



**HAL**  
open science

## Simulation numérique de forces de succion lors d'impacts hydrodynamiques par une méthode de couplage Euler Lagrange

Mathieu Goron, Bertrand Langrand, Nicolas Jacques, Thomas Fourest, Alain  
Tassin

► **To cite this version:**

Mathieu Goron, Bertrand Langrand, Nicolas Jacques, Thomas Fourest, Alain Tassin. Simulation numérique de forces de succion lors d'impacts hydrodynamiques par une méthode de couplage Euler Lagrange. 25e Congrès Français de Mécanique (CFM 2022), Aug 2022, Nantes, France. hal-03837705

**HAL Id: hal-03837705**

**<https://hal.science/hal-03837705v1>**

Submitted on 3 Nov 2022

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

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

# Simulation numérique de forces de succion lors d'impacts hydrodynamiques par une méthode de couplage Euler Lagrange

M. GORON<sup>a,c</sup>, B. LANGRAND<sup>a,b</sup>, T. FOUREST<sup>a</sup>, N. JACQUES<sup>c</sup>, A.  
TASSIN<sup>d</sup>

a. DMAS, ONERA, F-59014 Lille, France

mathieu.goron@onera.fr

bertrand.langrand@onera.fr

thomas.fourest@onera.fr

b. Université Polytechnique Hauts-de-France, LAMIH, UMR CNRS 8201, F-59313 Valenciennes,  
France

c. ENSTA Bretagne, UMR CNRS 6027, IRDL, France

nicolas.jacques@ensta-bretagne.fr

d. IFREMER, RDT, F-29280 Plouzané, France

alan.tassin@ifremer.fr

## Résumé :

*Lors d'un amerrissage d'avion, la structure est fortement sollicitée et les chargements subis peuvent mener à sa rupture, partielle ou totale. Les structures sont donc dimensionnées afin de minimiser ces risques et celui de blessures des occupants. Les progrès récents des capacités de calcul ont conduit à une utilisation accrue des simulations numériques dans le processus de certification des avions. De nouveaux défis liés à ces pratiques sont alors apparus. Par exemple, la modélisation des forces de succion qui apparaissent à l'arrière de l'avion lors d'un amerrissage, où le premier contact avec l'eau se produit. Ce phénomène est dû à la vitesse horizontale élevée de la structure au moment de l'impact et à la courbure longitudinale du fuselage. Les forces de succion peuvent affecter la cinématique globale de l'avion pendant l'amerrissage. Dans cet article, il est question d'évaluer les capacités d'une méthode numérique à modéliser des forces de succion. L'objectif à plus long termes est d'améliorer les simulations numériques d'impacts hydrodynamiques se déroulant dans des conditions représentatives d'un amerrissage d'avion. Pour ce faire, le cas simple de l'entrée-sortie d'eau d'un dièdre est considéré. Le modèle numérique repose sur une formulation Eulérienne pour le fluide et une formulation Lagrangienne pour la structure. La méthode utilisée pour gérer l'interaction fluide-structure est basée sur une interface de contact immergée avec des forces de pénalité. Cette étude se concentre sur la modélisation des forces d'impact et de succion. Les résultats montrent une capacité satisfaisante de cette méthode numérique à modéliser une force hydrodynamique négative (succion).*

## Abstract :

*During the emergency landing of an aircraft on water, the structure may experience large loads and could eventually fail. The appropriate design of the structure should minimize the risk of occupant injuries. The recent progress in computation capabilities has led to the increased use of numerical simulations in the certification process of aircrafts. A specific challenge concerns the modelling of suction forces that develop near the aircraft tail, where the first contact with water occurs. This phenomenon is due to the high horizontal velocity of the structure at impact and the longitudinal curvature of the fuselage. It can affect the overall aircraft motion during ditching. The simple test case of the wedge water entry and subsequent exit is considered in this work. This work is incorporated within the framework of improving aircraft ditching simulations and assessing the capabilities of numerical models to describe suction forces. Numerical simulations with Eulerian formulation for the fluid and Lagrangian formulation for the structure are used. The method used for the fluid-structure interaction is based on an immersed contact interface with penalty forces. The present work focuses on impact and suction forces modelling. Results show a satisfying capacity of the numerical approach to model negative hydrodynamic force (suction).*

**Mots clefs : Éléments finis, interaction fluide-structure, couplage Euler Lagrange, impact hydrodynamique, entrée-sortie, force hydrodynamique, suction**

## 1 Introduction

Un impact hydrodynamique correspond à l'entrée en contact d'une structure avec un liquide. L'étude de ce phénomène est motivée par diverses applications industrielles telles que le tossage de carènes de navires, l'amerrissage de capsules spatiales, d'avions ou d'hélicoptères. Les chargements engendrés par ces impacts hydrodynamiques peuvent être critiques et sont pris en compte lors du dimensionnement et de la certification des structures qui y sont exposées.

Les phénomènes physiques rencontrés lors d'impacts hydrodynamiques sont bien connus pour des conditions d'impact "idéales" : impact vertical, géométrie simple, structure rigide, fluide initialement au repos, vitesse d'impact suffisamment grande pour négliger la gravité, etc. Des approches analytiques, principalement basées sur les théories de von Karman [1] ou de Wagner [2], ont été développées pour modéliser ce type de chargements. Il existe de nombreux articles traitant des problématiques d'impacts hydrodynamiques de géométries simples, autant expérimentalement (dièdres [3]-[5], cylindres [6, 7], cônes [8], plaques planes [9], sphères [10]) que numériquement [11]-[14]. Les avancées récentes en matière de simulations numériques ont progressivement permis l'étude de phénomènes plus complexes (prise en compte de certaines non-linéarités liées à l'interaction fluide-structure, géométries complexes, etc.), représentatifs d'applications industrielles réalistes. La méthode des Éléments Finis (EF), basée sur une approche Lagrangienne, est généralement utilisée pour modéliser la structure. Le comportement du fluide peut être décrit par différentes méthodes : Lagrangienne [15], Eulérienne [16, 17], Arbitraire Lagrangienne-Eulérienne (ALE) [18], ou des méthodes sans maillage telles que *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) [16].

Les phénomènes physiques rencontrés dans des contextes industriels réalistes sont plus complexes. Par exemple, lors d'impacts obliques à haute vitesse, des phénomènes de succion, de cavitation, de ventilation, d'aération ou de séparation des flux peuvent apparaître. Ces phénomènes hydrodynamiques peuvent

mettre en défaut les approches analytiques et numériques existantes. Tant que ces difficultés subsisteront, l'application de ces approches dans un contexte de dimensionnement ou de certification restera limitée.

Dans cette étude, le solveur EF explicite Radioss est utilisé. Un couplage Euler-Lagrange (CEL) est considéré pour modéliser les problèmes d'impacts hydrodynamiques. D'une part, la structure est décrite par une approche Lagrangienne. D'autre part, le comportement des fluides est décrit par une approche Eulérienne. Un couplage fort (*two-ways*) entre les modèles fluides et structurels est utilisé car leur interdépendance est importante [19, 20].

Les objectifs de cette étude sont d'évaluer (i) la capacité de cette méthode numérique à modéliser un impact hydrodynamique, (ii) la sensibilité de la méthode aux paramètres numériques et (iii) la capacité de la méthode à modéliser certains phénomènes hydrodynamiques apparaissant dans des contextes industriels, à savoir la succion. Pour ce faire, un cas test simple est considéré. Il s'agit de l'impact vertical à haute vitesse d'un dièdre, basé sur les essais présentés dans [5]. Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux en termes de force hydrodynamique et de mesures locales de pression.

Cet article est organisé comme décrit ci-après. La Section 2 décrit brièvement la méthode numérique. Dans la Section 3, les effets des paramètres numériques de la méthode sur les mesures de force hydrodynamique sont discutés et les résultats numériques et expérimentaux sont comparés. La Section 4 présente le cas de l'entrée-sortie d'eau d'un dièdre. La capacité de la méthode numérique à modéliser la succion est ainsi discutée. Enfin, les conclusions de cette étude et les orientations pour de futures recherches sont introduites dans la Section 5.

## 2 Méthode numérique

Cette section présente la méthode numérique utilisée pour la modélisation de l'impact vertical et de l'entrée-sortie d'un dièdre avec le solveur EF explicite Radioss.

### 2.1 Modélisation de la structure

Les dimensions du dièdre sont résumées dans le Tableau 1 et correspondent à celles utilisées dans [5]. Le dièdre est modélisé par deux plans discrétisés avec des éléments finis de coque à 4 nœuds. Il est défini comme un corps rigide car expérimentalement la structure est considérée comme étant indéformable.

TABLE 1 – Dimensions du dièdre.

Longueur L (mm)	Largeur B (mm)	Angle de relèvement $\beta$ ( $^\circ$ )
495	320	20

### 2.2 Modélisation des fluides

Le domaine fluide est de forme parallélépipédique rectangulaire et matérialise l'eau et l'air autour de la structure. Le domaine fluide est discrétisé en utilisant des éléments finis continus 3D à 8 nœuds avec un point d'intégration. Une formulation Eulérienne est utilisée pour la résolution des équations du problème fluide. La taille des éléments fluides est plus petite près de la structure (dans la zone d'impact) pour augmenter la précision du calcul. Les dimensions du modèle fluide sont données dans la Figure 1.

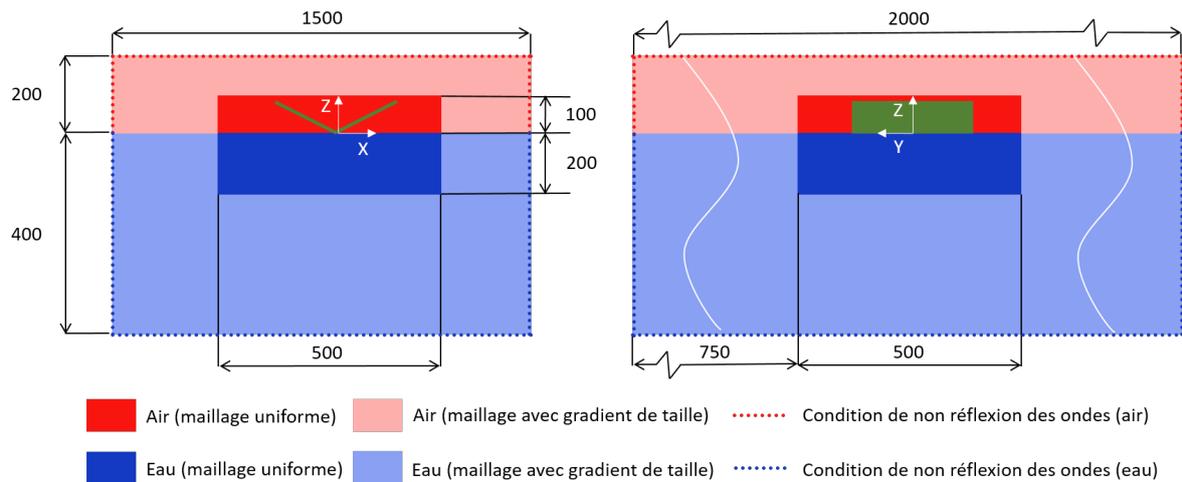


FIGURE 1 – Dimensions du modèle fluide (en mm). En dehors de la zone d'impact la taille des éléments fluides évolue de manière linéaire selon un facteur 1,2. Le dièdre est représenté en vert.

## 2.3 Interaction fluide-structure

La méthode de modélisation de l'interaction fluide-structure s'appuie sur des éléments structurels Lagrangiens (maîtres), immergés dans la grille Eulérienne fluide (nœuds esclaves). La structure et les fluides sont maillés indépendamment et superposés. Les forces de couplage sont calculées par une méthode de pénalité, en fonction de la hauteur de contact  $h_c$  et de la raideur de contact  $k_c$ . Les valeurs conseillées par la documentation Radioss pour ces paramètres sont décrites dans les Équations (1) et (2).

$$h_{c0} = 1,5 \times l_f \quad (1)$$

$$k_{c0} = \frac{\rho V^2 S_{el}}{h_c} \quad (2)$$

où  $l_f$  est la taille des éléments fluides en contact avec la structure,  $\rho$  la densité de l'eau,  $V$  la vitesse maximale de la structure et  $S_{el}$  la surface moyenne des éléments structurels.

## 2.4 Conditions initiales et limites

La position initiale de la pointe du dièdre, par rapport à la hauteur initiale de la surface libre, est  $h_0 = 10$  mm (Figure 2). L'accélération de la gravité est appliquée à tous les nœuds du modèle :  $\vec{g} = -9.81 \cdot 10^{-3} \vec{z}$  g/ms<sup>2</sup>. La pression hydrostatique est initialisée au premier pas de temps du calcul.

La vitesse verticale imposée à la structure est constante et égale à  $V = 10$  m/s pour les simulations présentées dans la Section 3 et variable pour les simulations présentées dans la Section 4. Afin d'initialiser correctement le problème la vitesse verticale du dièdre est aussi initialisée en tant que vitesse initiale ( $V_0 = V = 10$  m/s). Des conditions aux limites absorbantes basées sur la formulation présentée dans [21] sont appliquées aux frontières des domaines de fluide.

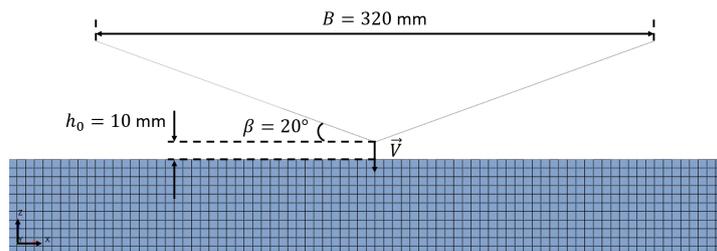


FIGURE 2 – Position initiale du dièdre au dessus du niveau de l'eau.

### 3 Impact vertical à vitesse constante d'un dièdre

Des essais d'impacts verticaux à haute vitesse d'un dièdre ont été menés dans un réservoir d'eau à l'aide d'une machine d'impact hydraulique, comme décrit dans [5]. Plus de détails à propos du protocole expérimental peuvent être trouvés dans [22]. Les parois du réservoir sont en acier, il mesure 2 m de large, 3 m de long et contient une hauteur d'eau de 1,2 m lors des essais. Des jauges extensométriques sont utilisées pour mesurer la force hydrodynamique appliquée au dièdre au cours de l'impact. Ces jauges sont fixées sur le piston de la machine auquel est attaché le dièdre. Des capteurs de pression sont utilisés pour mesurer la pression à différents endroits de la surface du dièdre. Les résultats expérimentaux sont présentés Figure 3 sous forme de coefficients de force hydrodynamique et de pression (grandeurs adimensionnelles). L'expression de ces coefficients est donnée par les Équations (3) et (4).

$$C_f = \frac{2F}{\rho_0 V^2 S} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{2(P - P_0)}{\rho_0 V^2} \quad (4)$$

où  $F$  est la force hydrodynamique,  $P$  la pression,  $P_0$  la pression atmosphérique,  $V$  la vitesse du dièdre et  $S = L \times B$  la surface du dièdre projetée sur le plan  $xOy$  ( $L$  et  $B$  sont respectivement la longueur et la largeur du dièdre).

#### 3.1 Etude de sensibilité aux paramètres numériques

Dans cette section, l'effet de différents paramètres numériques influençant les résultats des simulations est présenté. Il est question de l'effet de la raideur de contact et de l'effet de la taille des éléments fluides dans la zone d'impact. Les conclusions de ces études de sensibilité sont ensuite appliquées au modèle numérique, conduisant ainsi aux résultats présentés dans la Section 3.2.

##### 3.1.1 Raideur de contact

Pour des éléments fluides de 5 mm de côté, la raideur de contact par défaut pour ce cas est  $k_{c0} = 37,46$  (voir Équation (2)). Les résultats numériques obtenus pour l'impact vertical d'un dièdre pour différents  $k_c$  sont présentés dans la Figure 4. Les autres valeurs de raideur de contact considérées ici sont  $k_c = 0,5 \times k_{c0} = 18,73$ ,  $k_c = 1,5 \times k_{c0} = 56,19$  et  $k_c = 5 \times k_{c0} = 187,3$ .

L'influence de la raideur de contact est faible compte tenu des variations étudiées (facteur 10 entre la plus petite et la plus grande raideur). La valeur maximale du coefficient de force reste aux alentours de  $C_{f \max} \simeq 5,9$  et les tendances restent similaires pour les différentes raideurs de contact étudiées. Pour

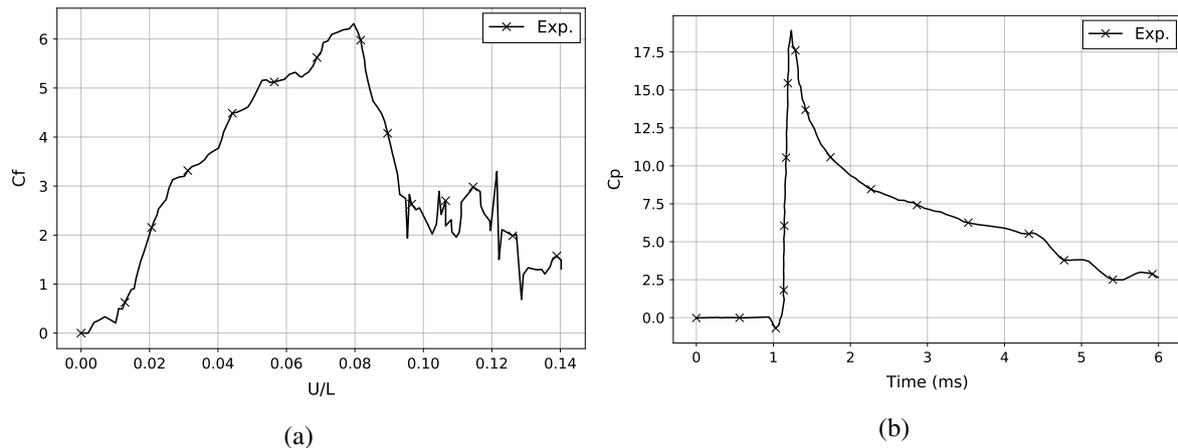


FIGURE 3 – Résultats expérimentaux pour l'impact vertical d'un dièdre à  $V = 10$  m/s. (a) Évolution du coefficient de force hydrodynamique en fonction du déplacement vertical adimensionnel  $U/L$ , avec  $U$  le déplacement vertical du dièdre et  $L$  la longueur du dièdre. (b) Évolution du coefficient de pression en fonction du temps. Le capteur est situé dans le plan de symétrie ( $xOz$ ) du dièdre et à 17 mm de son arête (selon  $\vec{z}$ ). Données tirées de [5].

une plus faible raideur de contact (courbe noire), la réponse du modèle numérique s'écarte des autres résultats aux premiers instants du calcul et la force hydrodynamique diminue plus lentement après le pic de force. Des oscillations de hautes fréquences apparaissent dans la réponse en force du modèle lorsque la raideur du contact augmente. L'amplitude de ces oscillations augmente également avec la valeur de  $k_c$  (Figure 4a). Les mesures locales de pression sont peu affectées par la raideur de contact. Cependant, l'amplitude du pic de pression augmente légèrement avec  $k_c$  (Figure 4b).

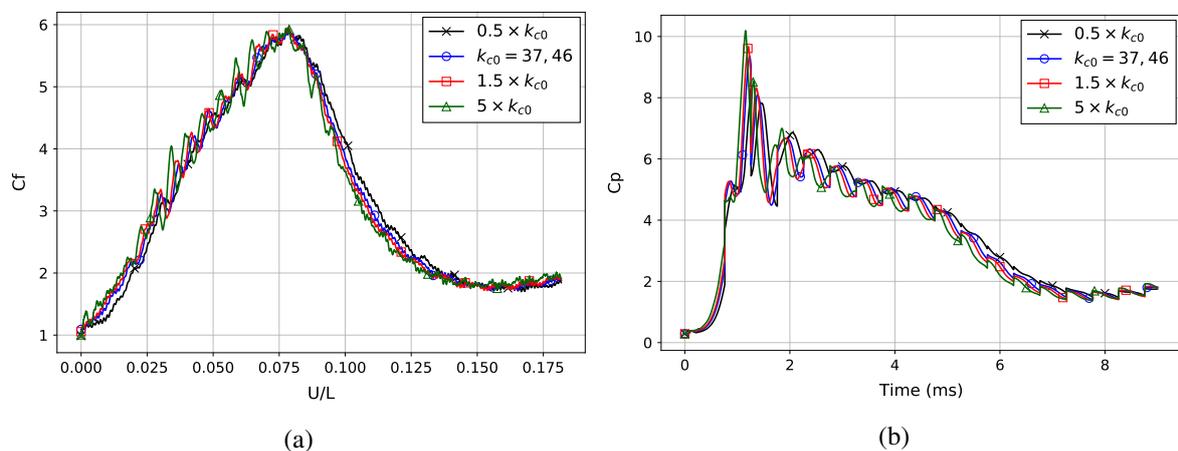


FIGURE 4 – Résultats numériques pour l'impact vertical d'un dièdre à  $V = 10$  m/s pour différentes raideurs de contact. (a) Évolution du coefficient de force hydrodynamique en fonction du déplacement vertical adimensionnel  $U/L$ , avec  $U$  le déplacement vertical du dièdre et  $L$  la longueur du dièdre. (b) Évolution du coefficient de pression en fonction du temps.

### 3.1.2 Taille des éléments fluides

Un domaine fluide numérique avec deux plans de symétrie ( $xOz$  et  $yOz$ ) est utilisé pour évaluer l'influence de la taille des éléments fluides sur les résultats numériques. Les différentes tailles d'éléments  $l_f$  étudiées ici varient de 5 à 2 mm. Les caractéristiques des différents modèles sont synthétisées dans le

Tableau 2.

TABLE 2 – Impact vertical d’un dièdre à  $V = 10$  m/s. Caractéristiques du maillage utilisé pour évaluer l’influence de la taille des éléments fluides  $l_f$  sur les résultats numériques.

$l_f$ (mm)	Nombre total d’éléments fluides	Temps de restitution du calcul (JJ-hh :mm :ss)
5	378 736	01 :11 :02
4	673 171	02 :43 :07
3	1 399 505	11 :38 :31
2,5	2 202 052	22 :33 :42
2	3 941 772	7-09 :44 :14

Une diminution de la taille des éléments dans la zone d’impact entraîne une diminution de l’épaisseur de la zone de contact (voir Équation (1)). Par conséquent, cela entraîne une augmentation plus lente du coefficient de force au début de l’impact. Avec des éléments plus petits, l’amplitude du pic de force est plus importante et sa décroissance est légèrement plus rapide (Figure 5a). Plus le maillage est fin, plus l’augmentation de la pression est rapide et plus l’amplitude du pic de pression est élevée (Figure 5b). Les résultats numériques convergent globalement à partir d’une taille d’éléments égale à  $l_f = 2,5$  mm. Cependant, le coût de calcul associé à un maillage plus fin est beaucoup plus élevé.

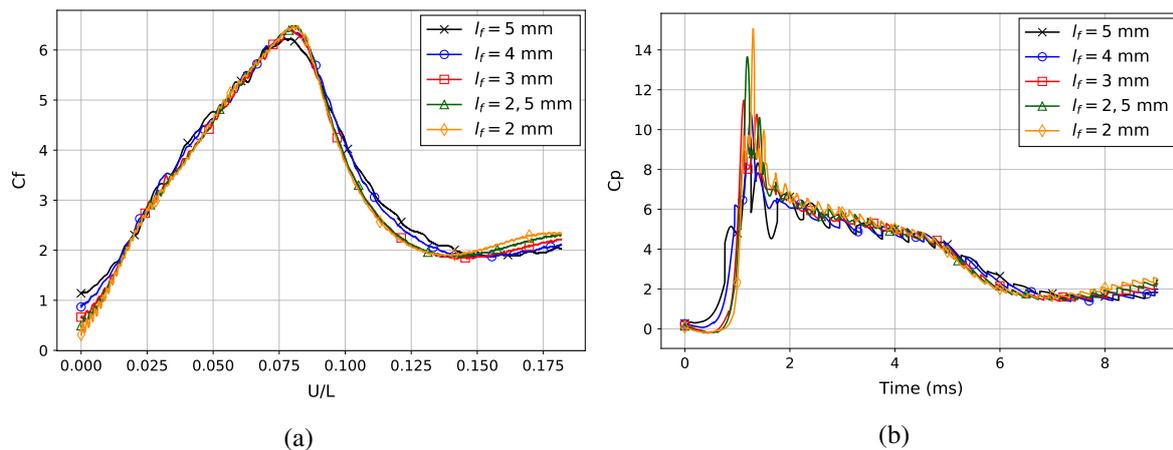


FIGURE 5 – Résultats numériques pour l’impact vertical d’un dièdre à  $V = 10$  m/s pour différentes taille d’éléments :  $l_f = [2; 2,5; 3; 4; 5]$  mm. (a) Évolution du coefficient de force hydrodynamique en fonction du déplacement vertical adimensionnel  $U/L$ , avec  $U$  le déplacement vertical du dièdre et  $L$  la longueur du dièdre. (b) Évolution du coefficient de pression en fonction du temps.

### 3.2 Comparaison avec les résultats expérimentaux

Les résultats numériques obtenus pour  $l_f = 2,5$  mm et  $k_c = 74,91$  sont comparés aux résultats expérimentaux de [5] à la Figure 6 en termes de coefficient de force et de coefficient de pression.

Les résultats numériques (force hydrodynamique et pression) sont en accord avec les mesures expérimentales. Les valeurs maximales des coefficients de force mesurées numériquement et expérimentalement sont similaires (différence inférieure à 1%). Cependant, aux premiers instants de la simulation, le modèle numérique surestime le niveau de la force hydrodynamique. Cette différence entre les résultats numériques et expérimentaux peut être expliquée par la méthode numérique utilisée pour gérer l’interaction fluide-structure. En effet, des forces de contact apparaissent dès lors qu’un nœud fluide se trouve à

une distance inférieure ou égale à la hauteur de contact  $h_c$  de la structure. Les résultats aux premiers instants de la simulation sont donc liés à la détection de nœuds fluides dans cette zone (épaisseur de contact de la structure), avant que le contact physique entre le dièdre et l'eau n'ait lieu. Le modèle numérique sous-estime la diminution du coefficient de force après le pic de force.

L'augmentation de la pression se produit plus tôt dans la simulation numérique que lors des essais. De même, le modèle numérique sous-estime le pic du coefficient de pression et le niveau général de la pression. Ces divergences s'expliquent par la méthode utilisée numériquement pour mesurer la pression. Numériquement, la pression est mesurée à une distance normale de la surface du dièdre légèrement supérieure à la hauteur de contact ( $dist = \frac{4}{3}h_{c0}$ ), comme illustré sur la Figure 8. Expérimentalement, la sonde de pression est située sur la surface du dièdre. Le pic de pression est un phénomène localisé dans l'espace et dans le temps. La pression n'étant pas mesurée exactement au même endroit dans le modèle numérique et lors des essais, il semble donc cohérent que le modèle numérique ne parvienne pas à capturer ce phénomène.

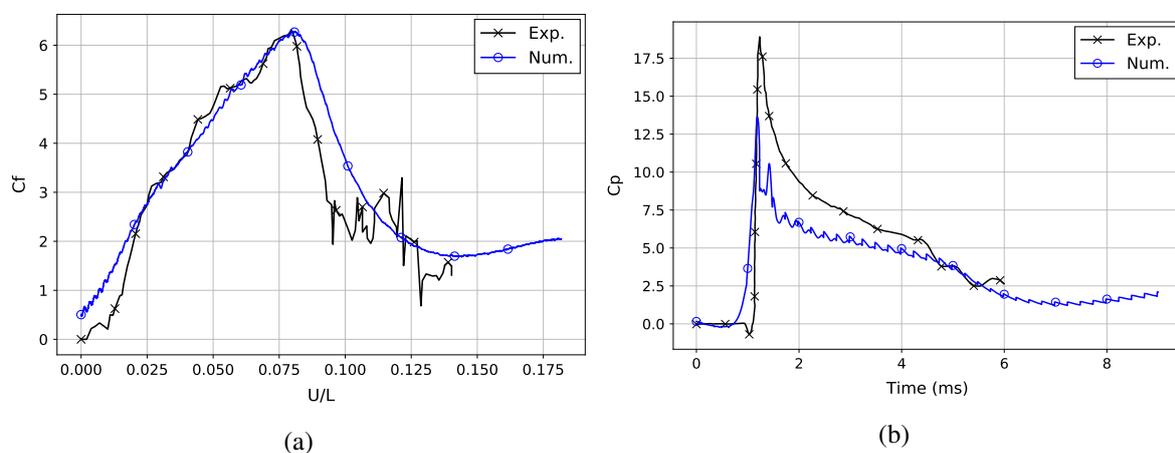


FIGURE 6 – Comparaison des résultats expérimentaux [5] et numériques pour l'impact vertical d'un dièdre à  $V = 10$  m/s. (a) Évolution du coefficient de force hydrodynamique en fonction du déplacement vertical adimensionnel  $U/L$ , avec  $U$  le déplacement vertical du dièdre et  $L$  la longueur du dièdre. (b) Évolution du coefficient de pression en fonction du temps.

## 4 Entrée-sortie d'eau d'un dièdre

Dans cette section, la méthode numérique présentée précédemment est appliquée à l'entrée-sortie d'eau d'un dièdre. Le modèle numérique est similaire à celui considéré dans la Section 3.2. La vitesse verticale prescrite au dièdre est à présent définie par l'Équation (5), suivant la méthode utilisée par [23]. Cette méthode permet d'étudier expérimentalement la succion, générée par le mouvement d'entrée-sortie de l'eau de la structure, pour des vitesses d'impact inférieures à celles rencontrées au cours d'un amerrissage.

$$V = V_{max} \cos(\omega t + \Phi) \quad (5)$$

où  $V_{max}$  est la vitesse maximale du dièdre,  $\omega$  la pulsation,  $t$  le temps et  $\Phi$  la phase définie pour assurer une variation de  $V$  de  $-V_{max}$  à  $V_{max}$  pendant la simulation (la vitesse est initialement dirigée vers le bas). Pour cette simulation, les valeurs suivantes des paramètres ont été adoptées :  $V_{max} = 10$  m/s,  $\omega = \frac{\pi}{T}$ ,  $T = 15$  ms et  $\Phi = \pi$ .

Les résultats numériques en termes de force hydrodynamique et de pression relative ( $P_r = P - P_0$ ) sont présentés respectivement dans les Figures 7a et 7b. La force hydrodynamique augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale (pic de force positif). Ensuite, la force diminue et devient négative (force de succion) lorsque le dièdre décélère. La force atteint une valeur minimale à la transition entre les phases d'entrée et de sortie, c'est-à-dire lorsque la profondeur de pénétration atteint son maximum et que la vitesse du dièdre est nulle. Ensuite, la force diminue progressivement jusqu'à atteindre 0 N. A noter que l'amplitude du pic de force négatif est plus de 3 fois supérieure à celle du pic de force positif.

Un pic de pression est mesuré aux premiers instants de la simulation lorsque l'eau atteint la jauge. L'emplacement de la jauge est illustré sur la Figure 8. Ensuite, la pression diminue au fur et à mesure que la profondeur de pénétration du dièdre augmente et que sa vitesse diminue. Vers  $t = 3,5$  ms, la pression relative devient négative, indiquant l'apparition de forces de succion, et se stabilise autour de  $P_r \simeq -0,9$  MPa. À partir de  $t = 10$  ms, la pression relative augmente progressivement pour atteindre  $P_r = 0$  MPa (la pression atmosphérique). L'augmentation de la pression correspond à l'ouverture de la cavité formée sous le dièdre lors de l'impact (ventilation), comme illustré sur la Figure 8.

Le modèle numérique permet donc de mesurer une force négative et une pression relative négative subies par le dièdre à la transition entre les phases d'entrée et de sortie d'eau. La formation d'une cavité sous le dièdre est également observée au cours de la simulation, à la transition entre les phases d'entrée et de sortie d'eau.

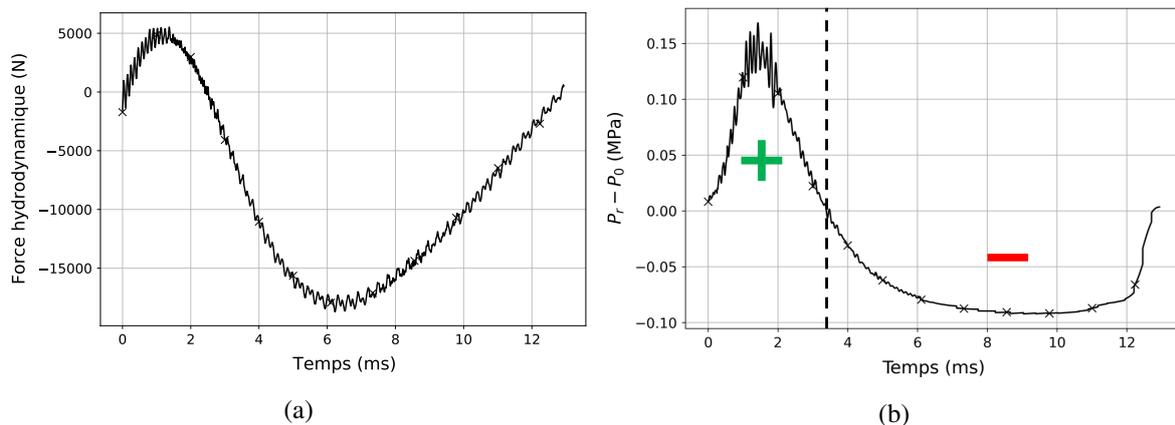


FIGURE 7 – Résultats numériques pour l'entrée-sortie d'un dièdre pour  $V_{max} = 10$  m/s. (a) Évolution de la force hydrodynamique en fonction du temps. (b) Évolution de la pression relative ( $P_r = P - P_0$ ) en fonction du temps, avec  $P_0 \simeq 0.1$  MPa. La localisation de la jauge de pression est montrée sur la Figure 8. La ligne pointillée verticale sépare les phases où la pression relative est positive et négative.

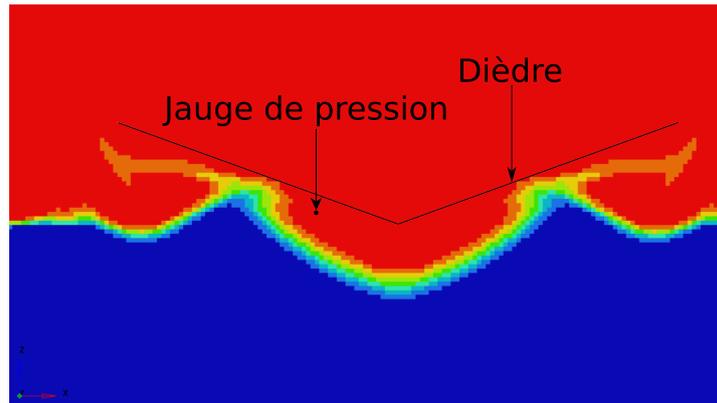


FIGURE 8 – Vue en coupe de la simulation numérique de l'entrée-sortie d'un dièdre avec  $V_{max} = 10$  m/s. La figure montre la fraction du volume d'air dans le domaine fluide à  $t = 11$  ms. La couleur rouge indique une fraction volumique de 1 et la couleur bleu une fraction volumique de 0. L'ouverture de la cavité formée sous le dièdre est visible (ventilation).

## 5 Conclusions et discussions

Dans cet article, des simulations numériques d'impacts hydrodynamiques d'un dièdre ont été réalisées, introduisant notamment des forces de succion. L'étude a été menée en utilisant un solveur EF explicite (Radioss), une méthode CEL et un contact par pénalité.

Les résultats numériques ont été comparés à des résultats expérimentaux existants pour le cas d'un impact hydrodynamique vertical. Un assez bon accord a été observé. Cette étude a permis d'identifier les paramètres numériques les plus influents par rapport aux résultats des simulations. Premièrement, la variation de la raideur de contact a peu d'influence sur les mesures numériques de la force hydrodynamique et de la pression. La valeur par défaut a donc été jugée pertinente pour les cas considérés dans cette étude. Deuxièmement, pour les tailles d'éléments fluides considérées, des éléments plus petits conduisent à des résultats numériques plus précis, mais à des temps de calcul beaucoup plus élevés. La taille des éléments influence également la raideur de contact. Il s'agit donc de paramètres clés lors de la modélisation d'impacts hydrodynamiques à l'aide de la méthode numérique présentée ici.

Le modèle a également montré une bonne capacité à modéliser une force hydrodynamique négative (succion) et une pression relative négative. L'amplitude plus élevée du pic de force négative, observé pour le cas traité, justifie davantage l'intérêt d'étudier le phénomène de succion lors d'impacts hydrodynamiques dans des contextes représentatifs d'applications industrielles réalistes. Cependant, le modèle numérique utilisé pour modéliser les forces de succion nécessite d'être validé. Pour ce faire, les résultats numériques doivent être confrontés à des résultats expérimentaux. Par conséquent, de futurs travaux seront consacrés à la simulation de cas expérimentaux impliquant des forces de succion.

## Remerciements

Les auteurs remercient l'ONERA et l'IFREMER pour le co-financement de ce projet.

## Références

- [1] T. von Karman The Impact on Seaplane Floats during Landing, Technical Note : NACA-TN-321, NACA, Aerodynamical Institute of the Technical High School, Aachen, Oct. 1929.

- [2] H. Wagner, Phenomena Associated with Impacts and Sliding on Liquid Surfaces, Tech. Rep., Translation of Über Stoß und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten. *Z. Angew. Math. Mech.* 12, pp. 193-215 (in German), 1932.
- [3] M. Greenhow, Wedge entry into initially calm water, *Applied Ocean Research*, vol. 9, pp. 214–223, Oct. 1987.
- [4] S. Russo, M. Jalalisendi, G. Falcucci and M. Porfiri, Experimental characterization of oblique and asymmetric water entry, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 92, pp. 141–161, Apr. 2018.
- [5] Y. Richard, Etudes numériques et expérimentales des impacts hydrodynamiques primaires et secondaires lors du tossage de sections de carènes, Thèse de doctorat, ENSTA Bretagne, 2021.
- [6] R. Cointe and J.-L. Armand, Hydrodynamic Impact Analysis of a Cylinder, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 109, pp. 237–243, Aug. 1987.
- [7] I.M.C. Campbell and P. Weynberg, Measurement of Parameters Affecting Slamming, Wolfson Unit for Marine Technology and Industrial Aerodynamics, Univ. of Southampton, Report, vol. No.440, 1980.
- [8] J.L. Baldwin, Vertical Water Entry of Cones, Tech. rep., Naval ordnance lab white oak MD, Feb. 1971.
- [9] T. Mai, D. Greaves and A. Raby, Aeration Effects on Impact : Drop Test of a Flat Plate, The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference, p. 7, Busan, Korea, 2014.
- [10] J.L. Baldwin and H.K. Steves, Vertical Water Entry of Spheres, Tech. Rep., Naval surface weapons center white oak lab silver spring MD, May 1975.
- [11] H. Ribet, P. Laborde and M. Mahé, Numerical modeling of the impact on water of a flexible structure by explicit finite element method - Comparisons with Radioss numerical results and experiments, *Aerospace Science and Technology*, vol. 3, pp. 83-91, Feb. 1999.
- [12] N. Jacques, A. Constantinescu, S. Kerampran and A. Nême, Comparaison de différentes approches pour la simulation numérique d'impacts hydrodynamiques, *European Journal of Computational Mechanics*, vol. 19, pp. 743–770, Jan. 2010.
- [13] M. Anghileri, L.-M.L. Castelletti, E. Francesconi, A. Milanese and M. Pittofrati, Survey of numerical approaches to analyse the behavior of a composite skin panel during a water impact, *International Journal of Impact Engineering*, vol. 63, pp. 43–51, Jan. 2014.
- [14] D.J. Piro and K.J. Maki, Hydroelastic analysis of bodies that enter and exit water, *Journal of Fluids and Structures*, vol. 37, pp. 134–150, Feb. 2013.
- [15] N. Pentecôte and A. Vigliotti, Crashworthiness of helicopters on water : Test and simulation of a full-scale WG30 impacting on water, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 8, pp. 559–572, Jan. 2003.
- [16] M.H. SiemannM and B. Langrand, Coupled fluid-structure computational methods for aircraft ditching simulations : Comparison of ALE-FE and SPH-FE approaches, *Computers & Structures*, vol. 188, pp. 95–108, Aug. 2017.
- [17] D. Delsart, B. Langrand and A. Vagnot, Evaluation of a Euler/Lagrange coupling method for the ditching simulation of helicopter structures, 5th International Conference on Fluid Structure Interaction, vol. 105, (Royal Mare Village, Crete, Greece), May 2009.

- 
- [18] R. Ortiz, G. Portemont, J. Charles and J. Sobry, Assessment of Explicit FE Capabilities for Full Scale Coupled Fluid/Structure Aircraft Ditching Simulations, 23Rd Int. Congress of the Aeronautical Sciences, Jan. 2002.
- [19] M.Souli and J.-F. Sigrist, Interaction fluide-structure : Modélisation et simulation numérique, vol. 19. Hermès - Lavoisier, Jan. 2010.
- [20] F. Casadei, N. Leconte and M. Larcher, Strong and weak forms of a fully non-conforming FSI algorithm in fast transient dynamics for blast loading of structures, in EU Science Hub – European Commission, (Corfu, Greece), p. 20, Nov. 2011.
- [21] A. Bayliss and E. Turkel, Out flow Boundary Conditions for Fluid Dynamics, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, vol. 3, Jul. 1982.
- [22] A. El Malki Alaoui, A. Nême, A. Tassin and N. Jacques, Experimental study of coefficients during vertical water entry of axisymmetric rigid shapes at constant speeds, in Applied Ocean Research, vol. 37, pp 183-197, Aug. 2012.
- [23] T. Breton, A. Tassin and N. Jacques, Experimental investigation of the water entry and/or exit of axisymmetric bodies, Journal of Fluid Mechanics, vol. 901, Oct. 2020. Publisher : Cambridge University Press.