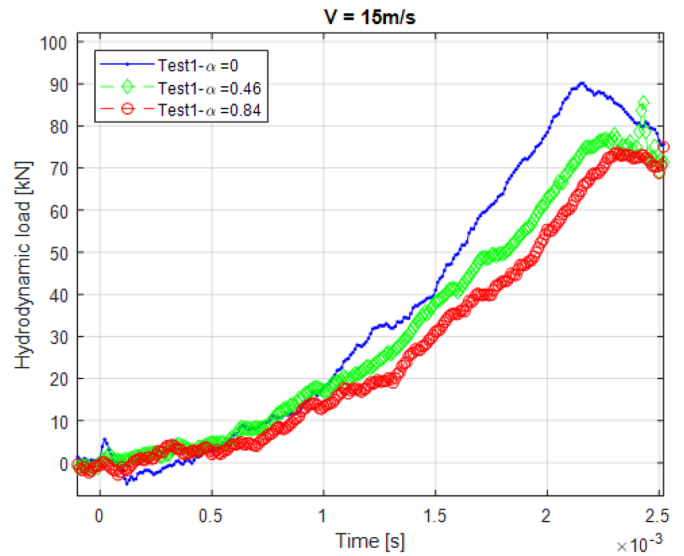


Fig. 15. Comparaison des signaux de force pour les différents taux de vide a la vitesse d'impact 15 m/s.

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  $\alpha_0 = 1,2\%$ .

Des tests supplémentaires ont été réalisés avec une pyramide, afin de confirmer la réduction des forces d'impact avec l'aération. Des essais d'impact sur eau pure ont été réalisés par (El Malki Alaoui *et al.*, 2015) avec une pyramide ayant un angle de relèvement de 15 degrés. On a réalisé des tests similaires avec différentes valeurs de  $\alpha_0 = 0\%$ , 0,46 % et 0,84 % et des vitesses d'impact de 10 et 15 m/s. Les signaux de force dans le cas aéré sont présentés dans la figure 14. Comme dans le cas du cône, ces figures démontrent l'évolution en  $t^2$  de la force d'impact avec le temps. Ceci fut aussi observé dans le cas de l'eau pure par (El Malki Alaoui *et al.*, 2015). Malgré l'aération, une bonne répétabilité des valeurs de la force est obtenus.

Les signaux de forces pour les trois taux de vide à la même vitesse d'impact 15 m/s sont comparés dans la figure 15. À partir de  $t = 10^{-3}$  s, on distingue clairement une divergence entre ces signaux, qui croît avec le temps jusqu'à l'instant de l'immersion complète. La force d'impact mesurée dans le test sur eau pure est toujours supérieur a celle sur eau aérée. Aussi, la valeur de la force décline avec l'augmentation du taux de vide, comme pour les tests sur cône.

## 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. Cette tendance a aussi été confirmée lors de tests d'impact sur une pyramide. Ceci permet donc de généraliser ces observations à d'autres géométries que celle du cône.

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 (Dhotre et Smith, 2007). 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.

## Références

- Barrau E, Rivière N, Poupot Ch, Cartellier A. 1999. Single and double optical probes in air-water two-phase flows: Real time signal processing and sensor performance. *Int J Multiphase Flow* 25(2): 229–256. DOI: [10.1016/S0301-9322\(98\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(98)00042-1).
- Carcaterra A, Ciappi E. 2004. Hydrodynamic shock of elastic structures impacting on the water: Theory and experiments. *J Sound Vib* 271(1–2): 411–439. DOI: [10.1016/j.jsv.2003.02.005](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.02.005).
- Dhotre MT, Smith BL. 2007. CFD Simulation of large-scale bubble plumes: Comparisons against experiments. *Chem Eng Sci* 62: 6615–6630. DOI: [10.1016/j.ces.2007.08.003](https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.08.003).
- Elhimer M, El Malki Alaoui A, Croci K, Gabillet C, Jacques N. 2015. Numerical study of hydrodynamic impact on bubbly water. In: Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2015. St. John's, Newfoundland, Canada: ASME.
- Elhimer M, Jacques N, El Malki Alaoui A, Gabillet C. 2017. The influence of aeration and compressibility on slamming loads during cone water entry. *J Fluids Struct* 70(December 2016). Elsevier: 24–46. DOI: [10.1016/j.jfluidstructs.2016.12.012](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2016.12.012).
- El Malki Alaoui A, Nème A, Tassin A, Jacques N. 2012. Experimental study of coefficients during vertical water entry of axisymmetric rigid shapes at constant speeds. *Appl Ocean Res* 37 (August): 183–197. DOI: [10.1016/j.apor.2012.05.007](https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.05.007).
- El Malki Alaoui A, Nème A, Scolan YM. 2015. Experimental investigation of hydrodynamic loads and pressure distribution during a pyramid water entry. *J Fluids Struct* 54. Elsevier: 925–935. DOI: [10.1016/j.jfluidstructs.2015.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.01.018).
- Mäkiharju SA, Gabillet C, Paik B-G, Chang NA, Perlin M, Ceccio SL. 2013. Time-resolved two-dimensional X-ray densitometry of a two-phase flow downstream of a ventilated cavity. *Exp Fluids* 54 (7): 1561. DOI: [10.1007/s00348-013-1561-z](https://doi.org/10.1007/s00348-013-1561-z).
- Skalak R, Feit D. 1966. Impact on the surface of a compressible fluid. *J Manuf Sci Eng* 88(3): 325–331.

**Citation de l'article** : El Malki Alaoui A, El Himer M, Jacques N, Gabillet C. 2019. Effet de l'aération lors d'impacts hydrodynamiques : essais et simulations. *La Houille Blanche* 5-6: 74–80.