



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

22 - 24 novembre 2016 - Brest

### Etude expérimentale et numérique du phénomène de sortie d'eau

*An experimental and numerical study of the water exit phenomenon*

**Alan Tassin**<sup>(1)</sup> (alan.tassin@ifremer.fr), **Nicolas Jacques**<sup>(2)</sup>, **Bertrand Forest**<sup>(1)</sup>, **Sébastien Chalony**<sup>(1)</sup>, **Jérémy Ohana**<sup>(1)</sup>, **Dominique Le Roux**<sup>(1)</sup>, **Aurélien Tancray**<sup>(1)</sup>

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

<sup>(2)</sup> ENSTA Bretagne, FRE CNRS 3744, IRDL, 29806 Brest Cedex 09, France

#### Résumé

Nous étudions la sortie d'eau verticale d'un corps plan initialement en contact avec une surface d'eau au repos. Une technique expérimentale originale basée sur la diffusion de lumière dans une maquette en matériau transparent est proposée pour suivre l'évolution du contour de la surface de contact entre l'eau et le solide durant un essai de sortie d'eau. La faisabilité de cette technique est illustrée par l'étude de trois corps : un disque circulaire, un disque elliptique et une plaque carrée. Les résultats obtenus pour le disque circulaire en termes de surface de contact sont comparés à des résultats de simulations numériques réalisées avec le logiciel ABAQUS et à des résultats issus du modèle analytique de sortie d'eau de Korobkin (2013).

#### Summary

We investigate the vertical water exit of a flat solid body initially in contact with a water surface. An original experimental technique based on light diffusion in a transparent mock-up is proposed for the tracking of the boundary of the surface of contact between the solid and the water. The feasibility of the technique is shown by studying three bodies : a circular disc, an elliptic disc and a square plate. The results obtained for the circular disc are compared to results obtained with the CFD software ABAQUS and the analytical model of Korobkin (2013).

# 1 Introduction

Le problème de sortie d'eau auquel nous nous intéressons s'inscrit dans le cadre des études sur les impacts hydrodynamiques. On rencontre ce phénomène dans différents problèmes hydrodynamiques du fait du mouvement relatif de la surface libre par rapport au solide. Parmi les applications figurent : les impacts de vagues sur des structures situées au-dessus de la surface de l'eau (Baarholm et Faltinsen (2004), Sun et Helmers (2015)), le tossage des navires (Kaplan (1987)) ou l'amerrissage d'urgence des avions de transport (Tassin *et al.* (2013)). Dans ces problèmes, l'impact hydrodynamique peut 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 alors que dans d'autres zones elle serait en contraction. Le phénomène de sortie d'eau est également associé à un phénomène de succion qui peut entraîner de la cavitation (ex : amerrissage d'urgence). Contrairement à la phase d'entrée d'eau qui a motivé de nombreuses études, la phase de sortie d'eau reste jusqu'ici peu étudiée. Ce problème a malgré tout suscité un regain d'intérêt ces dernières années et a conduit à différentes publications : Piro et Maki (2013), Korobkin (2013), Tassin *et al.* (2013) ou Korobkin *et al.* (2015). D'un point de vue modélisation, les modèles de sortie d'eau proposés "s'inspirent" des travaux analytiques réalisés sur les impacts hydrodynamiques. A notre connaissance, les premiers travaux publiés suggérant de modifier le modèle de Wagner afin de pouvoir modéliser la phase de sortie d'eau remontent à Kaplan (1987). Observant que la contribution du "terme de slamming" dans le modèle de Wagner est toujours positive (vers le haut) lors du calcul de l'effort hydrodynamique, celui-ci propose d'annuler sa contribution durant la phase de sortie d'eau. Les arguments avancés par Kaplan (1987) pour un tel procédé restent cependant peu développés dans les publications disponibles. Il a ensuite été montré par Tassin *et al.* (2013) que l'on retrouvait la formule de Kaplan (1987) en imposant une condition de type Kutta (pression finie) au niveau du point de contact. L'estimation de l'évolution de la surface de contact reste également une question ouverte car la condition de Wagner n'est pas valable durant la phase de sortie d'eau. Gillow (1998) indique que la surface de contact doit augmenter au cours du temps afin que le problème de Wagner reste stable d'un point de vue mathématique. Ainsi, afin de traiter l'entrée et sortie d'eau d'un corps bi-dimensionnel (ex : dièdre), Tassin *et al.* (2013) ont utilisé une condition dite de "von Karman modifiée" pour laquelle le point de contact était défini comme l'intersection géométrique entre le corps impactant et un niveau d'eau de référence correspondant à la position verticale du point de contact au moment de la transition entre la phase d'entrée et la phase de sortie d'eau. Korobkin (2013) a ensuite proposé d'introduire une condition imposant une vitesse d'expansion de la surface de contact proportionnelle à la vitesse des particules du fluide au niveau du point de contact. Le facteur de proportionnalité a été identifié de sorte à reproduire les résultats en termes d'effort hydrodynamique obtenus numériquement par Piro et Maki (2011). Si l'accord entre ces résultats analytiques et numériques en termes d'effort hydrodynamique est meilleur que ceux obtenus avec la condition de von Karman modifiée, on peut néanmoins s'interroger sur le fait que cette amélioration provienne d'une meilleure estimation de la surface de contact. D'après les comparaisons en termes de champ de pression présentées par Tassin *et al.* (2013) en utilisant une formulation de la pression quasi-identique à celle de Korobkin (2013), il semblerait au contraire que la seule façon de s'approcher des résultats numériques en termes d'effort soit de dégrader l'estimation de la surface de contact. L'ensemble de ces observations ainsi que le manque de données expérimentales sur le phénomène de sortie d'eau ont motivé les travaux expérimentaux présentés dans cet article.

Nous abordons le problème de sortie d'eau de façon expérimentale et numérique. Ces travaux

portent sur la phase de sortie d'eau seule. Les formes étudiées sont pour l'instant planes : disque circulaire, disque elliptique et plaque carrée. La maquette est initialement en contact avec l'eau avec une immersion minimale et est extraite "violemment" vers le haut. La partie expérimentale se concentre pour l'instant sur la visualisation de la surface de contact. C'est une donnée importante du problème et une grandeur difficile à mesurer. La méthode employée par Halbout (2011) ou Takagi (2004) basée sur une vue de dessous d'une maquette opaque et un éclairage par lumière diffuse dans l'eau s'est montrée peu concluante lors de nos premières tentatives de visualisation de la surface mouillée. Nous avons ensuite entrepris des tests avec une maquette transparente afin d'améliorer la visualisation de la surface de contact. Des essais avec une maquette transparente avaient déjà été présentés par Scolan *et al.* (2006) afin de suivre l'évolution de la surface de contact entre une vague stationnaire et une plaque horizontale située au-dessus du niveau moyen de l'eau. Dans ces essais, un damier était placé au fond du bassin et la scène était filmée par dessus, le damier devenant visible uniquement sur la région de la plaque en contact avec l'eau. Cette méthode présente des difficultés pour une utilisation dans des configurations plus générales : forme tridimensionnelle, maquette en mouvement (avec du tangage) ou un bassin profond comme celui de l'IFREMER à Brest. Ces limitations nous ont amenés à développer une technique originale basée sur la diffusion de lumière dans une maquette en matériau transparent (PMMA). Nous avons d'abord observé que la ligne contact qui délimite la surface de contact entre la maquette et l'eau s'illuminait lorsque la maquette était éclairée à l'aide d'une nappe laser verticale. Nous avons ensuite entrepris de diffuser directement de la lumière au coeur de la maquette transparente à l'aide d'une LED haute puissance placée au centre de la maquette et dirigée vers le bas. Une caméra rapide placée au-dessus de la maquette permettait de suivre l'évolution de la ligne de contact. Cette technique a été testée dans une cuve de 1 m × 0.8 m × 0.6 m avec des maquettes planes de différentes formes d'une taille d'environ 20 cm : disque circulaire, disque elliptique et plaque carrée. Les premiers résultats encourageants obtenus avec cette technique nous ont ensuite amenés à concevoir une nouvelle maquette de forme carrée mais avec des bords surélevés afin de pouvoir utiliser un éclairage à LED tangentiel (par la tranche) plus puissant et réparti sur l'ensemble du pourtour de la maquette. La technique du damier a également été utilisée afin de montrer que l'anneau lumineux observé sur les prises de vue correspondait bien à la partie visible du damier.

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. Elles permettent de tenir compte de l'effet de la gravité et de la cinématique réelle de sortie du solide (liée à l'évolution temporelle de son accélération).

Dans cet article, nous présentons les résultats obtenus à ce jour en utilisant les deux techniques d'éclairage (éclairage par LED centrale et éclairage tangentiel) pour les différentes maquettes. Nous verrons qu'il a été possible de suivre l'évolution de la ligne de contact, même dans des cas où celle-ci présente une géométrie complexe (comme pour le cas de la plaque carrée). Les mesures du rayon de la surface de contact lors de la sortie d'eau d'un disque circulaire sont comparées aux résultats issus des simulations numériques et au modèle analytique de Korobkin. Quelques comparaisons entre les simulations numériques et le modèle analytique de Korobkin en termes d'effort hydrodynamique et de surface de contact sont également présentées.

## 2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est illustré à la figure 1 par un schéma de principe et une photo prise lors d'un essai caméra avec une disque elliptique. Il est constitué d'une cuve de 1 m × 0,8 m × 0,6 m remplie de 0,4 m d'eau et d'une table de déplacement motorisée sur laquelle est fixé

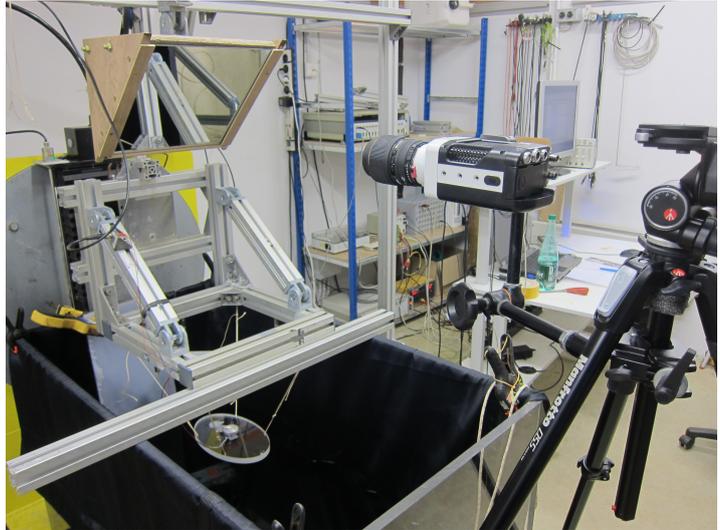
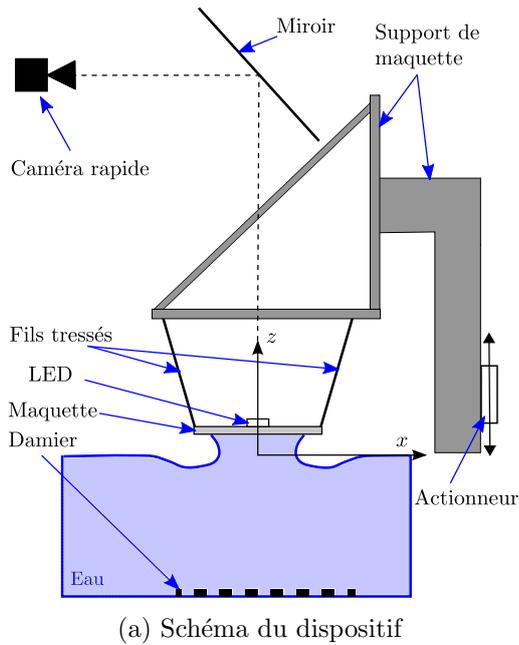


FIGURE 1 – Description du dispositif expérimental

un support métallique. Les maquettes sont reliées au support de maquette à l'aide de 4 fils tressés de haute raideur (Vectran de diamètre 1,7mm). L'ensemble des résultats présentés dans l'article ont été obtenus à l'aide d'une caméra Photron FastCam Mini AX50 ou SA-X2 équipée d'un objectif Samyang de longueur focale 100 mm avec une ouverture de 2,8. A noter que les essais ont été réalisés dans l'obscurité et que les bords de la cuve ont été recouverts d'un tissu noir afin d'éviter toute réflexion de lumière.

## 2.1 Configuration 1 : LED centrale

Dans cette configuration, un spot LED (Minostar) est fixé au centre de la face supérieure de la maquette. Le flux lumineux de ce spot est d'environ 140 lm et son angle d'ouverture d'environ  $45^\circ$ . La surface de la maquette a été légèrement dépolie sous le spot LED afin de favoriser la diffusion de lumière dans le matériau (PMMA). Cette configuration a été testée pour un disque circulaire de diamètre 200 mm et d'épaisseur 8 mm, un disque elliptique de demi-axes 15 cm et 25 cm et d'épaisseur 15 mm ainsi qu'une plaque carrée de côté 20 cm et d'épaisseur 8 mm. Afin de valider le principe de la technique de visualisation, nous avons réalisé des essais avec un damier placé au fond de la cuve (environ 40 cm sous la surface libre). Pour les essais avec le disque circulaire, un accéléromètre a été fixé au-dessus de la LED centrale afin d'analyser plus finement le mouvement de la maquette. Cette mesure a ensuite été utilisée comme donnée d'entrée pour les simulations numériques. Un enregistrement de l'accélération durant un essai est présenté à la figure 2 à titre d'exemple. A noter que l'élévation de la maquette provient d'une double intégration par rapport au temps du signal d'accélération. Nous observons que l'accélération évolue tout au long de la phase de sortie et atteint une valeur maximale d'environ  $26 \text{ m/s}^2$ . Pour l'évaluation de la faisabilité des techniques d'éclairage, on peut considérer que les mouvements sont globalement semblables pour les autres maquettes bien qu'il y ait une certaine dispersion des signaux d'accélération entre les différents essais du fait des imperfections du montage. La consigne de déplacement de l'actionneur reste toutefois la même pour l'ensemble des essais présentés.

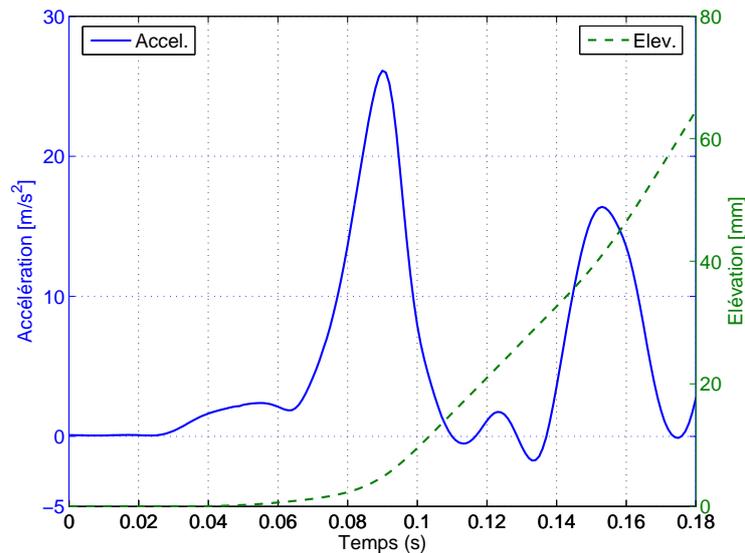


FIGURE 2 – Accélération et élévation durant la sortie d’eau d’un disque circulaire

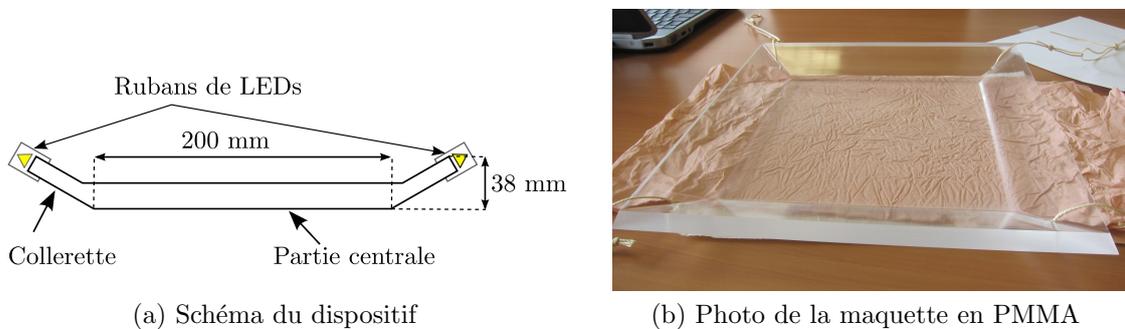


FIGURE 3 – Description du dispositif d’éclairage par la tranche (configuration 2)

## 2.2 Configuration 2 : éclairage LED tangentiel

Afin de pouvoir intégrer un dispositif d’éclairage LED tangentiel à une maquette carrée de côté 200 mm, la base de la maquette de forme carrée a été prolongée par une collerette inclinée de  $30^\circ$  par rapport aux faces de la partie centrale. L’épaisseur de la partie centrale (15 mm) est supérieure à celle de la collerette (12 mm) afin d’éviter un masquage ou une déformation optique de la ligne de contact au début de la sortie. Ce dispositif d’éclairage est plus puissant (1000 lm en tout) que le précédent et permet une meilleure répartition des sources de lumière sur l’ensemble de la maquette. Avec cette configuration, un segment de la ligne de contact reçoit de la lumière “de tous côtés”, alors qu’avec la LED centrale la ligne de contact est éclairée uniquement depuis le centre de la maquette.

## 3 Simulations numériques

Des simulations numériques du phénomène de sortie d’eau ont été réalisées 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 :

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = -\nabla P + \rho \vec{g}, \quad (1)$$

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 :

$$\vec{v}(x, t) = \vec{V}_S(t) + \vec{v}_r(x, t), \quad (2)$$

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 :

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

$\vec{\Gamma}_S$  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 :

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \cdot \text{div}(\vec{v}) = -\rho \cdot \text{div}(\vec{v}_r). \quad (4)$$

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 une partie des simulations, la gravité a été prise en compte. Dans ce cas, les calculs sont réalisés en deux étapes. Tout d'abord, l'effort volumique dû à la gravité est appliqué progressivement. Pour que le fluide reste en équilibre, il est nécessaire d'appliquer en bas du domaine de calcul une pression correspondant à la pression hydrostatique à cet endroit. Durant la seconde phase (correspondant à la sortie d'eau), l'effort 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.

## 4 Résultats

### 4.1 Visualisation de la ligne de contact

Une séquence d'images obtenues pour différentes élévations,  $h(t)$ , durant la sortie d'eau d'un disque circulaire est présentée à la figure 5. On peut y observer deux anneaux lumineux concentriques. L'anneau extérieur correspond au bord du disque. L'anneau intérieur, dont l'intensité lumineuse augmente au fur et à mesure de la sortie, suit le mouvement de la surface de contact qui se contracte vers le centre de la maquette au cours de la sortie. Les images obtenues pour des élévations similaires en ajoutant un damier au fond de la cuve sont présentées à la figure 6. On peut voir que la partie visible et non déformée du damier suit une évolution semblable

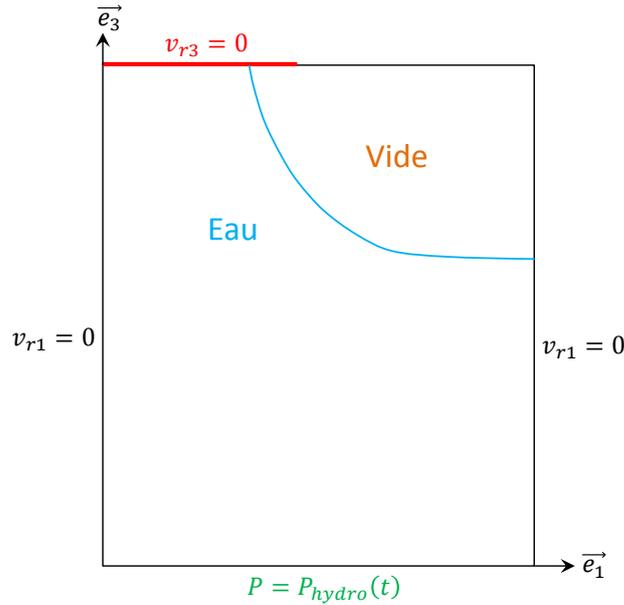


FIGURE 4 – Configuration et conditions aux limites considérées dans les simulations numériques de sortie d’eau. La ligne rouge correspond à la surface du solide et la ligne bleue à la surface libre du liquide

à celle de l’anneau intérieur observé sur la figure 5. Si l’anneau lumineux est clairement visible sur les figures 6c et 6d, le contraste n’est pas suffisant sur les images 6a et 6b pour conclure. Afin de mieux comparer les deux techniques, la géométrie de l’anneau lumineux observé sur la figure 5 a été détectée en ajustant une ellipse à l’aide de la méthode de Taubin (1991). Les points utilisés pour cette détection ont été sélectionnés par un seuillage des niveaux de l’image. La figure 7 montre une comparaison de l’ellipse correspondant aux images de la figure 5 et des images avec damier. On peut clairement voir que la partie visible et indéformée du damier est délimitée par l’anneau lumineux. Une séquence d’images obtenues lors de la sortie d’eau d’un disque elliptique est présentée à la figure 8. Ces images font apparaître une ligne de contact dont la luminosité est bien moins homogène que pour le disque circulaire, en particulier au début de la sortie d’eau. Malgré une épaisseur de maquette plus importante que pour le disque, ce qui devrait favoriser une plus grande intensité lumineuse de la ligne de contact, il a été nécessaire de multiplier les niveaux de gris par un facteur 16 afin de pouvoir distinguer l’ensemble de la ligne de contact. A noter que la lumière incidente est normale à la ligne de contact dans les zones où la ligne de contact est la plus lumineuse. Les 2 traces lumineuses circulaires que l’on peut observer sur la partie inférieure de la maquette sont dues à un dépolissage pour des essais avec la LED décalée par rapport au centre de l’ellipse. On peut observer une forte variation de l’élancement de la ligne de contact au cours de l’essai. Une séquence d’images obtenues durant la sortie d’eau d’une plaque carrée est présentée à la figure 9. Les images 9a à 9c ont été obtenues sans damier et en multipliant les niveaux de gris par un facteur 16. Comme pour le disque elliptique, on observe que la luminosité de la ligne de contact varie fortement suivant les régions. Les zones où la lumière incidente est normale à la ligne de contact paraissent également plus lumineuses. La surface de contact se contractant plus lentement selon les diagonales, cela conduit à une ligne de contact de forme bien plus complexe. La surface de contact devient très allongée dans la direction des diagonales du carré. La figure 9d provient d’un essai avec un damier placé sous la partie droite de la plaque carrée et correspond à une élévation de la maquette comparable à celle de la figure 9c. Il est remarquable d’observer que le damier est visible

jusqu'à l'extrémité des zones fortement allongées de la surface mouillée. Cela confirme que la courbe lumineuse observée précédemment correspond bien à la ligne de contact. Par ailleurs, cela révèle la structure complexe de la colonne d'eau qui se forme sous la maquette. On peut également apprécier la richesse des phénomènes optiques liés aux réfractions à travers la surface libre, une image du damier déformé apparaissant sur la partie gauche de la plaque alors que le damier se situe sous la partie droite de la maquette. Sur la base des observations précédentes, nous avons conçu le système d'éclairage LED tangentiel décrit au paragraphe 2.2. Les résultats obtenus avec cette nouvelle technique sont présentés à la figure 10. Le gain attendu en termes d'homogénéité et d'intensité lumineuse de la ligne de contact est d'autant plus évident que les résultats présentés correspondent aux images brutes sans application de gain additionnel. A noter que l'image devient plus floue en fin d'essai du fait que la maquette se rapproche de la caméra. Ce problème devrait disparaître en fixant la caméra au support de maquette dans le prochain montage.

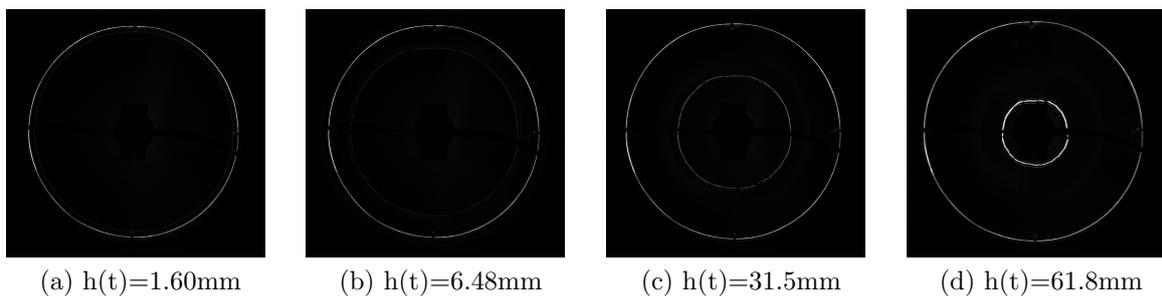


FIGURE 5 – Configuration 1 : séquence d'images lors de la sortie d'eau d'un disque circulaire

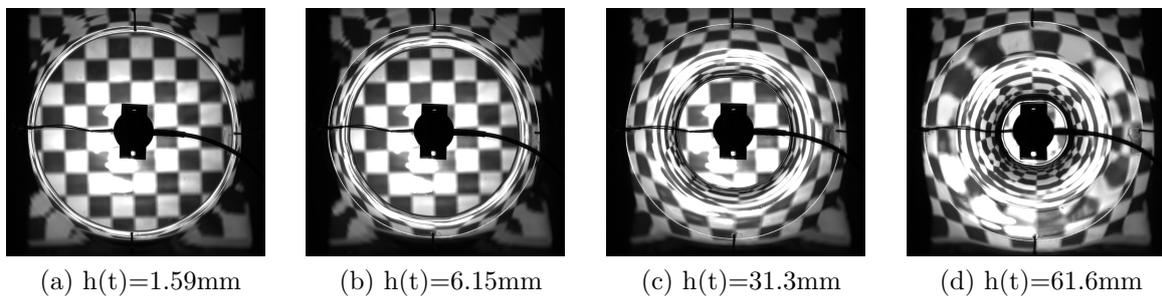


FIGURE 6 – Configuration 1 avec damier

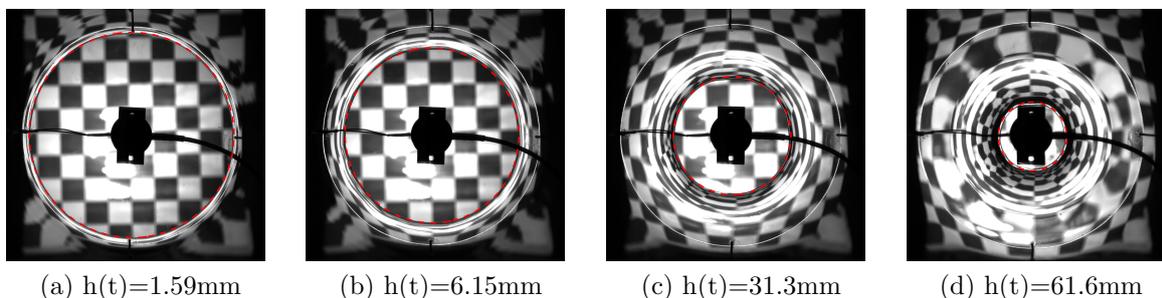


FIGURE 7 – Comparaison LED/damier (voir version en couleur)

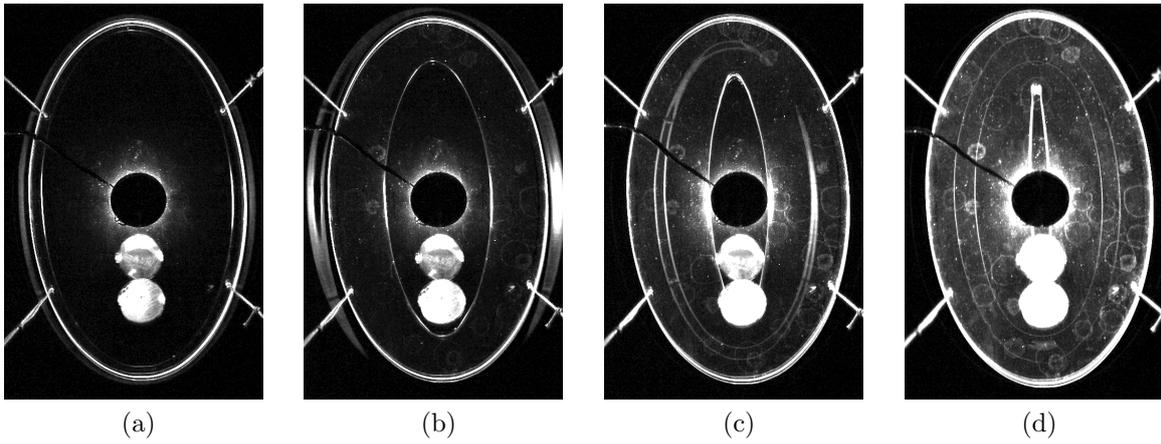


FIGURE 8 – Configuration 1 : disque elliptique avec LED centrale

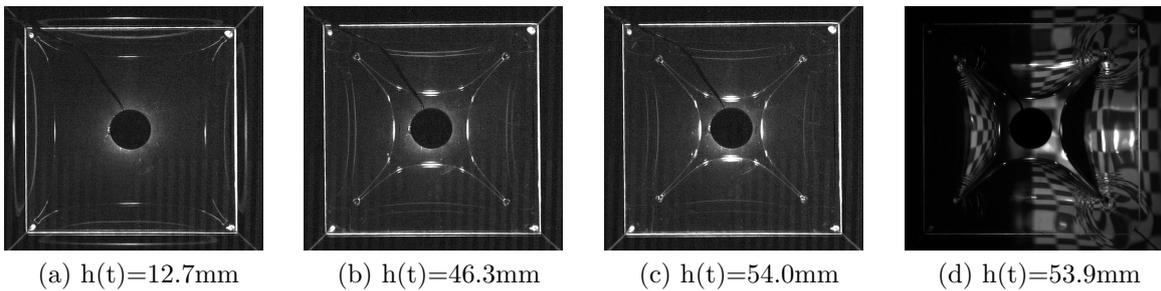


FIGURE 9 – Configuration 1 : plaque carrée avec LED centrale

## 4.2 Evolution de la ligne de contact lors de la sortie d'eau d'un disque circulaire

Une comparaison des résultats obtenus par les différentes approches en termes d'estimation et de mesure du rayon de la ligne de contact ( $c(t)$ ) lors de la sortie d'eau d'un disque circulaire est présentée à la figure 11. Les résultats expérimentaux proviennent de la détection de la ligne de contact discutée précédemment et correspondent à la moyenne des demi-axes de l'ellipse. Les résultats sont normalisés par rapport à la moyenne des deux demi-axes de l'ellipse correspondant au bord du disque. Deux résultats d'essais sont tracés sur cette figure (essais 343 et 344). Ces résultats expérimentaux sont à comparer aux résultats obtenus par simulation numérique en utilisant l'accélération enregistrée lors de l'essai 343 (ABQ test 343). Les résultats analytiques du modèle de Korobkin (qui ne tient pas compte de la gravité) pour une accélération constante sont présentés à titre de comparaison. Ces résultats analytiques ont été obtenus pour deux valeurs du paramètre de proportionnalité ( $\gamma$ ) entre la vitesse de contraction de la surface mouillée et la vitesse des particules de fluide au niveau du point de contact. Des résultats numériques obtenus pour une accélération constante et sans tenir compte de la gravité

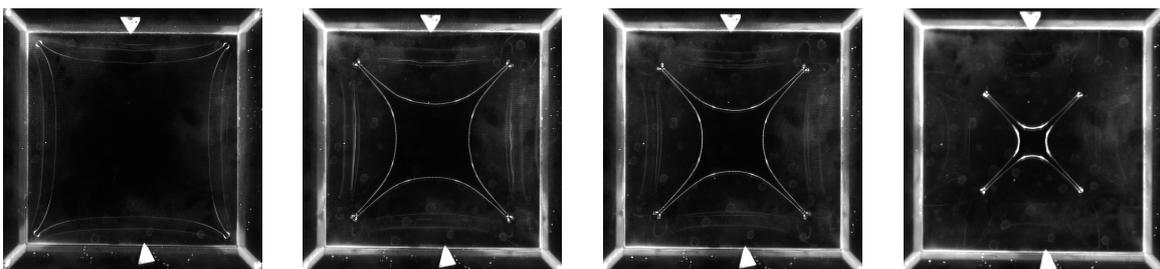


FIGURE 10 – Configuration 2 : maquette carrée avec éclairage LED tangentiel

( $Fr = \infty$ ) sont également présentés à titre de comparaison avec le modèle de Korobkin. L'accord entre les résultats numériques et expérimentaux est globalement bon. Il est pour l'instant difficile de conclure sur l'origine des différences observées (effet d'échelle, précision des mesures d'accélération, technique de visualisation, le fait que les simulations négligent la viscosité et la tension de surface). Ces résultats préliminaires montrent cependant la possibilité de détecter la ligne de contact à partir d'une diminution d'environ 5% de la surface mouillée.

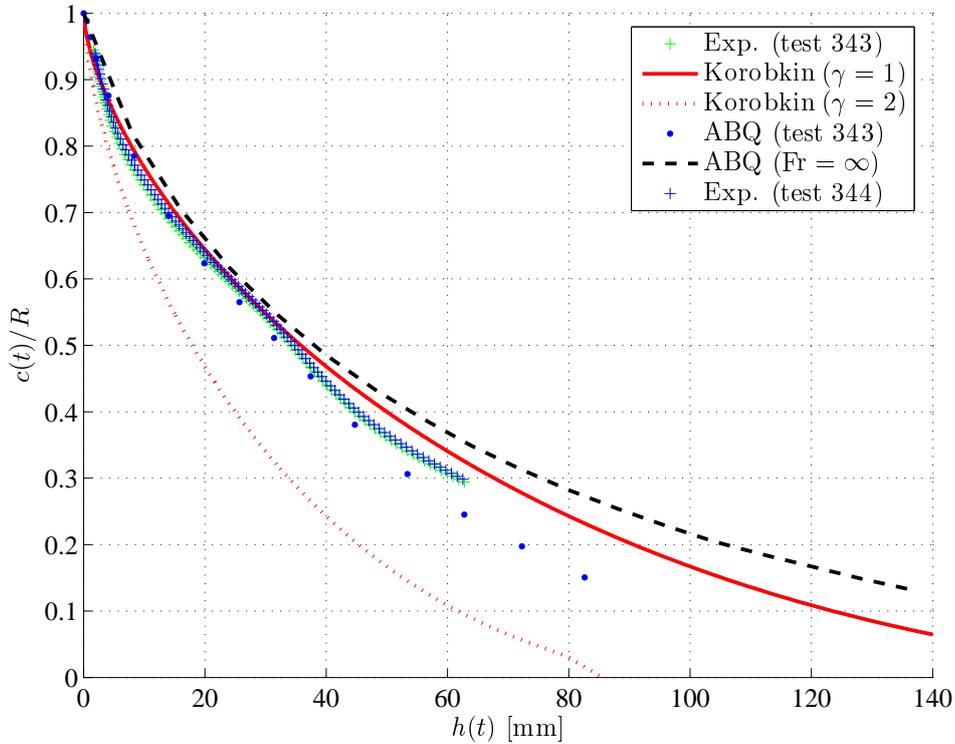


FIGURE 11 – Comparaison des rayons de la ligne de contact ( $c(t)$ ) mesurés et calculés en fonction de l'élévation du disque circulaire

### 4.3 Evolution de l'effort hydrodynamique

La figure 12 ci-dessous présente une comparaison de l'effort calculé numériquement (ABQ) et l'effort estimé par le modèle analytique de Korobkin dans le cas d'un disque circulaire qui est extrait à accélération constante sans tenir compte de la gravité. L'effort hydrodynamique,  $F(t)$ , est adimensionné par rapport à l'effort théorique du modèle analytique ( $\rho$  est la masse volumique du liquide,  $R$  le rayon du disque et  $\ddot{h}(t)$  l'accélération constante du disque). Il est intéressant d'observer que l'accord entre les résultats issus des simulations numériques et des calculs analytiques en termes d'effort est meilleur pour  $\gamma = 2$  alors que, d'après la figure 11, les résultats en termes de rayon de la surface de contact semblent plus proches pour  $\gamma = 1$ . Cela indique que, dans sa forme actuelle, le modèle analytique n'est pas en mesure de décrire à la fois l'évolution de la surface de contact et celle de l'effort hydrodynamique.

## 5 Conclusion et perspectives

Nous proposons une nouvelle méthode pour la visualisation de la ligne de contact lors d'essais de sortie d'eau. La méthode d'éclairage par une LED centrale permet d'obtenir des résultats exploitables pour le suivi de la ligne de contact dans le cas du disque circulaire. Cette

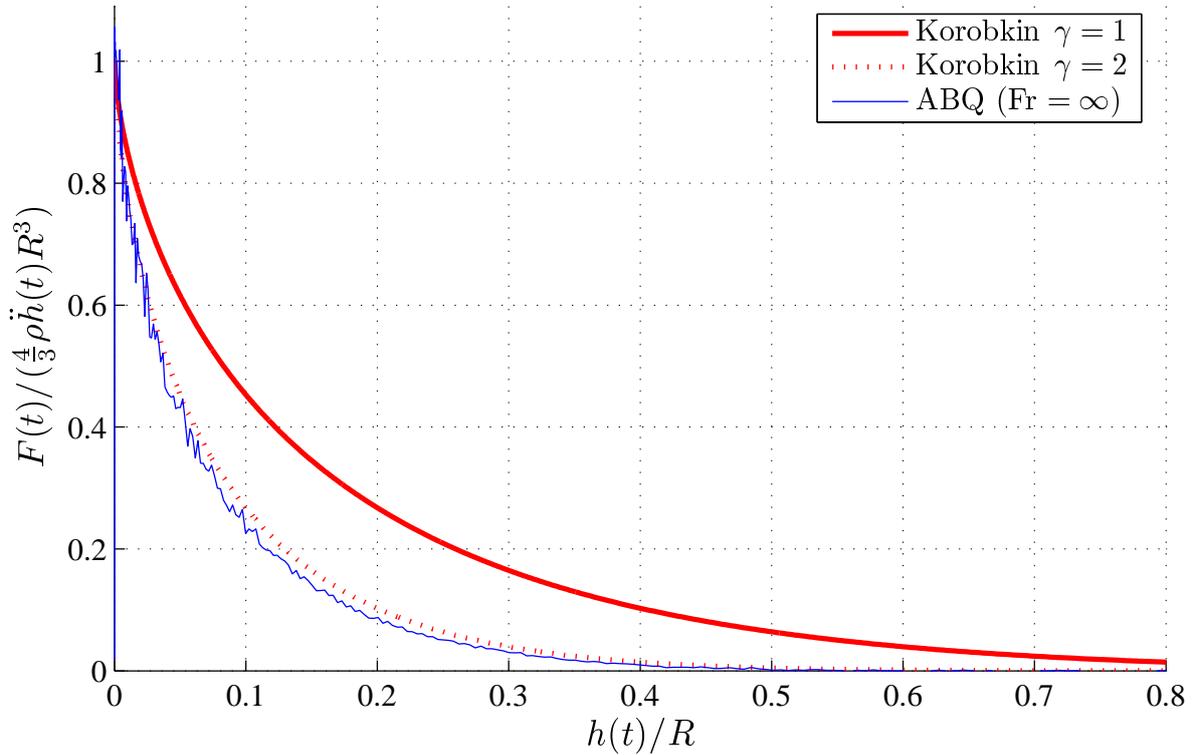


FIGURE 12 – Evolution de l’effort adimensionnel durant la sortie d’eau d’un disque circulaire

technique est par contre bien moins performante dans le cas de formes non-axisymétriques : disque elliptique et plaque carrée. La technique d’éclairage LED tangentiel permet d’obtenir des résultats bien meilleurs dans le cas de la plaque carrée. Cette méthode nous paraît adaptée pour des essais sur des formes tridimensionnelles : calotte sphérique, cône, parabolôïde elliptique. Elle devrait également permettre de faire des essais à des échelles plus grandes du fait de la possibilité d’augmenter la puissance lumineuse. Dans les prochains essais en préparation, nous prévoyons de fixer la caméra au support de maquette afin que l’angle de vue et la distance objet-caméra ne varient pas au cours de l’essai. Cette façon de procéder nous amène à envisager des essais où la maquette aurait un mouvement de rotation (tangage ou roulis). La technique de visualisation est potentiellement utilisable pour d’autres problèmes nécessitant un suivi de la surface de contact d’une paroi (ex : profil de surface libre, ballotement dans une cuve). La faisabilité de cette technique pour la phase d’entrée reste à montrer. Les comparaisons entre les simulations numériques et mesures effectuées dans le cas du disque circulaire montrent déjà un accord satisfaisant malgré les incertitudes liées au montage mécanique et le fait que certains phénomènes (viscosité, tension de surface) ne soient pas pris en compte dans les simulations. Les comparaisons entre les simulations numériques et le modèle analytique de Korobkin (dans le cas d’une accélération constante et sans gravité) montrent qu’une meilleur estimation de l’effort hydrodynamique est obtenue avec une valeur du paramètre  $\gamma = 2$  alors qu’une meilleur estimation de la surface de contact est obtenue avec une valeur du paramètre  $\gamma = 1$ . En d’autres termes, le modèle ne semble pas décrire correctement à la fois l’effort et la distribution de pression. Il pourrait être nécessaire de revoir le modèle de pression pour résoudre ce problème.

## Remerciements

Alan Tassin remercie Grégory Germain, Jean-Valéry Facq et Benoit Gaurier d’Ifremer à Boulogne-sur-Mer pour leur aide à la réalisation des essais avec une nappe laser qui ont inspiré les techniques suivantes. Nous remercions par ailleurs Florent Colas et Morgan Tardivel

d'Ifremer Brest pour leurs conseils sur les aspects optiques du dispositif expérimental. Enfin, nous remercions Aboulghit el Malki Alaoui de l'ENSTA Bretagne pour son aide et le prêt d'une caméra rapide.

## Références

- BAARHOLM, R. et FALTINSEN, O. M. (2004). Wave impact underneath horizontal decks. *Journal of Marine Science Technology*, 9:1–13.
- GILLOW, K. (1998). *Codimension-Two Free Boundary Problems*. D.Phil. thesis, St Catherine's College - University of Oxford, UK.
- HALBOUT, S. (2011). *Contribution à l'étude des interactions fluide-structure lors de l'impact hydrodynamique avec vitesse d'avance d'un système de flottabilité d'hélicoptère*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, France.
- KAPLAN, P. (1987). Analysis and prediction of flat bottom slamming impact of advanced marine vehicles in waves. *International Shipbuilding Progress*, 34(391):44–53.
- KOROBKIN, A., KHABAKHPASHEVA, T. et RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, J. (2015). Initial stage of plate lifting from a water surface. *Journal of Engineering Mathematics*, pages 1–14.
- KOROBKIN, A. A. (2013). A linearized model of water exit. *Journal of Fluid Mechanics*, 737:368–386.
- PIRO, D. J. et MAKI, K. J. (2011). Hydroelastic wedge entry and exit. In *11<sup>th</sup> International Conference on Fast Sea Transportation*, 26-29 September 2011, Honolulu, Hawaii, USA.
- PIRO, D. J. et MAKI, K. J. (2013). Hydroelastic analysis of bodies that enter and exit water. *Journal of Fluids and Structures*, 37:134–150.
- SCOLAN, Y., REMY, F. et THIBAUT, B. (2006). Impact of three-dimensional standing waves on a flat horizontal plate. In *21<sup>st</sup> International Workshop on Water Waves and Floating Bodies*, 2-5 April 2006, Loughborough, U.K.
- SUN, H. et HELMERS, J. B. (2015). Slamming loads on a wedge elastically suspended on a marine structure. In *ASME 2015 34<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers.
- TAKAGI, K. (2004). Numerical evaluation of three-dimensional water impact by the displacement potential formulation. *Journal of Engineering Mathematics*, 48:339–352.
- TASSIN, A., PIRO, D. J., KOROBKIN, A. A., MAKI, K. J. et COOKER, M. J. (2013). Two-dimensional water entry and exit of a body whose shape varies in time. *Journal of Fluids and Structures*, 40:317–336.
- TAUBIN, G. (1991). Estimation of planar curves, surfaces, and nonplanar space curves defined by implicit equations with applications to edge and range image segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(11):1115–1138.