



# 16<sup>èmes</sup> Journées de l'Hydrodynamique

27-29 novembre 2018 - Marseille



CENTRALE  
MARSEILLE



irphé  
Institut de Recherche sur les  
Phénomènes Hors Equilibre

## Etudes expérimentales et théoriques des phénomènes d'entrée et sortie d'eau

### *Experimental and theoretical study on the water entry and water exit phenomena*

Alan Tassin<sup>(1)</sup>, Thibaut Breton<sup>(1,2)</sup>, Nicolas Jacques<sup>(2)</sup>

*alan.tassin@ifremer.fr ; thibaut.breton@ifremer.fr ; nicolas.jacques@ensta-bretagne.fr*

<sup>(1)</sup>Laboratoire Comportement des Structures en Mer, IFREMER, 29280 Plouzané, France

<sup>(2)</sup>ENSTA Bretagne, CNRS UMR 6027, IRDL, 29806 Brest, France

### Résumé

Nous étudions les phénomènes d'entrée et sortie d'eau expérimentalement et théoriquement. Du point de vue expérimental, nous proposons une technique permettant de suivre l'évolution de la surface mouillée lors d'essais de sortie d'eau basée l'utilisation de maquettes transparentes et d'un éclairage LED tangentiel. Nous montrons que cette technique est adaptée aux formes planes (carré, disque circulaire, ellipse) mais également à des formes tridimensionnelles (cône, calotte sphérique). Cette technique permet en outre de suivre l'évolution de la surface mouillée et du front du jet lors des phases d'entrée. Nous présentons des résultats expérimentaux en termes d'effort hydrodynamique et d'évolution de la surface mouillée. Ces résultats sont comparés à des résultats issus de simulations numériques de type CFD pour le cas des maquettes planes ainsi qu'à des résultats issus de modèles analytiques pour le cas du cône. L'accord entre les différentes approches est globalement bon. La prise en compte de la composante hydrostatique de la pression dans le modèle analytique est nécessaire pour approcher les résultats expérimentaux mais pose des questions en termes de mise en oeuvre.

### Summary

We investigate the water entry and water exit phenomena experimentally and theoretically. We propose an experimental technique based on the use of transparent mock-ups and tangential LED lighting systems. This technique makes it possible to follow the contact surface during both the entry and exit phases. We show its feasibility for flat plates (square, circular disc, ellipse) and three-dimensional bodies (cone, sphere). The hydrodynamic force evolutions measured during the experiments are compared to numerical simulations (CFD) and to analytical results based on the modified Logvinovich model (MLM).

## I – Introduction

Nous étudions les phénomènes d’entrée et sortie d’eau expérimentalement et théoriquement. L’objectif principal est d’améliorer la compréhension du phénomène de sortie d’eau que l’on rencontre dans différents problèmes hydrodynamiques tels que l’impact de vagues sur des structures situées au-dessus de la surface de l’eau ([1], [5]), le tossage des navires ([2]) ou l’amerrissage d’urgence des avions de transport ([10]). Ces problèmes d’impact hydrodynamique peuvent se décomposer en deux phases : une première phase d’entrée d’eau durant laquelle la surface de contact entre l’eau et la structure augmente rapidement et une seconde phase de sortie d’eau que l’on définira ici comme la phase durant laquelle la surface de contact diminue. A noter que dans des configurations complexes on pourrait rencontrer des zones où la surface de contact serait en expansion ainsi que d’autres zones où celle-ci serait en contraction. Au phénomène de sortie d’eau, est associé à un phénomène de succion qui peut entraîner de la cavitation (ex : amerrissage d’urgence). Contrairement à la phase d’entrée, qui a motivé de nombreuses études, la phase de sortie d’eau reste jusqu’ici peu étudiée. A travers ces travaux, nous essayons de répondre à différentes questions soulevées par la modélisation de la sortie d’eau telles que l’évolution de la surface de contact et de l’effort hydrodynamique au cours de cette phase. En effet, il reste difficile de modéliser correctement ce phénomène. Par exemple, dans le modèle linéarisé de sortie d’eau de Korobkin [3], la surface mouillée est déterminée en introduisant une relation de proportionnalité entre la vitesse d’expansion de la surface mouillée et la vitesse des particules du fluide au point de contact (pour des cas 2D et axisymétriques). En comparaison du modèle de “von Karman modifié” (voir [10]) où le point de contact est déterminé de façon géométrique sans prise en compte de l’écoulement, ce modèle enrichit la condition utilisée pour la détermination du point de contact. Toutefois, avec le modèle de Korobkin [3], on ne peut obtenir une meilleure estimation de l’effort hydrodynamique obtenu par [10] (pour des cas d’entrée-sortie d’eau enchaînées) qu’en dégradant l’estimation de la surface mouillée.

Ce travail constitue une poursuite des travaux engagés sur le phénomène de sortie d’eau et présentés aux précédentes journées de l’hydrodynamique [9] et par ailleurs publiés dans *Experiments in Fluids* [7]. Du point de vue expérimental, nous avons proposé une technique originale basée sur l’utilisation de maquettes transparentes et d’un éclairage LED tangentiel pour visualiser la ligne de contact lors de la sortie d’eau de maquettes planes. La faisabilité de cette technique avait été montrée en étudiant une plaque plane carrée d’une taille caractéristique de 20 cm. Nous montrons à présent que cette technique peut être généralisée à l’étude de maquettes de plus grandes dimensions (jusqu’à 50 cm de diamètre) et de formes tridimensionnelles (cône et sphère). Ces nouveaux essais ont été réalisés dans un bassin d’essai de taille moyenne (au centre IFREMER de Boulogne-sur-Mer) à l’aide d’un montage mécanique dédié fixé à un actionneur électrique de type hexapode. Ce montage nous a permis de réaliser des essais combinés d’entrée d’eau (impact hydrodynamique) et de sortie d’eau, ainsi que de mesurer les efforts hydrodynamiques lors des essais. On montre ainsi que la technique d’éclairage LED tangentiel permet de suivre l’évolution de la ligne de contact pour des corps tridimensionnels, aussi bien durant la phase d’entrée que durant la phase de sortie d’eau. Un intérêt supplémentaire de la technique de visualisation, par rapport à la technique traditionnelle qui consiste à visualiser la surface mouillée par dessous, est qu’elle permet également de suivre l’évolution du front du jet qui se développe le long de la maquette lors des phases d’impact. Comme dans nos précédents travaux, la précision de la technique de visualisation est vérifiée par

comparaison avec des essais durant lesquels un damier était placé au fond du bassin. La comparaison des essais réalisés à l'aide d'un cône et d'un disque circulaire ont permis de confirmer que, pour une même surface mouillée initiale, la forme du corps n'influait que très peu les résultats durant la phase de sortie d'eau. Des essais réalisés en similitude de Froude avec la maquette cônica et en variant l'enfoncement initial suggèrent que la tension de surface n'avait que très peu d'influence sur les résultats aux échelles considérées.

En parallèle des études expérimentales, nous avons réalisé des simulations numériques de type CFD pour des configurations similaires à celles des essais. Ces simulations ont été réalisées à l'aide du module eulérien du code de calculs par éléments finis ABAQUS/Explicit. Le traitement de la surface libre est basé sur la méthode « Volume-of-Fluid »(VOF). Dans ces simulations, nous travaillons dans un référentiel mobile lié au solide ; le maillage est fixe par rapport à ce solide. Le mouvement du fluide (par rapport au solide) est induit en lui appliquant un chargement volumique qui est directement lié à l'accélération du repère mobile par rapport à un référentiel galiléen. Ces simulations permettent de tenir compte de l'effet de la gravité en introduisant un champ de pression initial et des conditions aux limites appropriées. Des comparaisons avec le modèle analytique d'impact hydrodynamique de Logvinovitch modifié sont présentées pour le cas du cône.

## **II – Dispositif expérimental**

Le dispositif expérimental est illustré à la figure 1 par un schéma de principe et une photo prise lors d'un essai avec une maquette carrée. La maquette est maintenue par l'intermédiaire de 3 jambes verticales. Des pattes de fixation maintiennent la maquette depuis l'extérieur afin de ne pas masquer la scène. Des capteurs d'effort piezo-électriques (Kistler 9331B) situés entre les pattes et une rondelle intermédiaire permettent de mesurer l'effort au plus près de la maquette. A noter que la mesure de l'effort hydrodynamique durant des essais de sortie d'eau présente une difficulté supplémentaire, par rapport à la mesure d'effort lors d'essais d'impacts hydrodynamique à vitesse constante, du fait de l'accélération de la maquette qui induit un effort d'inertie important. Néanmoins, il est possible d'identifier cet effort d'inertie en réalisant des essais en air avec la même cinématique que les essais en eau et d'ensuite soustraire cet effort des mesures réalisées en eau. Une caméra rapide de type Photron Fastcam Mini AX50 est fixée au plateau de l'hexapode, permettant ainsi de suivre le mouvement de la maquette lors des essais. L'ensemble des résultats présentés par la suite ont été obtenus à une cadence de 1000 i/s et avec un objectif Nikon 20 mm F2.8. Les dimensions du bassin d'essais sont largeur  $\times$  profondeur = 4 m  $\times$  2 m. La profondeur du bassin conditionne la distance entre la maquette et le damier positionné au fond du bassin pour les essais avec damier que nous avons réalisés. Pour les essais avec damier, deux lampes puissantes de marque Dedolight éclairaient le damier à travers les vitres du bassin. Lors des essais sans damier, celui-ci était recouvert d'un drap noir afin de masquer le damier sans avoir à déplacer l'hexapode (et devoir refaire un "zéro").

### **II – 1 Maquettes transparentes**

Différentes maquettes ont été réalisées en plexiglas : un disque de diamètre 40 cm, une ellipse de 26 cm  $\times$  40 cm, un carré de côté égal à 40 cm, un cône d'angle de relèvement de 15° et une calotte sphérique de rayon de courbure égal à 350 mm. L'ensemble de ces

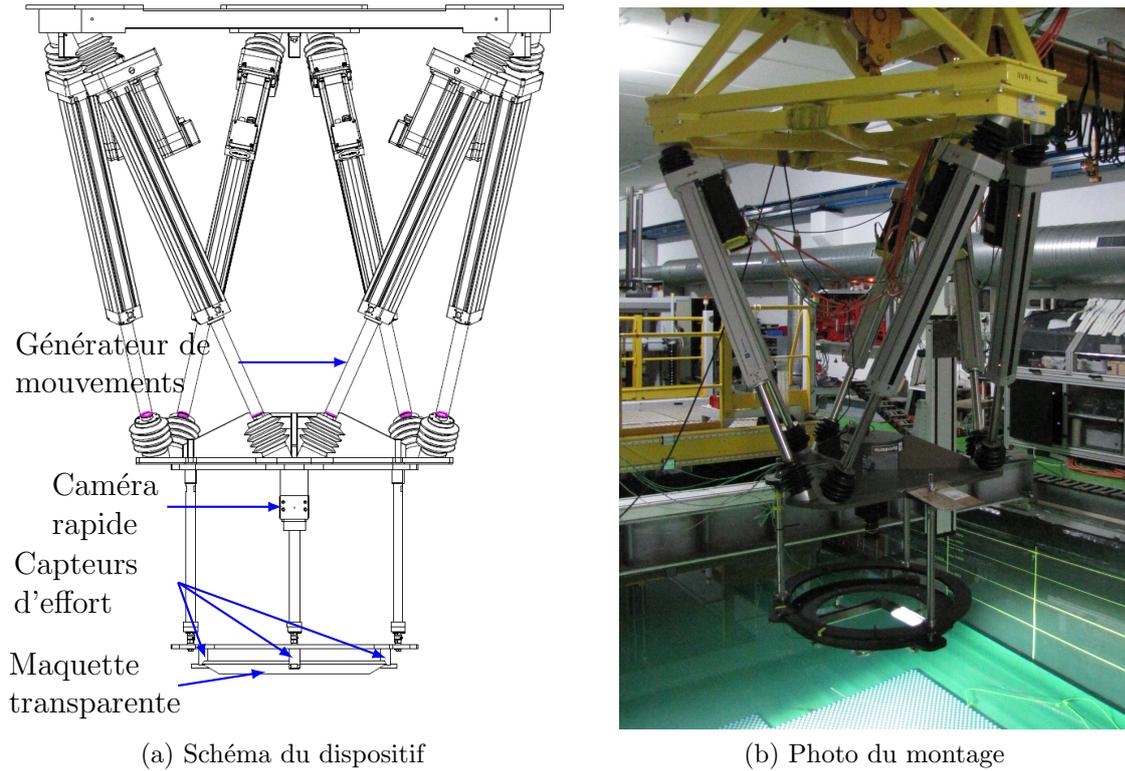


FIGURE 1 – Dispositif expérimental

maquettes avait une épaisseur de 15 mm et un ruban de LED haute puissance était collé à l'aide de scotch en aluminium le long de la tranche de la maquette, comme illustré à la figure 2 ci-dessous dans le cas du disque circulaire et du cône. Les bords des maquettes ont ensuite été entièrement recouverts de scotch aluminium afin de masquer les défauts de polissage sur ces zones, comme on peut le voir sur la figure 1b dans le cas du carré. Les maquettes planes étaient prolongées par un bord incliné à  $30^\circ$  comme illustré à la figure 2a afin de pouvoir implanter les LEDs sur les maquettes. Pour le cône à  $15^\circ$ , l'angle de relèvement a été augmenté à  $30^\circ$  sur la zone périphérique de la maquette pour les mêmes raisons.

## II – 2 Compensation des distorsions optiques

Dans le cas des maquettes tridimensionnelles (cône et calotte sphérique), il était nécessaire d'étalonner le moyen de mesure afin de compenser les distorsions optiques, principalement dues aux effets de perspective pour ces maquettes. A cette fin, nous avons réalisé des mires d'étalonnage coniques et sphériques sur lesquelles étaient tracées la projection verticale d'une grille régulière. Avant une série d'essais, ces mires étaient placées au contact de la surface inférieure de la maquette comme illustré à la figure 3a dans le cas de la maquette sphérique. La procédure d'étalonnage consistait ensuite en une détection des intersections des lignes de la grille comme illustré à la figure 3b dans le cas de la maquette conique. Un modèle polynomial de distorsion d'ordre 8 (voir [6]) était ensuite identifié en minimisant la distance entre les points détectés et la position théorique des intersections de la grille. On peut observer sur la figure 4b représentant l'erreur résiduelle après correction de la distorsion que l'erreur reste globalement inférieure au mm sur l'ensemble de l'image, sauf au centre où les erreurs sont plus fortes. Cela s'explique par les défauts d'usinage du cône au niveau de la pointe et par une détection moins précise des intersections

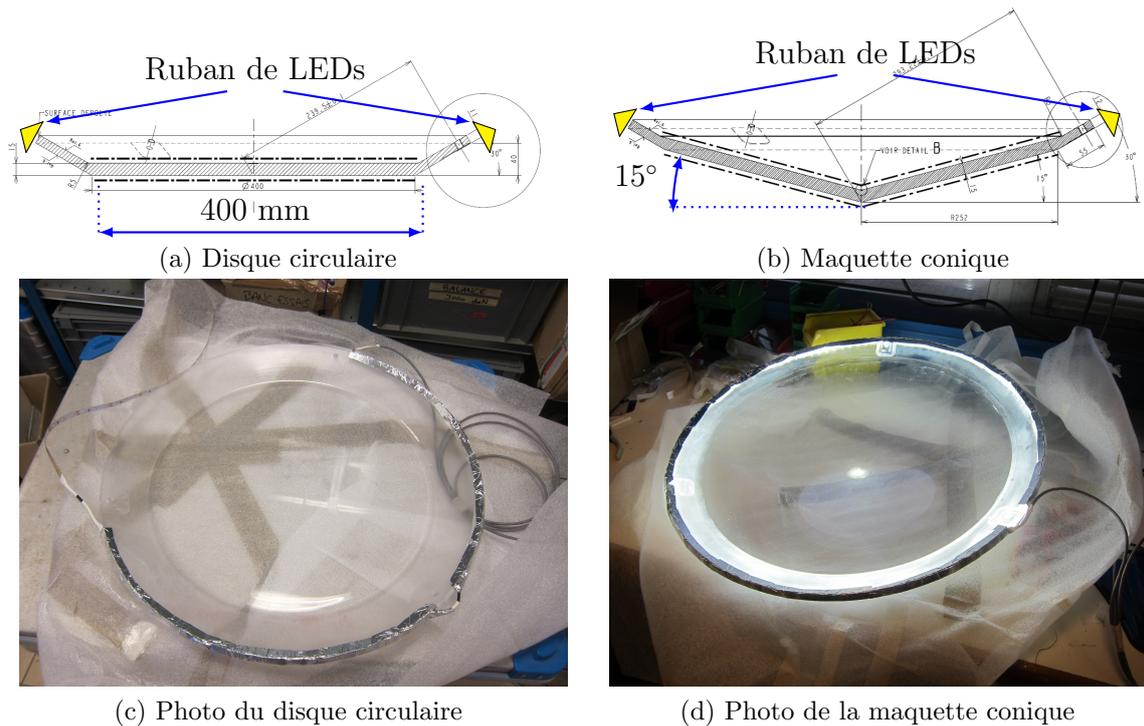


FIGURE 2 – Description des maquettes

dans cette zone du fait de ces défauts. Une piste d'amélioration pourrait être l'exploitation de l'ensemble des pixels formant les lignes de la grille plutôt que de se restreindre aux intersections, dont la détection peut s'avérer moins précise dans les zones de la maquette comprenant des défauts optiques (ex : rayures, défauts de fabrication/polissage).

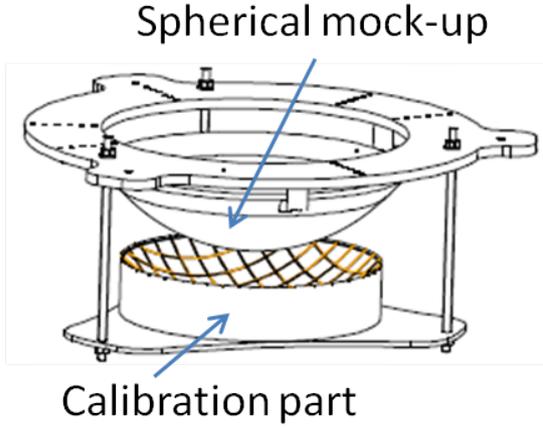
### II – 3 Prise du « zéro »

Pour les maquettes planes (disque circulaire, ellipse et carré), l'horizontalité de la maquette était d'abord réglée à l'aide d'un inclinomètre posé sur la face supérieure de la maquette. La hauteur de référence était ensuite réglée en approchant la maquette de la surface de libre, la maquette étant complètement mouillée à 0.5mm près. On notera néanmoins que dans le cas des maquettes planes, du fait des effets capillaires, un ménisque se forme sur la partie extérieure de la maquette et induit une surface de mouillage plus importante de quelques mm que nous ne pouvons maîtriser.

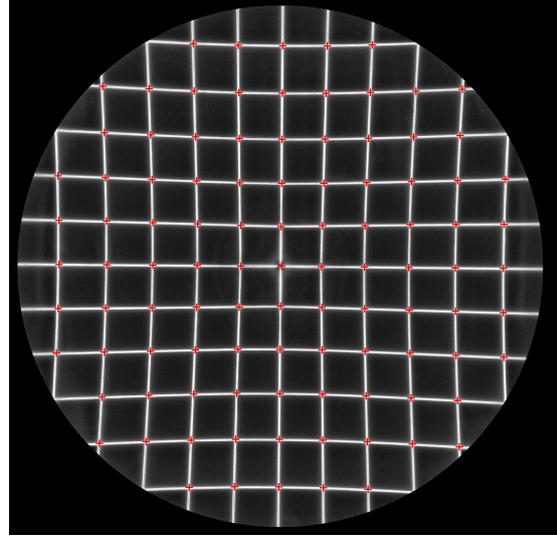
Pour les maquettes tridimensionnelles (cône et sphère), l'horizontalité était plus difficile à régler du fait de l'absence de surface de référence. De ce fait, nous avons procédé par incrément en enfonçant progressivement la maquette dans l'eau et en corrigeant les angles de gîte et de tangage afin d'assurer une surface mouillée symétrique. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur l'image obtenue avec la mire d'étalonnage. La hauteur théorique où la pointe du cône devait toucher la surface libre a été déduite du rayon des surfaces mouillées mesurées à différents enfoncements. Lors des essais de sortie, cela nous assurait une surface mouillée initiale égale à la surface mouillée recherchée. Cette hauteur de référence a ensuite été utilisée pour les essais combinés d'entrée/sortie d'eau.

### II – 4 Trajectoires des maquettes

Pour les essais de sortie d'eau présentés à la section suivante, l'élévation de la maquette,  $z(t)$ , suivait l'évolution suivante :

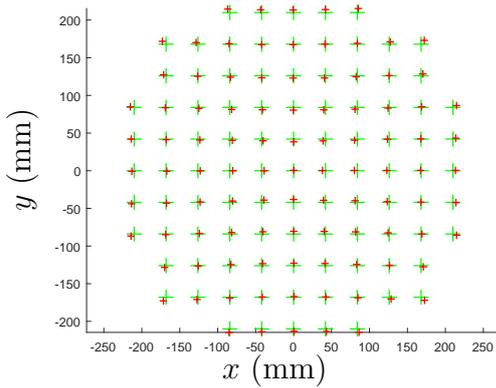


(a) Mire sphérique

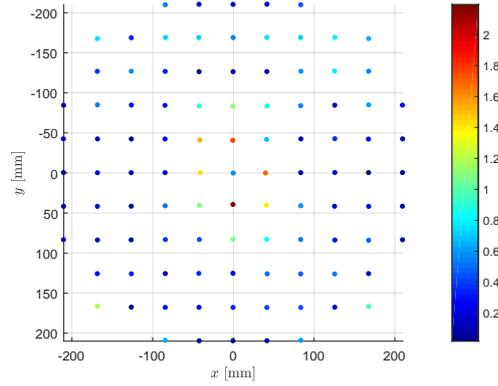


(b) Détection des intersections de la grille pour la maquette cône

FIGURE 3 – Mire d'étalonnage et détection des intersections de la grille



(a) Points théoriques (vert) et mesurés (rouge)



(b) Erreur résiduelle (en mm) après étalonnage

$$\begin{cases} z(t) = H[1 + \operatorname{erf}(U_{max}(t - t_0)\sqrt{\pi}/H)]/2, & z \leq H \\ \dot{z}(t) = U_{max}, & z \geq H/2, \end{cases} \quad (1)$$

où  $\operatorname{erf}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_0^x \exp(-\tau^2) d\tau$  est la fonction erreur et  $U_{max}$  est la vitesse maximale de la maquette. Les paramètres  $H$  et  $U_{max}$  ont été ajustés en fonction des limites de l'hexapode en termes de vitesse, accélération et puissance :  $H = 10$  cm et  $U_{max} = 0.6$  m/s. Le temps de référence  $t_0$  était tel que  $z(t = 3 \text{ s}) = H/2$ . Ce mouvement s'inspire des travaux de [4] dédiés à la façon dont les félins boivent, il assure en outre une évolution régulière de l'accélération et une diminution de l'accélération au fur et à mesure que la vitesse augmente (limitant ainsi la puissance mécanique nécessaire). Durant les essais d'entrée et sortie d'eau, le mouvement de la maquette suivait l'évolution suivante :

$$\begin{cases} z(t) = -(H/2) \cdot \operatorname{erf}(U_{max}(t - t_0)\sqrt{\pi}/H), & t \leq t_0, \\ z(t) = -H \sin(2\pi(t - t_0)/T), & t_0 \leq t \leq T/2 + t_0, \\ \dot{z}(t) = U_{max}, & t \geq T/2 + t_0, \end{cases} \quad (2)$$

où  $T = 2\pi H/U_{max}$ ,  $U_{max} = 0.6\text{m/s}$  et  $H = \pi \tan(15^\circ)c_{max}/4$  est la profondeur de pénétration maximale. La valeur de  $H$  correspond ainsi à la valeur de l'enfoncement théorique du cône tel que la valeur maximale du rayon de la surface mouillée d'après la théorie de Wagner est égale à  $c_{max}$ .

### III – Simulations numériques

Des simulations numériques du phénomène de sortie d'eau ont été réalisées pour le cas des maquettes planes en utilisant le module Eulérien du code de calculs par éléments finis ABAQUS/Explicit. Dans ces simulations, l'eau est considérée comme un fluide compressible non-visqueux et la présence de l'air est négligée. La compressibilité a été prise en compte car le code ABAQUS/Explicit ne permet pas de simuler des écoulements incompressibles (à cause de la méthode de résolution employée). Nous noterons cependant que la compressibilité n'a pas réellement d'influence sur les phénomènes que nous étudions. La position de la surface libre est suivie à l'aide d'une méthode de type « Volume-of-Fluid » avec reconstruction d'interface. Afin de simplifier la mise en œuvre des simulations et d'éviter d'avoir à modifier le maillage en cours de calcul, nous avons choisi de travailler dans un référentiel mobile lié au solide. Pour expliquer cette approche, considérons l'équation de conservation de la quantité de mouvement pour le liquide :

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \rho\vec{g}, \quad (3)$$

où  $\rho$  et  $\vec{v}$  sont respectivement la masse volumique et la vitesse d'une particule fluide.  $\vec{g}$  est l'effort (par unité de masse) dû à la gravité et  $P$  la pression au sein du fluide. Cette dernière est liée à la masse volumique par l'équation d'état de l'eau,  $P = P(\rho)$ . Le champ de vitesse est décomposé sous la forme suivante :

$$\vec{v}(x, t) = \vec{V}_S(t) + \vec{v}_r(x, t), \quad (4)$$

avec  $\vec{V}_S$  la vitesse du solide et  $\vec{v}_r$  la vitesse relative du fluide par rapport au solide. L'équation de conservation de la quantité de mouvement dans le référentiel mobile (lié au solide) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\rho \frac{D\vec{v}_r}{Dt} = -\nabla P + \rho\vec{g} - \rho\vec{\Gamma}_S, \quad (5)$$

$\vec{\Gamma}_S$  étant l'accélération du solide. L'évolution de la densité est donnée par l'équation de conservation de la masse et est liée uniquement au champ de vitesse relative :

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot \text{div}(\vec{v}) = -\rho \cdot \text{div}(\vec{v}_r). \quad (6)$$

Les équations (3) et (4) montrent qu'il est possible de décrire le mouvement relatif du fluide par rapport au solide en imposant un effort volumique « d'entraînement »,  $-\rho\vec{\Gamma}_S$ , qui dépend de l'accélération du solide. Les conditions aux limites considérées dans les simulations sont indiquées sur la figure 4 (dans le cas du disque circulaire). Pour les imulations présentées dans cet article, la gravité a été prise en compte. Pour cela, un champ de pression et de masse volumique initial (correspondant à la solution hydrostatique) doit être appliqué dans les simulations. Durant la phase de sortie d'eau, l'effort vomuique lié à l'accélération du solide (voir Eq. (3)) est appliqué. Notons que la pression appliquée en bas du domaine doit être mise à jour pour tenir compte du mouvement du solide. En effet, comme le maillage est lié au solide, la profondeur (par rapport à la surface initiale du liquide) des nœuds situés en bas du domaine évolue au cours du temps.

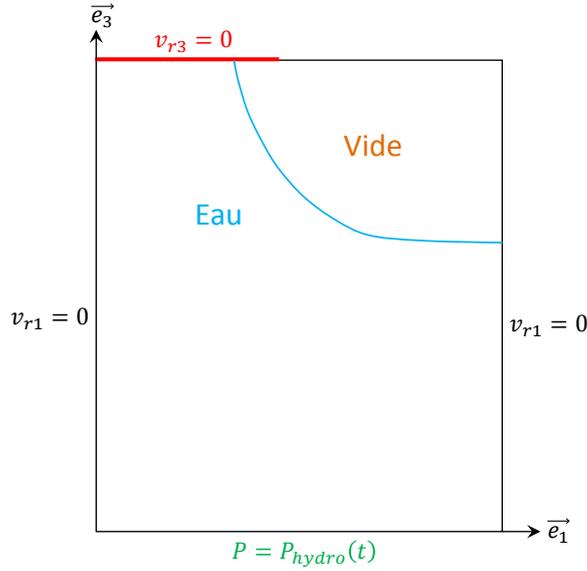


FIGURE 4 – Configuration et conditions aux limites considérées dans les simulations numériques de sortie d’eau. La ligne rouge correspond à la surface du solide et la ligne bleue à la surface libre du liquide

## IV – Résultats

Nous présentons les résultats obtenus avec le disque et le cône. Les résultats obtenus avec les autres maquettes seront présentés lors de la conférence.

### IV – 1 Sortie d’eau d’un cône d’angle 15°

La figure 5 ci-dessous présente une séquence d’images obtenue lors de la sortie d’eau d’un cône d’angle 15° pour une surface mouillée initiale de rayon  $c_0 = 0.25\text{m}$ . Le contour lumineux correspondant à la ligne de contact a été extrait des images à l’aide d’un algorithme de détection de contour et le résultat obtenu a été superposé aux images initiales en pointillés rouge. Afin de valider le fait que ce contour lumineux correspond bien au contour de la surface de contact, nous avons réalisé le même essai avec un damier placé au fond du bassin. Les résultats obtenus avec le damier sont présentés à la figure 6 ci-dessous, images sur lesquelles ont été superposés (pointillés rouges) les contours lumineux extraits des images de la figure 5. On peut ainsi vérifier que le contour lumineux obtenu avec la technique de l’éclairage LED tangential délimite la surface sur laquelle le damier n’est pas distordu (mis à part la distorsion liée à la forme de la maquette). Bien que non présentés ici, les résultats obtenus avec un disque circulaire de rayon égale à 20cm sont aussi bons que ceux obtenus avec le disque. La technique de l’éclairage tangential est donc aussi bien adaptée aux formes planes et qu’aux formes tridimensionnelles.

L’évolution du rayon de la surface mouillée durant la sortie d’eau du cône d’angle 15° et du disque circulaire de rayon 20 cm est présentée à la figure 7a ci-dessous. On peut ainsi voir qu’il n’y a que très peu de différence entre les résultats du cône et du disque, notamment au regard des différences que l’on pourrait observer entre ces deux types de formes lors d’impacts hydrodynamiques. Les résultats obtenus par l’approche numérique pour le disque circulaire sont également présentés pour comparaison. Les différences ob-

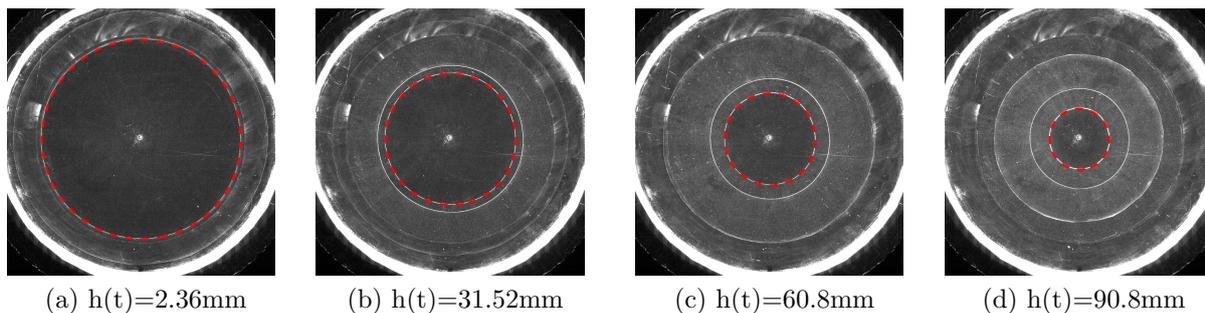


FIGURE 5 – Séquence d’images obtenue lors d’un essai de sortie d’eau du cône pour un rayon de surface mouillée initial  $c_0 = 0.25\text{m}$ . La position de la ligne de contact est repérée en pointillés rouge

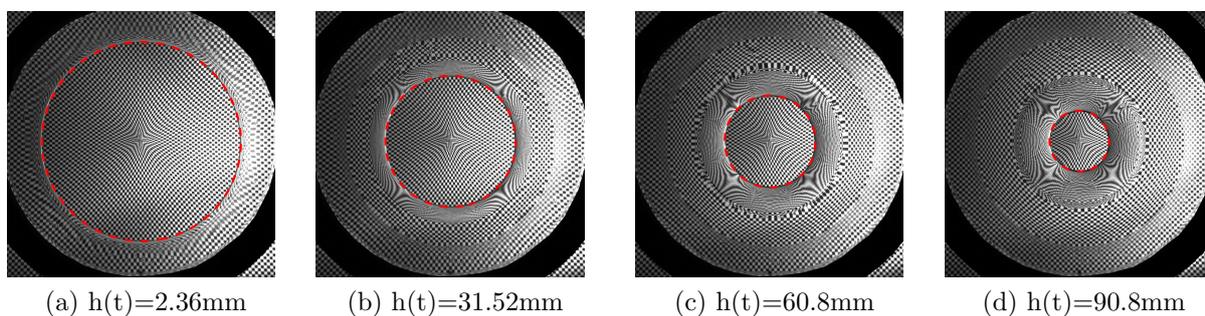
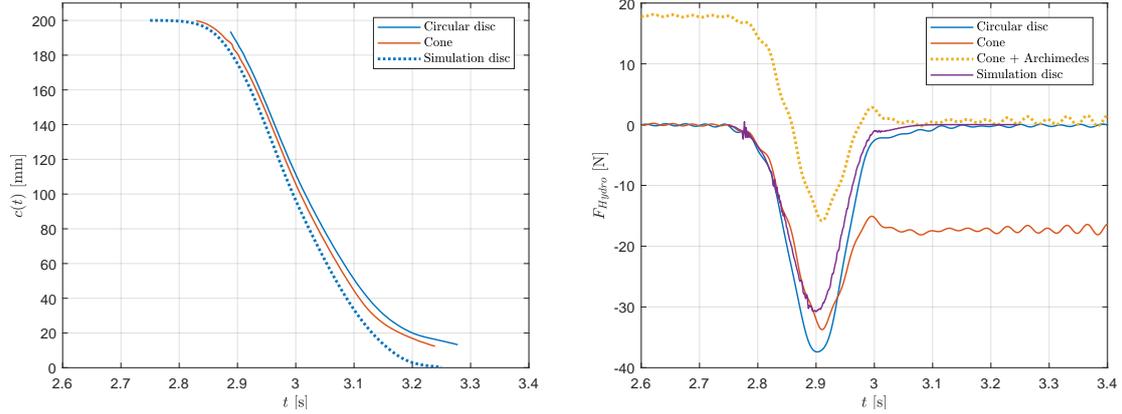


FIGURE 6 – Séquence d’images obtenue lors d’un essai de sortie d’eau du cône pour un rayon de surface mouillée initial  $c_0 = 0.25\text{m}$  avec la technique du damier. La position de la ligne de contact extraite des images de la figure 5 est repérée en pointillés rouge

servées entre les résultats numériques et expérimentaux sont faibles mais non négligeables. Cette différence pourrait venir du fait que la surface mouillée initiale dans les essais avec le disque déborde sur les bords inclinés, et donc dépasse celle imposée dans les simulations numériques. Les résultats obtenus en termes d’effort hydrodynamique pour le cône et le disque sont présentés à la figure 7b ci-dessous. Pour extraire l’effort hydrodynamique de l’effort total mesuré durant les essais, chaque essai a été réalisée en air afin d’estimer la part de l’effort liée à l’inertie de la maquette. A noter que pour le cône, l’effort mesuré est nul en début d’essai du fait de la mise à zéro des capteurs d’effort en début d’essai. Afin de compenser cela, nous avons également tracé (en jaune) l’effort hydrodynamique mesuré auquel nous avons soustrait la valeur asymptotique de l’effort en fin d’essai correspondant à la poussée d’Archimède. Nous avons également réalisé des essais en similitude de Froude pour différentes valeurs de l’enfoncement initial afin de s’assurer que les résultats ne dépendaient pas de l’échelle et donc que les effets de tension de surface étaient négligeables dans nos essais. Les résultats en termes d’évolution du rayon de la surface mouillée adimensionnalisé,  $c(t)/c_0$ , obtenus pour différentes valeurs du rayon de la surface mouillée initiale,  $c_0$ , variant de 10 à 25 cm, sont présentés à la figure 8 ci-dessous. La trajectoire utilisée pour  $c_0 = 0.25\text{m}$  correspond aux valeurs indiquées au paragraphe II – 4. On observe que les résultats sont très proches, malgré de légers décalages en fin d’essais qui sont de l’ordre de la précision de la mesure compte tenu des défauts de réalisations au centre de la maquette et de la précision de la technique d’éclairage tangentiel en fin d’essai (le contour lumineux devient de plus en plus épais). Cela confirme néanmoins que les effets de la tension de surface sont négligeables aux échelles que nous étudions.



(a) Evolution du rayon de la surface mouillée lors de la sortie d'eau du cône et du disque circulaire

(b) Evolution de l'effort hydrodynamique lors de la sortie d'eau du cône et du disque circulaire

FIGURE 7 – Evolution du rayon de la surface mouillée et de l'effort hydrodynamique lors de la sortie d'eau d'un cône et d'un disque circulaire

#### IV – 2 Entrée-sortie d'eau d'un cône d'angle $15^\circ$

La figure 9 ci-dessous présente une séquence d'images obtenue durant un essai combiné d'entrée-sortie d'eau avec le cône pour une valeur de  $c_{max} = 250$  mm. Durant la phase d'entrée (figures 9a et 9b), on peut observer à la fois le front du jet qui se développe et la ligne de contact. Durant la phase de sortie d'eau (figures 9c et 9d), seule la ligne de contact est visible (hormis les artéfacts lumineux dus à des réflexions indésirables sur la surface libre). L'évolution du rayon de la ligne de contact est présentée à la figure 10a ci-dessous. Le rayon de la surface mouillée théorique estimé par le modèle de Wagner (sans gravité) est également tracé à titre de comparaison. Les résultats sont très proches malgré la présence de la gravité dans les essais. A noter que nous avons pu observer sur les images que la maquette ne touchait pas l'eau à  $t = 3$  s, mais à  $t = 3.036$  s. Ce retard s'explique tout d'abord par le fait que l'hexapode n'est pas parfaitement synchronisé avec le système de mesure. De ce fait, nous avons identifié la valeur expérimentale de  $t_0$  (voir eq. 2) en faisant une analyse de corrélation entre la mesure de l'accélération et l'accélération théorique, ce qui donne une valeur expérimentale de  $t_0 \approx 3.031$  s. Nous imputons le retard supplémentaire au fait que la maquette ne touche pas l'eau pour une élévation théorique de  $z = 0$ . La différence d'élévation théorique  $|z(t = 3,036\text{s})|$ , (avec  $t_0 = 3,031$  s), a donc été retranchée à la profondeur de pénétration théorique pour le calcul de la surface mouillée par le modèle de Wagner. Pour la phase de sortie d'eau, l'estimation du rayon de la surface de contact par une approche dite de "von Karman modifiée" [10] est également tracée. Les différences notables entre les résultats du modèle de von Karman modifié montrent la nécessité du développement de modèles plus complexes. L'évolution de l'effort hydrodynamique ( $F_{hydro}$ ) mesuré durant un essai d'entrée-sortie avec le cône est tracée sur la figure 10b. L'effort mesuré en air ( $F_{air}$ ) et l'effort total mesuré en eau ( $F_{hydro} + F_{air}$ ) sont également présentés à titre d'information. On voit ainsi que l'effort lié à l'inertie de la maquette est relativement important au regard de l'effort hydrodynamique mesuré, malgré une position des capteurs d'effort au plus près de la maquette. L'ensemble des résultats expérimentaux d'effort présentés ici et précédemment ont été filtrés par un filtre de Fourier passe bas avec une fréquence de coupure de 30 Hz. Une comparaison de l'accélération théorique et de l'accélération théorique filtrée (fig. 11) montre que ce filtre n'est pas incompatible avec la dynamique du phénomène.

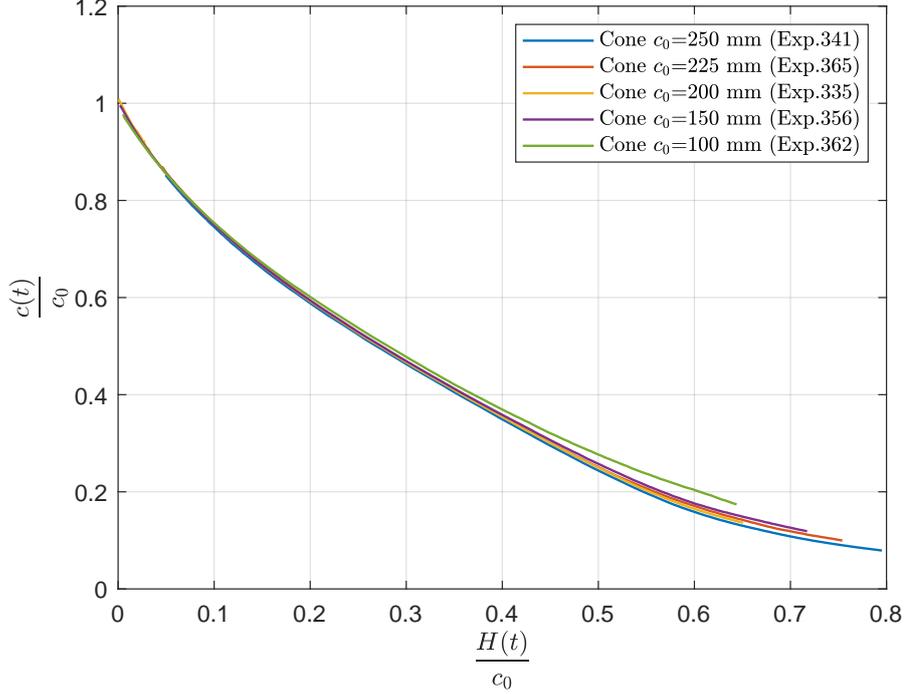


FIGURE 8 – Evolution du rayon de la surface mouillée  $c(t)$  adimensionnalisé par rapport au rayon initial  $c_0$  en fonction de l'élévation adimensionnée en similitude de Froude

A titre de comparaison, nous présentons également sur la figure 10b l'estimation de l'effort par le Modèle de Logvinovich Modifié ( $F_{MLM}$ ) précédemment utilisé par [10] dans le cas de l'entrée/sortie de corps 2D et étendu ici au cas axisymétrique (voir [8]). A noter que ce modèle n'est valide que durant la phase d'entrée et qu'il ne tient pas compte de la gravité. Au niveau de la transition entre les phases d'entrée et sortie d'eau (où la courbe MLM s'arrête), la différence entre l'effort hydrodynamique mesuré ( $F_{hydro}$ ) et l'effort estimé par le modèle MLM est relativement importante. Afin d'améliorer les résultats du modèle MLM, nous avons ajouté la composante hydrostatique de la pression au modèle MLM initial de la façon suivante :

$$F_{stat} = \int_{SM} p_{stat}(r) dS = \int_{SM} -\rho g(z - z_0) dS, \quad (7)$$

où  $F_{stat}$  représente l'effort hydrostatique et  $z_0$  représente la hauteur de référence pour l'application de l'équation de Bernoulli. Les résultats obtenus en prenant  $z_0 = 0$  (niveau initial de la surface libre au repos) et  $z_0 = \tan(15^\circ)c - z(t)$  (altitude du point de contact) sont superposés aux résultats expérimentaux sur la figure 10b. On peut voir que la contribution de la composante hydrostatique est non négligeable. Une application correcte de l'équation de Bernoulli implique de prendre une valeur de  $z_0 = 0$ , mais on peut observer que les résultats sont bien meilleurs lorsque l'on prend une valeur de  $z_0 = \tan(15^\circ)c - z(t)$ . Il est encore difficile de justifier clairement le choix de la meilleure valeur de  $z_0$ , mais la nécessité de cette modification du niveau de référence pourrait venir du fait que l'on ne tient pas compte de la gravité lors du calcul du potentiel des vitesses de Wagner. On pourrait également justifier le choix de  $z_0$  par le fait que la pression est nulle au point de contact pour  $z_0 = \tan(15^\circ)c - z(t)$  alors que celle-ci est non nulle pour  $z_0 = 0$ . Une com-

paraison entre un calcul 2D avec la condition de surface libre modifiée et des simulations numériques pourrait potentiellement permettre de répondre à cette question.

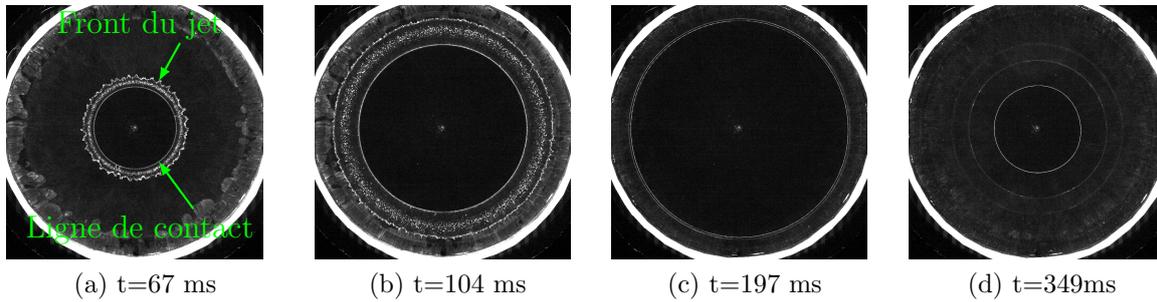
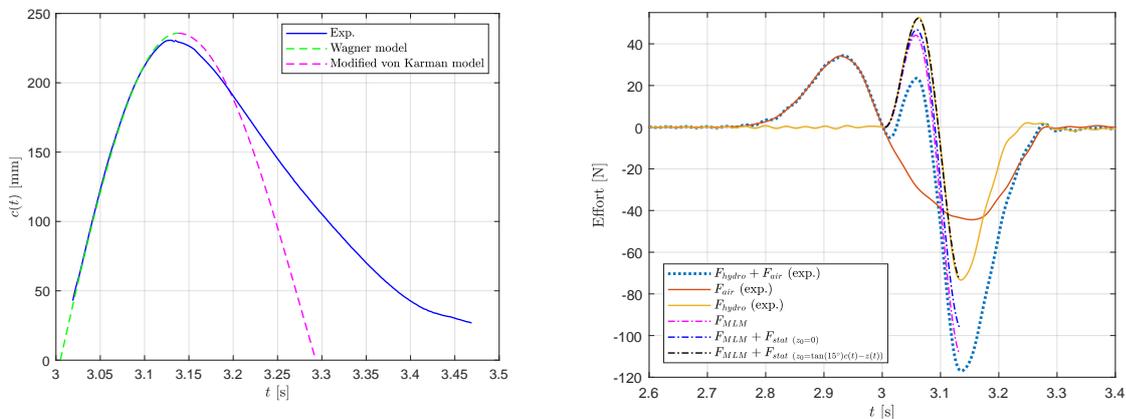


FIGURE 9 – Séquence d’images obtenues durant un essai d’entrée (a,b) et de sortie d’eau (c,d) avec le cône



(a) Evolution du rayon de la surface mouillée lors de l’entrée-sortie d’eau du cône et du disque circulaire

(b) Evolution de l’effort hydrodynamique lors de l’entrée-sortie d’eau du cône et du disque circulaire

FIGURE 10 – Evolution du rayon de la surface mouillée et de l’effort hydrodynamique lors de l’entrée-sortie d’eau d’un cône et d’un disque circulaire

## V – Conclusions et perspectives

A travers ces travaux, nous avons montré la faisabilité de la technique d’éclairage tangentiel pour le suivi de la ligne de contact lors d’essais de sortie d’eau et d’entrée d’eau en étudiant des fomes planes et tridimensionnelles. Les efforts hydrodynamiques mesurés durant les essais de sortie d’eau avec le disque circulaire sont en relativement bon accord avec les résultats issus des simulations numériques. L’estimation de l’effort par le modèle analytique MLM (pour les phases d’entrée) nécessite de prendre en compte la composante hydrostatique lors du calcul de la pression, ce qui pose des questions quant au niveau de référence à utiliser lors du calcul. La simulation numérique avec le code de calcul ABAQUS/Explicit des essais combinés d’entrée-sortie d’eau pose des difficultés. En effet, avec ce code, il est difficile d’appliquer une condition cinématique de glissement sur une surface non-plane (ex : cône). L’utilisation de l’algorithme de contact Euler-Lagrange n’est adaptée qu’à la simulation de phases d’entrée pour lesquelles la pression reste positive sur la surface de contact et ne permet donc pas de décrire le phénomène de succion. L’utilisation d’un autre outil numérique semble nécessaire pour aller plus loin.

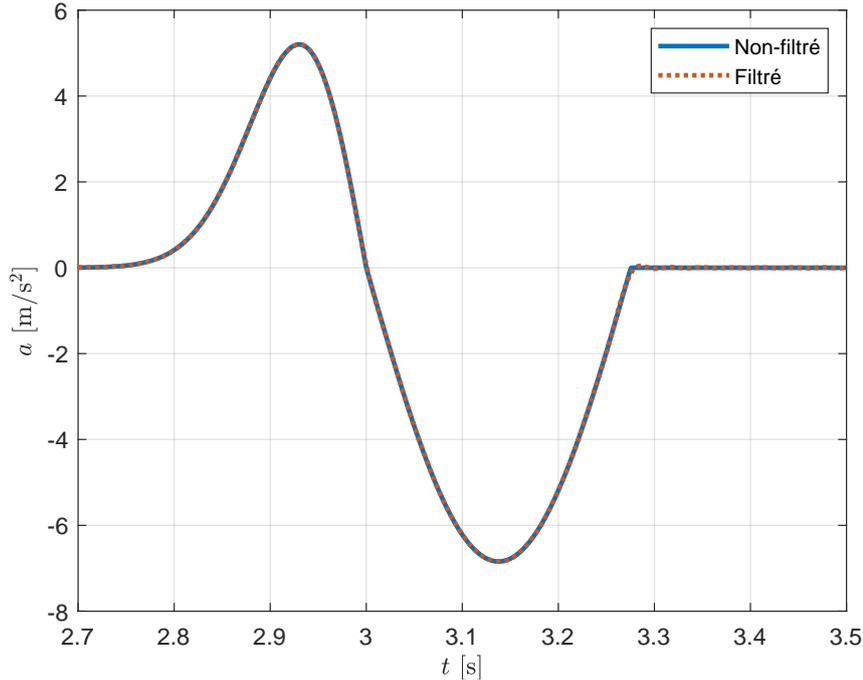


FIGURE 11

## Références

- [1] R. Baarholm and O. M. Faltinsen. Wave impact underneath horizontal decks. *Journal of Marine Science Technology*, 9 :1–13, 2004.
- [2] P. Kaplan. Analysis and prediction of flat bottom slamming impact of advanced marine vehicles in waves. *International Shipbuilding Progress*, 34(391) :44–53, 1987.
- [3] A. A. Korobkin. A linearized model of water exit. *Journal of Fluid Mechanics*, 737 :368–386, 2013.
- [4] P. M. Reis, S. Jung, J. M. Aristoff, and R. Stocker. How cats lap : Water uptake by felis catus. *Science*, 330 :1231–1234, 2010.
- [5] H. Sun and J. B. Helmers. Slamming loads on a wedge elastically suspended on a marine structure. In *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [6] Z. Tang, R. G. von Gioi, P. Monasse, and J.-M. Morel. A precision analysis of camera distortion models. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(6) :2694–2704, 2017.
- [7] A. Tassin, T. Breton, B. Forest, J. Ohana, S. Chalony, D. Le Roux, and A. Tancray. Visualization of the contact line during the water exit of flat plates. *Experiments in Fluids*, 58(8) :104, 2017.
- [8] A. Tassin, N. Jacques, A. El Malki Alaoui, A. Nême, and B. Leblé. Assessment and comparison of several analytical models of water impact. *International Journal of Multiphysics*, 4 :125–140, 2010.
- [9] A. Tassin, N. Jacques, B. Forest, S. Chalony, J. Ohana, D. Le Roux, and A. Tancray. Etude expérimentale et numérique du phénomène de sortie d’eau. In *15<sup>ème</sup> Journées de l’Hydrodynamique*, 22-24 Novembre, Brest, France (in french), 2016.
- [10] A. Tassin, D. Piro, A. Korobkin, K. Maki, and M. Cooker. Two-dimensional water entry and exit of a body whose shape varies in time. *Journal of Fluids and Structures*, 40 :317–336, 2013.