

Crédit photo : H. Bonnard / P'

Essais d'impacts hydrodynamiques sur un aileron

Water impact experiments on a hydrofoil

A. Tassin⁽¹⁾, M. Prevosto⁽¹⁾, R. Hascoët⁽²⁾, N. Jacques⁽²⁾

J.-C. Poirier⁽³⁾, S. Seng⁽⁴⁾, Y.-M. Scolan⁽²⁾, J.-J. Maisonneuve⁽³⁾

alan.tassin@ifremer.fr ; marc.prevosto@ifremer.fr ; romain.hascoet@ensta-bretagne.fr

nicolas.jacques@ensta-bretagne.fr ; jean-charles.poirier@sirehna.com

sopheak.seng@bureauveritas.com ; yves-marie.scolan@ensta-bretagne.fr

jean-jacques.maisonneuve@sirehna.com

⁽¹⁾Ifremer, RDT, F-29280 Plouzané, France

⁽²⁾ENSTA Bretagne, UMR CNRS 6027, IRDL, 29806 Brest Cedex 09, France

⁽³⁾SIREHNA, Naval Group, 44340 Bouguenais, France

⁽⁴⁾Bureau Veritas, Research Department, Paris 92937, France

Résumé

Le dimensionnement des appendices de coques tels que les ailerons de sous-marins ou de bâtiments de surface nécessite de bien estimer les chargements hydrodynamiques subis par la structure lors d'impacts hydrodynamiques mais également d'estimer la probabilité d'occurrence de ces événements. Nous présentons ici des résultats d'essais d'impacts hydrodynamiques menés dans le cadre du projet ANR-Astrid APPHY dédié au développement d'une approche probabiliste pour le dimensionnement des appendices de coques vis-à-vis des impacts hydrodynamiques. Nous avons étudié des impacts à vitesse imposée (constante) sur eau calme et des impacts de vagues sur un aileron fixe. Des comparaisons avec des résultats analytiques et numériques sont également présentées.

Summary

The sizing of hull appendages such as submarine or surface ship hydrofoils requires a good prediction of the hydrodynamic loads which may occur during a water impact but also a good prediction of the probability of occurrence of these events. We hereby present the results of a water impact experimental campaign conducted at IFREMER within the ANR-Astrid APPHY project dedicated to the development of a probabilistic approach for the sizing of hull appendages in order to sustain hydrodynamic impact loads. Both imposed motion water impacts on calm water and wave impacts on a fixed hydrofoil were carried out. Comparisons with analytical and numerical results are also presented.

I – Introduction

Les structures en mer (offshore et navales) ou en environnement côtier sont généralement soumises à des sollicitations sévères, liées par exemple au vent, au courant et à la houle. Pouvoir dimensionner de manière adéquate ces structures et garantir leur intégrité sur leur durée de vie nécessite une connaissance fine de ces sollicitations et des réponses structurales qu’elles induisent. Par forte mer, certains éléments de structures marines peuvent être soumis à des impacts de vagues. Il s’agit d’un cas de chargement particulièrement sévère pouvant causer des dommages à la structure, soit par dépassement de la limite élastique du matériau, soit sur le long terme en causant une fatigue de la structure, et donc conduire à un scénario de défaillance. Une difficulté est que l’exposition aux impacts de vagues constitue un processus de nature aléatoire. Durant sa durée de vie, une structure marine peut être soumise à un grand nombre d’impacts, avec des conditions de chargement très variées. Les propriétés stochastiques des conditions de chargement hydrodynamique sont intimement liées à l’état de mer local. Cet état de mer lui-même évolue de manière aléatoire sur une échelle de temps de quelques heures. Le projet APPHY regroupant l’ENSTA Bretagne, IFREMER, SIRHENA et le Bureau Veritas et financé par le programme ANR-ASTRID s’est proposé d’améliorer l’approche de dimensionnement des structures navales, en travaillant d’une part sur la modélisation des efforts instantanés liés aux impacts hydrodynamiques, et d’autre part sur la manière d’exploiter ces chargements pour le dimensionnement des structures, en prenant en compte le caractère stochastique des conditions de mer rencontrées sur la durée de vie de ces structures (voir [2]). Cette démarche a nécessité la mise en oeuvre des modèles suivants :

- un modèle océanographique permettant à partir du profil opérationnel du navire de connaître les états de mer qu’il pourrait rencontrer.
- un modèle de houle et de tenue à la mer permettant de déterminer, pour un état de mer donné, la fréquence d’impact, les données cinématiques associées (vitesse, incidence, accélération...), ainsi que leurs distributions de probabilité (voir [3]).
- un modèle d’impact hydrodynamique permettant de déterminer les chargements agissant sur l’appendice lors d’un impact (évolution temporelle des composantes du torseur des efforts)
- un modèle de structure permettant de calculer la réponse dynamique de la structure induite par un impact et les niveaux de contraintes atteints
- un outil de post-traitement permettant d’estimer les risques de défaillance de la structure (dépassement de la limite élastique, endommagement par fatigue)

Le lien entre ces différents modèles est schématisé à la figure 1 ci-dessous. Le présent article est consacré à la validation expérimentale du modèle d’impact hydrodynamique qui se situe au coeur de l’approche probabiliste et qui permet d’estimer les chargements hydrodynamiques à partir des conditions d’impacts (ex : vitesse, inclinaison relative de l’aileron par rapport aux vagues) précédemment estimées. Cette modélisation est rendue difficile dans le cas d’un aileron, notamment du fait de la séparation de l’écoulement au bord d’attaque et au bord de fuite et de la formation d’une cavité d’air dans le “sillage” de l’aileron. Un modèle analytique d’impact bidimensionnel basé sur la théorie de Wagner et l’approche “Fictitious Body Continuation” (FBC) a été proposé par [4] pour pouvoir estimer les efforts d’impacts rapidement. Des simulations numériques haute fidélité de type CFD ont également été réalisées à l’aide des codes de calcul Star-CCM+ et FOAMStar afin de prendre en compte différents effets plus difficiles à modéliser par une approche analytique (ex : gravité, effets tridimensionnels). La simulation numérique de ces phénomènes reste toutefois délicate et nécessite également d’être validée expérimentalement. C’est dans

ce but que des essais d'impacts hydrodynamiques sur un aileron ont été réalisés dans le bassin d'essais de l'IFREMER à Brest. Nous avons d'une part réalisé des essais d'impact en mouvement imposé sur eau calme et d'autre part réalisé des essais durant lesquels l'aileron immobile était impacté par des vagues. Cela nous a permis de valider les modèles sur des configurations assez simples mais également de valider l'hypothèse sur laquelle se base la modélisation des impacts de vagues qui consiste à considérer qu'un impact de vague est équivalent à un impact sur eau calme dans des conditions équivalentes, c'est à dire avec un angle d'incidence de l'aileron équivalent à l'angle que forment la tangente à la surface libre et la corde de l'aileron au premier instant de l'impact et avec une vitesse d'impact égale à la vitesse relative entre les particules d'eau et l'aileron au premier point d'impact (voir figure 2 ci-dessous).

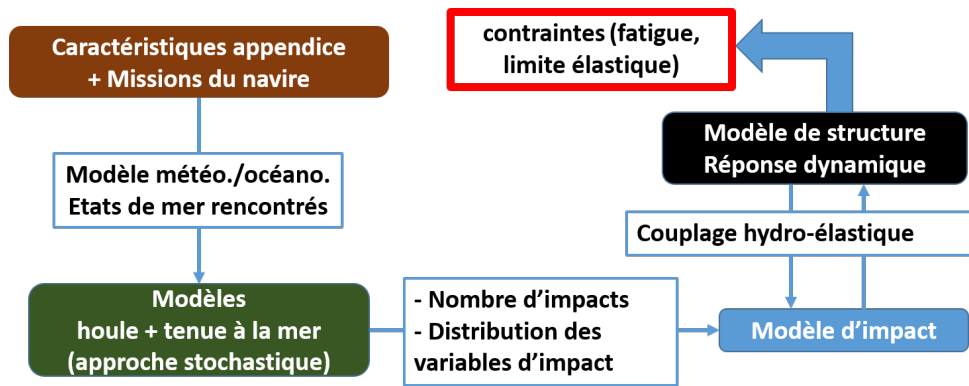


FIGURE 1 – Approche stochastique pour obtenir les chargements hydrodynamiques agissant sur un appendice de coque

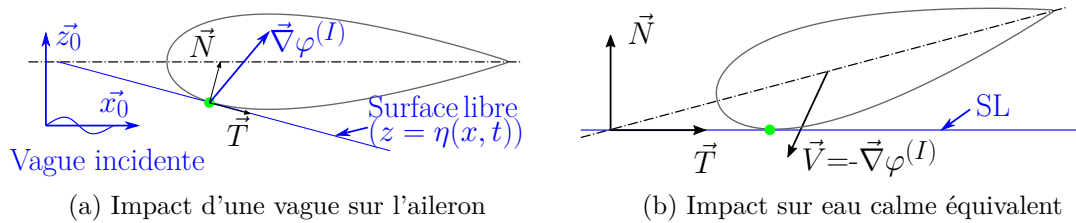


FIGURE 2 – Modélisation d'un impact de vague sur aileron par un impact sur eau calme équivalent. Le champ de vague incident est décrit par le potentiel $\varphi^{(I)}$

II – Dispositif expérimental

Les essais ont été réalisés dans le grand bassin d'essai de l'IFREMER à Brest (longueur=50m, largeur=12.5m, profondeur =9,8m). Une vue photo d'ensemble du dispositif expérimental est présentée à la figure 3 ci-dessous. L'aileron était maintenu en position et mis en mouvement à l'aide d'un hexapode Mistral 800 par l'intermédiaire d'un mât en acier. Les efforts étaient mesurés à l'aide d'une balance d'effort piezo-électrique 6 composantes (Kistler 9306A31) située entre l'aileron et la pièce d'interface fixée en tête de mât. Trois sondes à houle alignées dans la direction de propagation des vagues étaient situées au droit de l'aileron. Deux spots éclairaient un côté du mur afin de visualiser la surface mouillée à l'aide d'une caméra rapide située du côté du mur opposé (voir figure

4 ci-dessous). La balance d'effort mesurait les composantes normale (F_z) et tangentielle (F_x) de l'effort d'impact sur l'aileron comme indiqué à la figure 5 ci-dessous. La forme de l'aileron se basait sur un profil NACA0028 d'une corde $c=15\text{cm}$ et d'une envergure de $L=44\text{cm}$.

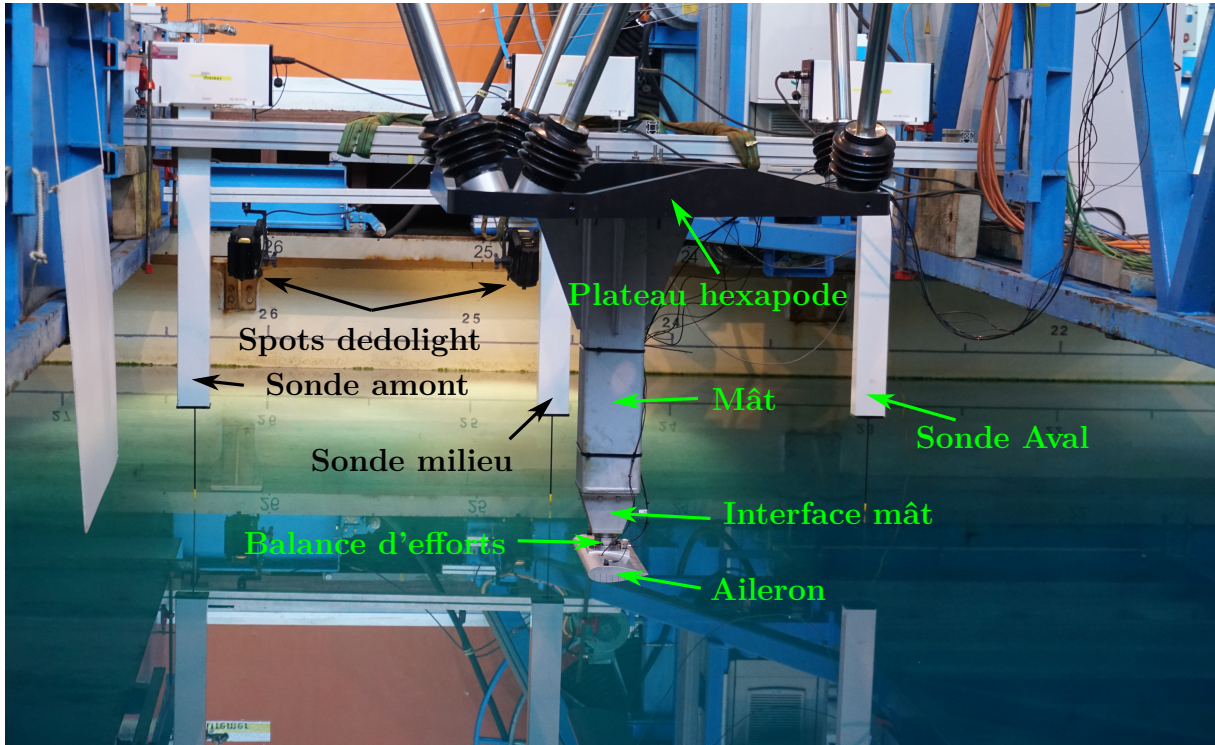


FIGURE 3 – Vue de côté du dispositif expérimental

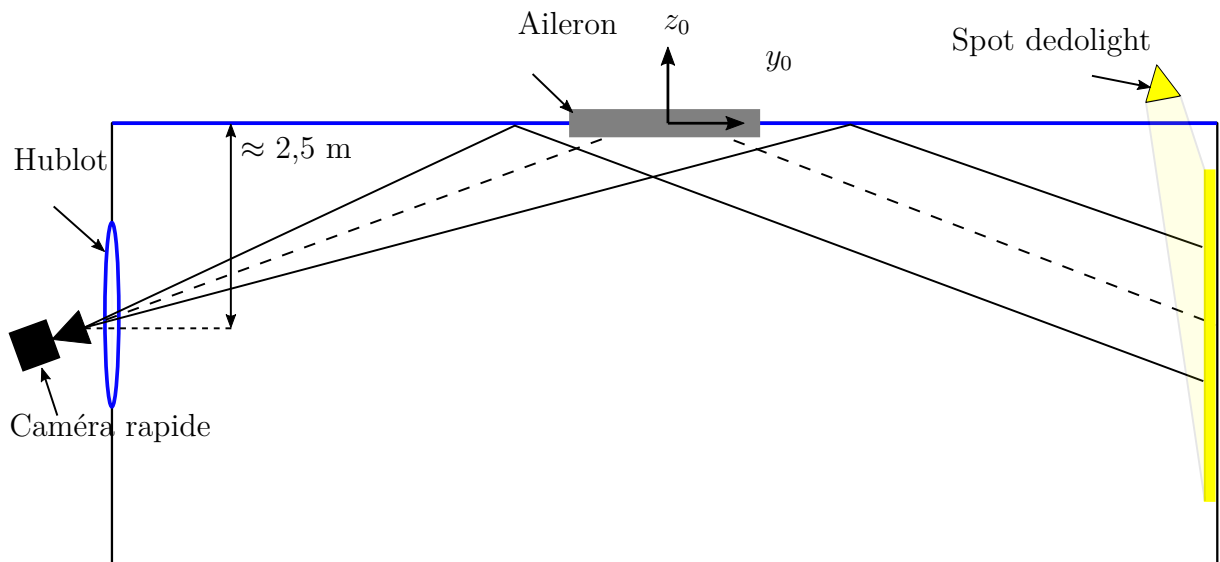


FIGURE 4 – Visualisation sous-marine de la surface mouillée à l'aide d'une caméra rapide

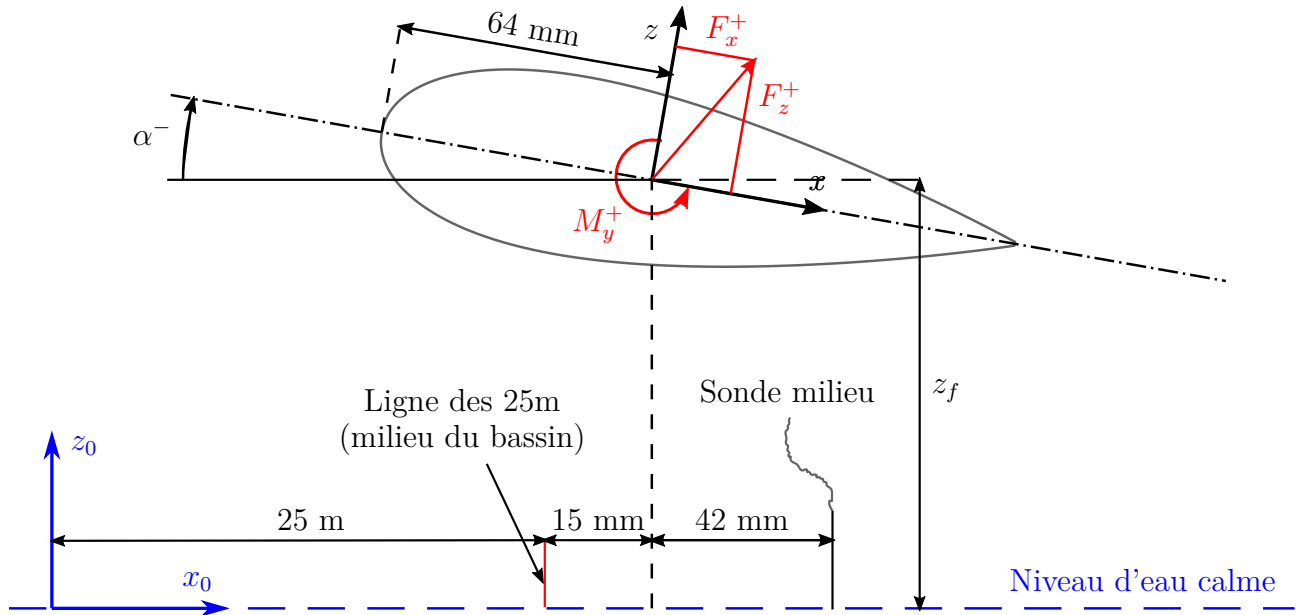


FIGURE 5 – Position de la maquette durant les essais (vue de côté : générateur de vagues à gauche et plage d’amortissement à droite)

III – Résultats

Nous présentons dans ce paragraphe une sélection de résultats issus de la base de donnée expérimentale

III – 1 Mise en évidence du phénomène de séparation

Un exemple de mesure de l’effort vertical durant un essai à $V = 0.6m/s$ et avec l’aileron horizontal est présenté à la figure 6 ci-dessous. En plus de la mesure brute, nous avons également tracé le signal filtré à l’aide d’un filtre de Fourier passe-bas doté d’une fréquence de coupure de 300 Hz. L’instant $t = 0s$ correspond à l’instant où un des signaux de pression franchit un seuil de 11.3 mBar. Les résultats expérimentaux sont également comparés au modèle analytique 2D de [4] (noté MLM). On peut observer sur les courbes d’effort une montée “quasi-instantanée” de l’effort d’impact du fait que l’aileron soit une forme à simple courbure et qu’il impacte l’eau à “plat” (sans angle de gîte). On peut ensuite observer une première inflexion de la courbe d’effort qui résulte du décollement de l’écoulement au niveau du bord d’attaque (la surface mouillée n’augmente plus dans cette direction) puis une rupture dans la courbe d’effort au moment où la séparation atteint le bord de fuite. A partir de ce moment, la surface mouillée n’augmente plus, l’effort d’impact chute brusquement puis remonte lentement sous l’effet de la pression hydrostatique. Ces événements sont clairement visibles sur la courbe correspondant aux résultats analytiques et se retrouvent également sur les courbes de résultats expérimentaux, bien que celles-ci soient perturbées par des vibrations de la maquette. Les prises de vues sous-marines ont pu confirmer que ces événements correspondaient bien à l’apparition de la séparation au bord de fuite et au bord d’attaque qui se manifestent par l’apparition d’une ligne plus claire sur les images sous-marines, comme illustré à la figure 7 ci-dessous.

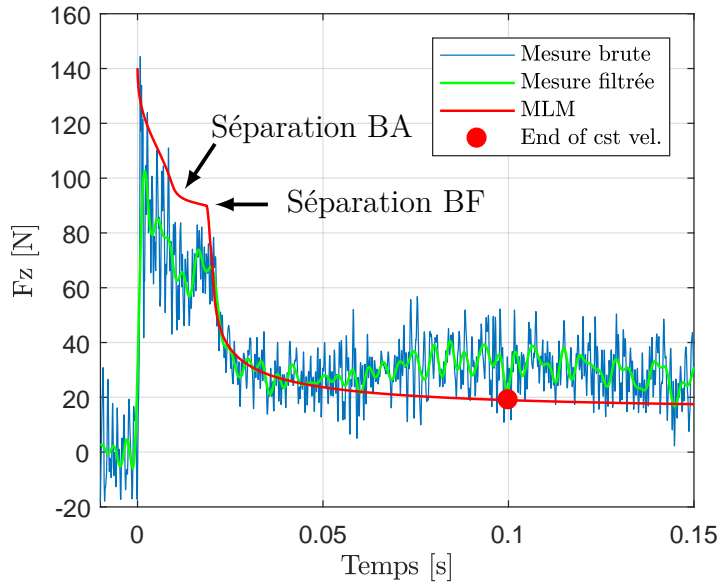


FIGURE 6 – Effort hydrodynamique (F_z) mesuré lors d'un impact à $V_z=0.6$ m/s et $\alpha=0^\circ$. Comparaison avec les résultats issus du modèle MLM 2D de [4]. Le point rouge indique la fin de la phase où la vitesse de l'aileron est constante. Après cela, l'effort est affecté par la décélération de l'aileron. Cet effet de décélération n'est pas pris en compte dans le modèle MLM.

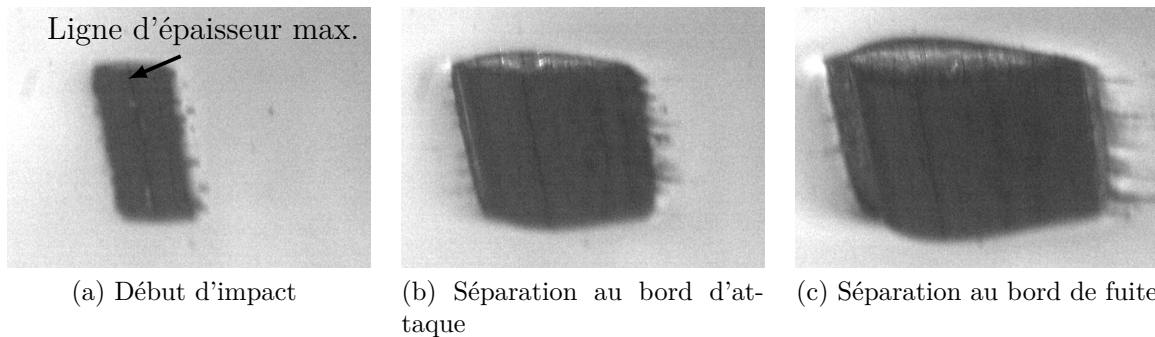


FIGURE 7 – Visualisation de la surface mouillée durant un impact vertical à vitesse imposée et assiette nulle. Le bord d'attaque se situe à gauche de l'image et le bord de fuite à droite de l'image ($\alpha = 0^\circ$)

III – 2 Impacts sur eau calme à vitesse verticale imposée

Dans ce paragraphe nous présentons les résultats issus des mesures d’effort en termes de coefficient adimensionnel de slamming, C_s , défini comme $C_s = F_z/(\rho cLV_z^2)$. L’utilisation de ce coefficient permet de mettre en évidence l’effet relatif de la gravité par rapport à l’effort d’impact aux différentes vitesses d’impact. Une comparaison des résultats expérimentaux obtenus pour deux vitesses d’impact (0,4 m/s et 0,6 m/s) est présentée à la figure 8. Ces résultats mettent en évidence une remontée plus importante de l’effort après la séparation au bord de fuite sous l’effet de la pression hydrostatique alors que l’effet de la gravité semble négligeable avant la séparation. Les résultats d’essais sont comparés aux résultats issus du modèle analytique (noté MLM) précédemment cité ainsi qu’à une variante de ce modèle notée “MLM- ρgz ” qui correspond au modèle MLM auquel le terme de pression hydrostatique “- ρgz ” a été ajouté. Bien que ces résultats restent assez éloignés des résultats expérimentaux du fait que le modèle néglige les effets tridimensionaux présents dans les essais, cela met en évidence l’effet important de la gravité dans les essais. Des résultats issus de simulations numériques bidimensionnelles de type Volumes Finis obtenus par les logiciels Star-CCM+ (voir [5]) et FOAMStar (voir [6]) sont également présentés sur cette figure. Ces résultats numériques sont assez proches des résultats analytiques durant la phase d’impact (avant séparation) puis s’en écartent ensuite, probablement du fait de la prise en compte approximative de l’effet de la gravité dans le modèle analytique. A noter que les résultats numériques 2D sont en bon accord entre eux sur toute la durée de l’impact considérée. Les résultats issus des simulations tridimensionnelles à l’aide du logiciel FOAMStar montrent une réduction importante des efforts d’impacts du fait de la tridimensionnalité de l’écoulement et se rapprochent très nettement des résultats expérimentaux. Une comparaison des efforts mesurés et estimés théoriquement pour des impacts verticaux avec l’aileron incliné de 5° vers l’avant (resp. vers l’arrière) est présentée à la figure 9 (resp. 10) ci-dessous. Les simulations numériques 3D sont globalement en accord avec les résultats expérimentaux, bien que celles-ci semblent légèrement surestimer l’effort d’impact.

III – 3 Impacts de vagues régulières sur aileron fixe

Lors des essais d’impacts de vagues régulières (unidirectionnelles), l’aileron était descendu à l’aide de l’hexapode entre deux vagues après le régime transitoire afin d’éviter que des impacts antérieurs indésirés ne perturbent la surface libre. Après le premier impact, l’aileron était maintenu en position. L’évolution de l’effort mesuré lors des 6 premiers impacts de vagues lors d’un essai d’impacts de vagues régulières de hauteur 54 cm et de période 2.25s avec l’aileron situé à une hauteur $z_f = 79\text{mm}$ en position horizontale est présentée à la figure 11 ci-dessous. On peut ainsi voir comment les perturbations de la surface mouillée induites par les premiers impacts perturbent les impacts suivants. En effet, seule la courbe d’effort correspondant au premier impact (notée Vague 1) présente un pic d’effort important en début d’impact. Dans le cas des impacts de vagues régulières, l’instant $t=0\text{s}$ correspond au franchissement d’un certain niveau par la sonde à houle milieu. Les efforts mesurés sur la “vague 1” pour différentes valeurs de l’altitude de l’aileron sont présentés à la figure 12 ci-dessous. On peut remarquer que l’altitude de l’aileron ne semble que peu influencer les efforts d’impact.

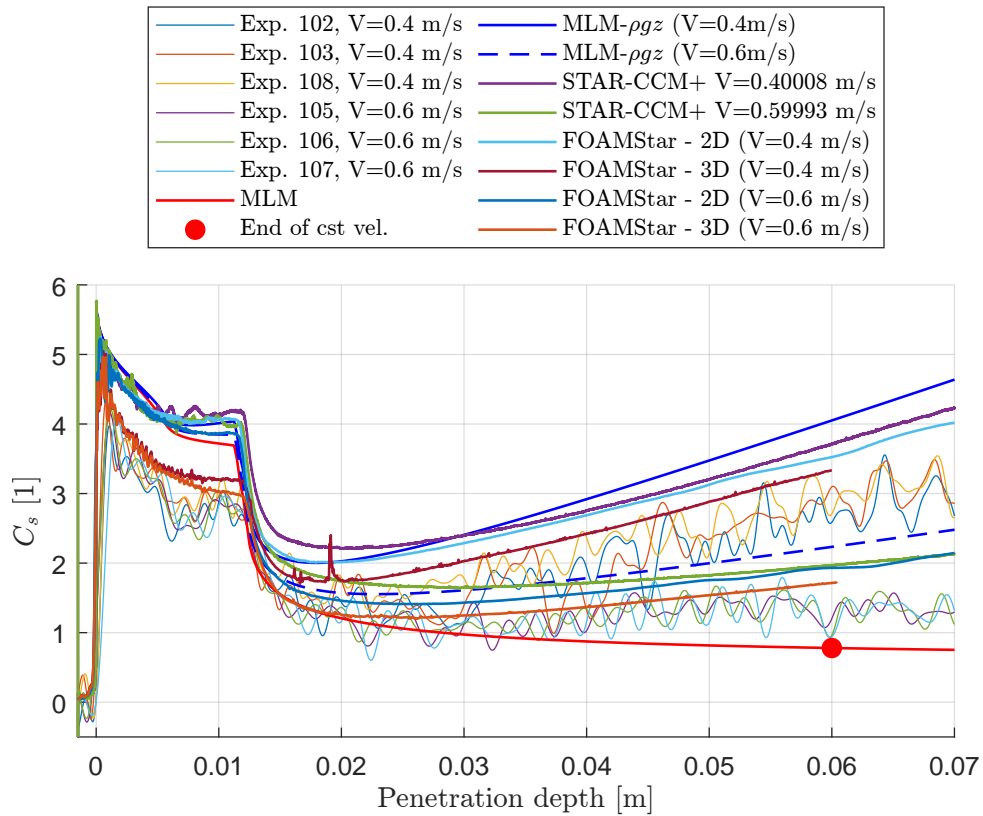


FIGURE 8 – Coefficient de slamming adimensionnel ($C_s = F_z/(\rho cLV_z^2)$) mesuré pour $\alpha=0^\circ$ (aileron horizontal). Le point rouge indique la fin de la phase où la vitesse de l'aileron est constante. Après cela, l'effort est affecté par la décélération de l'aileron. Cet effet de décélération n'est pas pris en compte dans le modèle MLM et les simulations numériques.

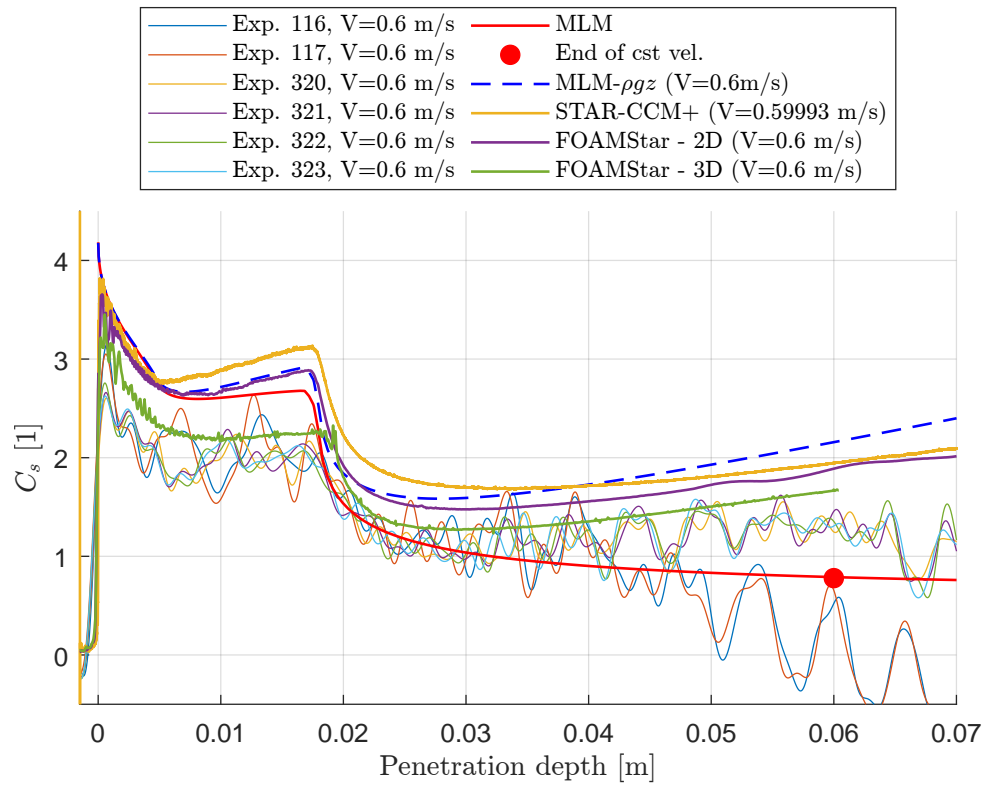


FIGURE 9 – Coefficient de slamming adimensionnel ($C_s = F_z/(\rho cLV_z^2)$) mesuré pour $\alpha=5^\circ$ (aileron incliné vers l'avant)

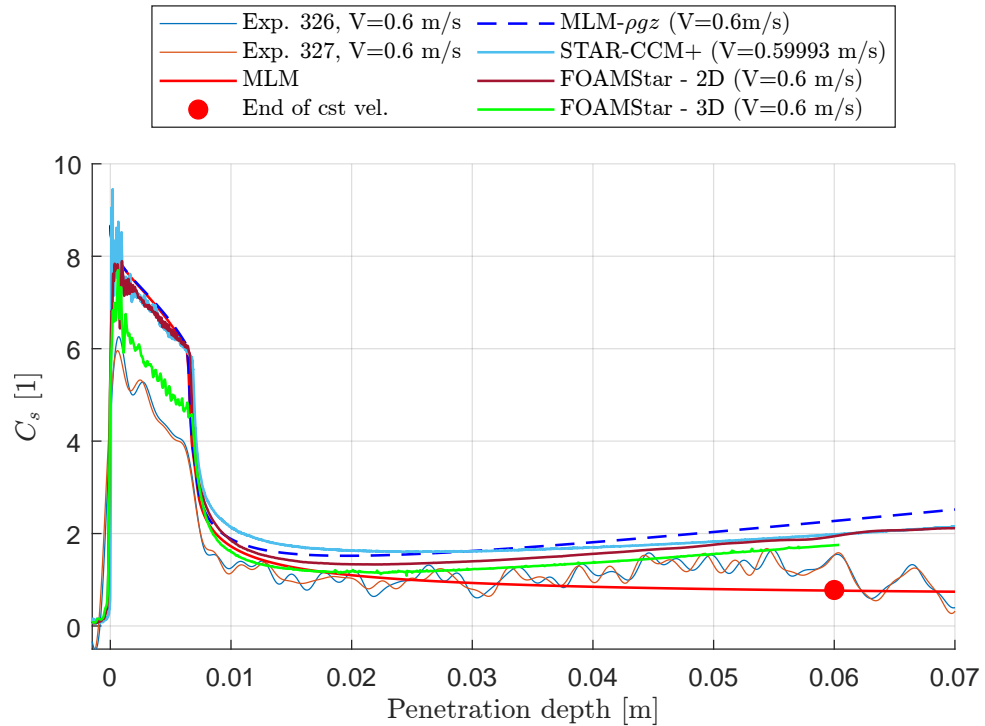


FIGURE 10 – Coefficient de slamming adimensionnel ($C_s = F_z/(\rho cLV_z^2)$) mesuré pour $\alpha=-5^\circ$

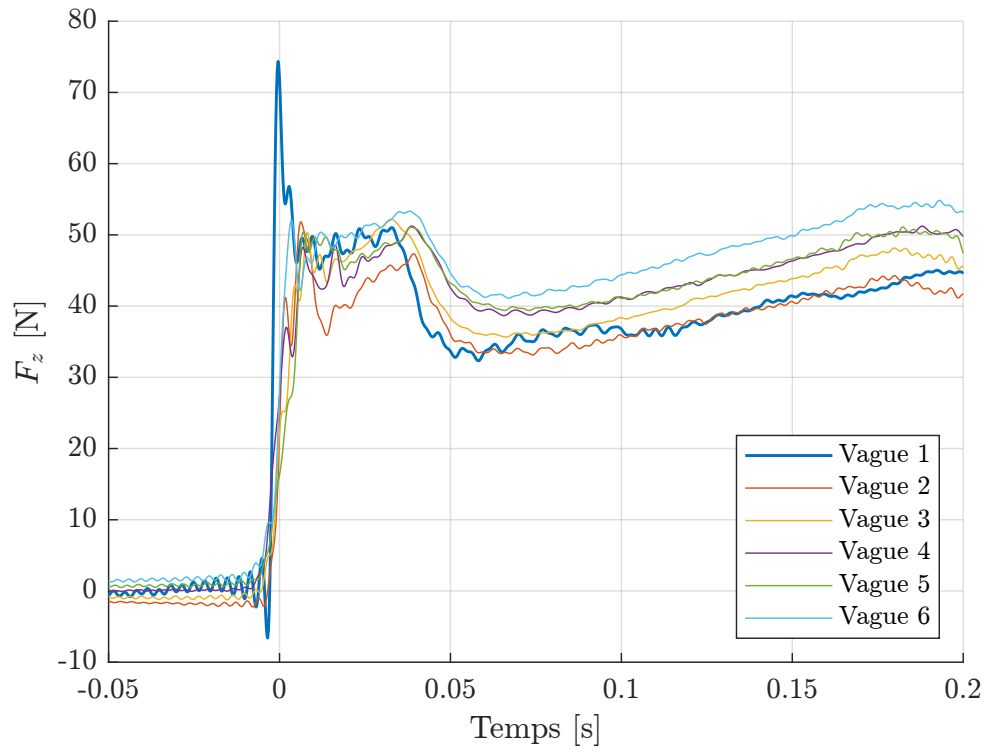


FIGURE 11 – Efforts mesurés durant les 6 premiers impacts de vagues régulières ($H=54$ cm, $T=2.25$ s) pour $\alpha=0^\circ$ et $z_f=79$ mm - Essai n°341

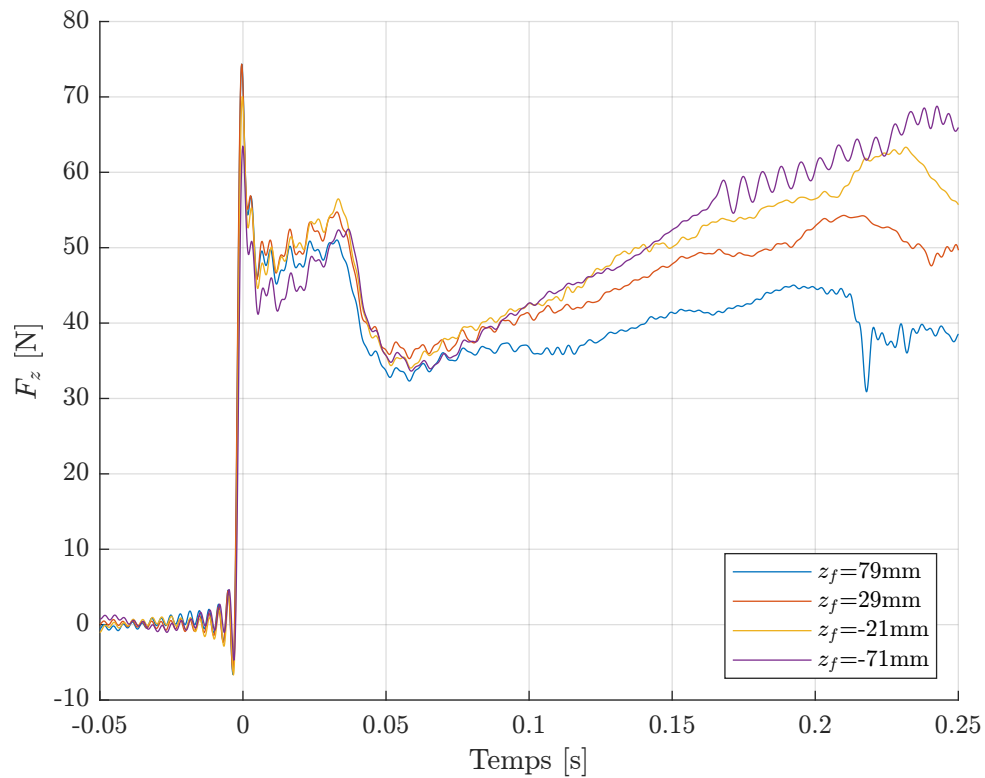


FIGURE 12 – Efforts d'impacts mesurés lors d'impacts de vagues régulières ($H=54$ cm, $T=2.25$ s) pour $\alpha=0^\circ$ et différentes valeurs d'altitude (z_f)

III – 4 Impact sur eau calme équivalent à un impact de vague

Nous présentons ici des mesures d'impacts de vagues dont les paramètres ont été choisis de sorte que les conditions d'impacts (théoriques) soient proches des conditions de certains impacts verticaux présentés précédemment (voir tableau 1 ci-dessous). On s'est pour cela appuyé sur le modèle non-linéaire de vagues régulières proposé par [1] qui permet d'estimer le profil, le champ de vitesse et le champ d'accélération de vagues régulières. Une comparaison des résultats obtenus pour deux conditions de vagues différentes est présentée aux figures 13 et 14. On constate que les mesures issues d'impacts de vagues et d'impacts sur eau calme dans des conditions équivalentes sont très proches. A noter que les résultats divergent en fin d'essai du fait que l'aileron commence à ralentir à partir d'une profondeur de 60mm durant les impacts sur eau calme.

N° Vague	H [cm]	T [s]	α [°]	z_f [mm]
Vague 1	44,6	1,95	-6	-61
Vague 2	38,4	2,9	0	-21

(a) Conditions d'impact de vagues sur un aileron fixe

N° Vague	V_z [m/s]	α [°]
Vague 1	0,6	5
Vague 2	0,4	5

(b) Conditions équivalentes d'impact sur eau calme

TABLE 1 – Conditions d'impact de vagues et conditions équivalentes d'impact sur eau calme

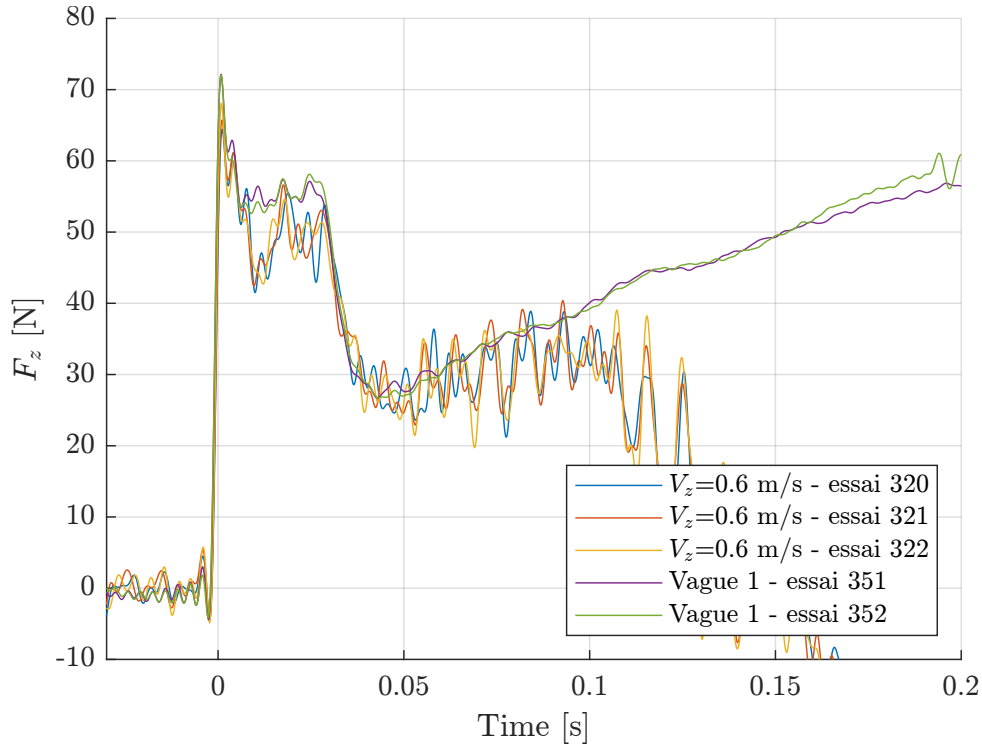


FIGURE 13 – Comparaison entre l'effort mesuré durant l'impact de la vague 1 et un impact sur eau calme équivalent

IV – Conclusions et perspectives

Les essais d'impacts hydrodynamiques présentés ont permis d'acquérir des données de validation pour les modèles analytiques d'impacts hydrodynamiques et les logiciels de si-

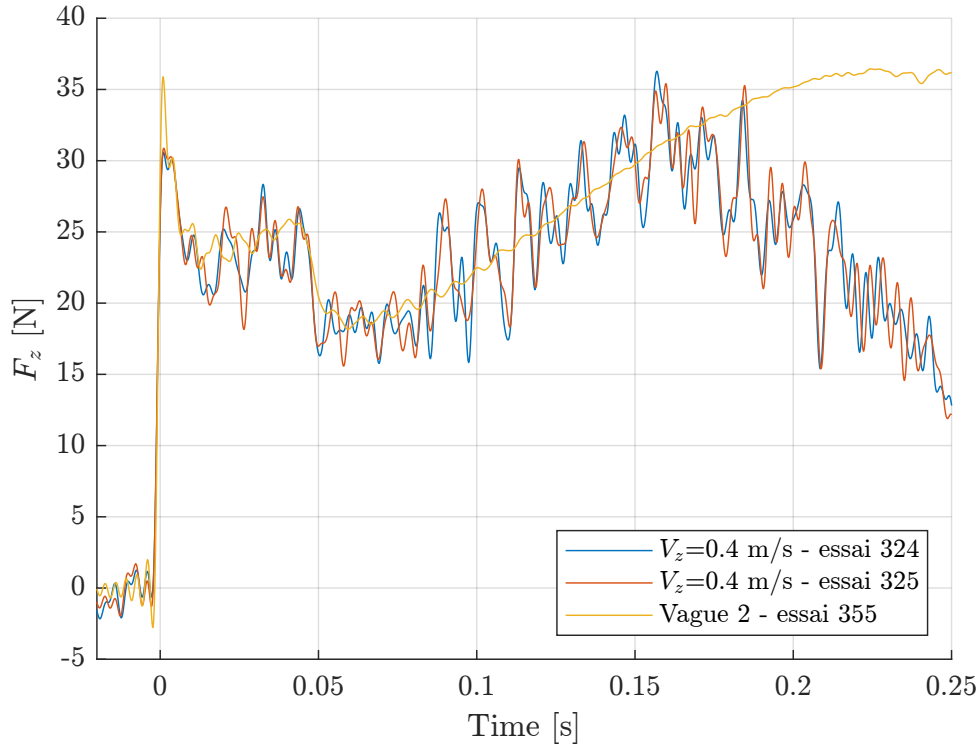


FIGURE 14 – Comparaison entre l’effort mesuré durant l’impact de la vague 2 et un impact sur eau calme équivalent

mulation numérique. Les essais d’impacts sur eau calme ont permis de fournir un nombre important de cas de validation pour des entrées d’eau avec séparation au bord d’attaque et au bord de fuite. L’effet de la gravité et de la tridimensionnalité de l’écoulement ont clairement été mis en évidence. Les essais sur vagues régulières ont notamment permis d’étudier l’influence de l’altitude sur les efforts d’impact. Des essais d’impacts de vagues dont les conditions initiales d’impact étaient proches de celles de certains impacts sur eau calme ont permis de valider l’hypothèse de modélisation d’un impact de vague comme un impact sur eau calme avec des conditions relatives d’impacts équivalentes.

L’exploitation des essais d’impacts sur vagues régulières est basée sur des mesures ponctuelles à l’aide de sondes à houle situées à proximité de l’aileron. Ce type d’analyse ne peut s’appliquer, au mieux, qu’à des vagues régulières lorsque l’on souhaite comparer les mesures à des résultats de simulation numérique. Afin d’estimer plus précisément les conditions d’impact, notamment la pente de la surface libre au point d’impact, il paraît nécessaire de développer de nouvelles techniques de mesures permettant de mesurer la forme de la surface libre précisément. Des développements sont actuellement en cours à l’IFREMER dans le but de mettre au point une technique de mesure haute résolution de champs de vagues par stéréovidéo. La prise en compte de la vitesse d’avance et des effets tridimensionnels du champ de vague sont également des perspectives intéressantes de travail.

Remerciements

This work was supported by the French National Agency for Research (ANR) and the French Government Defense Procurement and Technology Agency (DGA) [ANR-17-ASTR-0026 APPHY].

Références

- [1] D. Clamond and D. Dutykh. Accurate fast computation of steady two-dimensional surface gravity waves in arbitrary depth. *Journal of Fluid Mechanics*, 844 :491–518, 2018.
- [2] R. Hascoët, M. Prevosto, N. Raillard, N. Jacques, and A. Tassin. Stochastic prediction of wave impact kinematics and loads for ship appendages. In *17^{èmes} Journées de l’Hydrodynamique*, 24-26 Novembre, Cherbourg-en-Cotentin, France, 2020.
- [3] R. Hascoët, N. Raillard, and N. Jacques. Effect of forward speed on the level-crossing distribution of kinematic variables in multidirectional ocean waves. *Ocean Engineering*, 235 :109345, 2021.
- [4] R. Hascoët, N. Jacques, Y.-M. Scolan, and A. Tassin. A two-dimensional analytical model of vertical water entry for asymmetric bodies with flow separation. *Applied Ocean Research*, 92, Nov. 2019.
- [5] J.-J. Maisonneuve and J.-C. Poirier. Projet ASTRID APPHY - Rapport d’étude ETR170238_R001-A. Technical report, SIREHNA, 2021.
- [6] S. Seng, J. de Lauzon, and S. Malenica. CFD Simulations of calm-water impact loads on a NACA0028 hydrofoil. Technical report, Bureau Veritas, 2021.