

Essais et simulations numériques par éléments finis d'impacts hydrodynamiques tridimensionnels

Différents moyens ont été mis en oeuvre afin d'obtenir des données pouvant servir à valider le modèle qui a été présenté dans les deux chapitres précédents :

- Des mesures expérimentales d'efforts hydrodynamiques agissant lors de l'impact de solides 3D ont été réalisées et sont présentées dans le paragraphe 4.1.
- Des simulations numériques par éléments finis ont été conduites avec le code commercial ABAQUS/Explicit (paragraphe 4.2).

4.1 Essais d'impacts hydrodynamiques

Ce paragraphe présente succinctement le dispositif et protocole expérimental, les maquettes étudiées et quelques aspects sur la répétabilité des essais.

4.1.1 Moyen d'essai

Ces essais ont été réalisés à l'aide de la machine de choc de l'ENSIETA. Celle-ci permet d'effectuer des essais d'impact sur eau et sur structure. On peut voir sur la figure 4.1 les différents éléments constitutifs du dispositif d'essai. Lors des essais d'impact sur eau, le bassin, visible en arrière plan, est placé sous la machine et est rempli d'eau. Pour avoir une idée de la taille du dispositif, nous noterons que les dimensions du bassin sont *longueur* \times *largeur* \times *hauteur* = 3 m \times 2 m \times 2 m. La maquette d'essai est fixée au bout du piston à l'aide d'une pièce intermédiaire appelée araignée. L'instrumentation utilisée lors des essais est montrée par la figure 4.2 :

- Des jauges extensométriques sont collées sur le piston et servent à mesurer l'effort appliqué.
- Un accéléromètre est fixé sur la maquette et permet de déterminer les variations de vitesse durant l'essai.

- Un dispositif électrique (non visible sur la photo) mesure la résistance électrique entre la maquette et une plaque de cuivre placée au fond du bassin. Cela permet de détecter le moment de premier contact entre la maquette et l'eau, car à cet instant la résistance mesurée chute subitement.

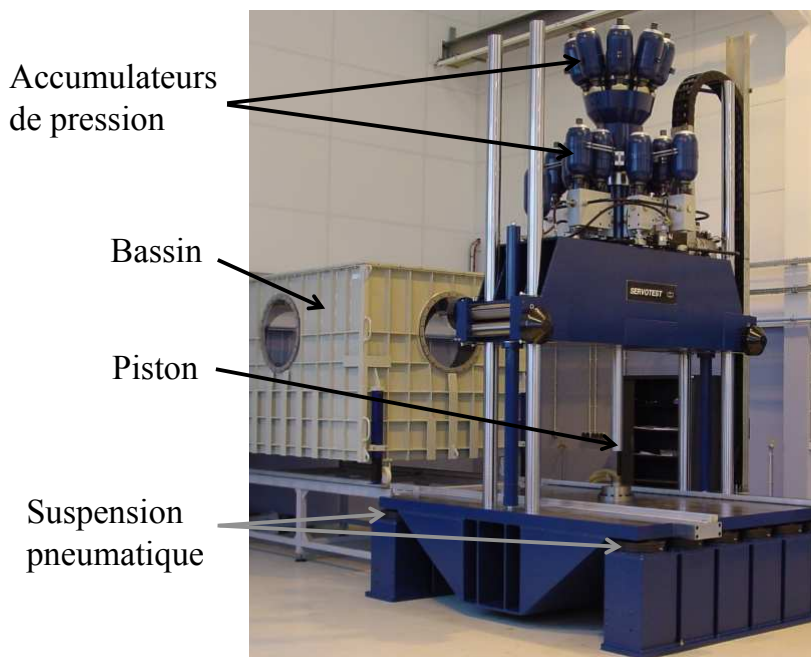


FIGURE 4.1 – Machine de choc

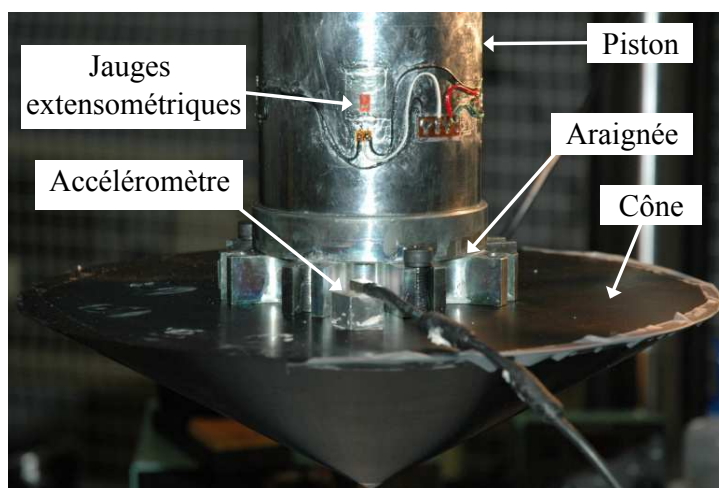


FIGURE 4.2 – Maquette d'un cône montée en bout de piston et moyens de mesures

Les principaux intérêts de cette machine sont de pouvoir contrôler la vitesse d'impact durant l'essai, d'effectuer des essais à grande vitesse et de mettre en oeuvre des efforts importants (voir tableau 4.1). La figure 4.3 montre un exemple d'enregis-

Vitesse (m/s)	Effort max. (kN)	Course (mm)
20	100	150
10	200	300

TABLE 4.1 – Performances de la machine de choc : ce tableau présente, en fonction de la vitesse d'impact souhaitée, l'effort maximal et la course sur laquelle cette vitesse peut être maintenue.

trement de la vitesse au cours de l'impact d'un cône d'angle 30° pour une consigne de vitesse de 20 m/s. On peut voir que les variations de vitesse sont largement inférieures à 5% durant l'impact. Ces faibles variations de vitesse peuvent toutefois entraîner des efforts inertiels non négligeables du fait de la masse de la maquette (15 à 20 kg). La mesure de l'accélération permet de corriger les effets inertiels en soustrayant l'effort inertiel ($F_{inertiel}$) de l'effort total mesuré (F_{total}). L'effort hydrodynamique (F_{hyd}) est donc obtenu de la façon suivante :

$$F_{hyd} = F_{total} - F_{inertiel}. \quad (4.1)$$

L'effort inertiel est obtenu en appliquant le principe fondamental de la dynamique :

$$F_{inertiel} = m \frac{dV}{dt}, \quad (4.2)$$

où m représente la masse en mouvement comprise sous les jauges extensométriques (maquette+araignée+vis+extrémité du piston+...). Le profil de vitesse tracé sur la figure 4.3 conduit aux efforts présentés à la figure 4.4. Dans ce cas, la correction apportée à l'effort total reste assez faible.

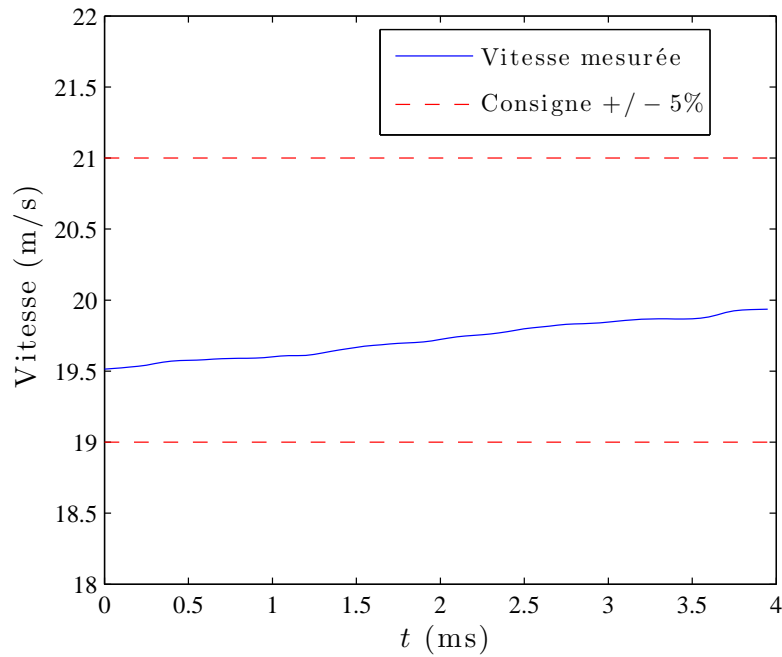


FIGURE 4.3 – Enregistrement de la vitesse au cours de l'impact d'un cône d'angle 30° pour une consigne de vitesse de 20 m/s

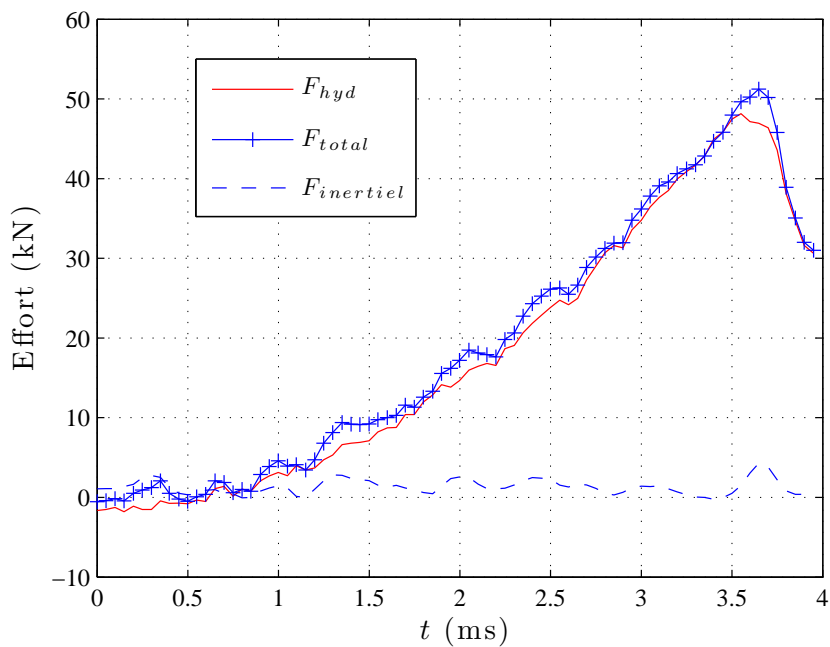


FIGURE 4.4 – Contribution de l'effort inertiel lors de l'impact d'un cône d'angle 30° pour une consigne de vitesse de 20 m/s

4.1.2 Maquettes étudiées

Cinq maquettes ont été réalisées par usinage dans un bloc d'aluminium 7075. Différents critères ont été pris en compte lors de la conception de ces maquettes :

- L'effort d'impact maximal doit être inférieur aux capacités de la machine (voir tableau 4.1) mais doit être supérieur à 24 kN (pour des raisons liées à la précision du capteur d'effort).
- La masse des maquettes doit être inférieure à 80 kg.
- Les déplacements induits par l'effort d'impact doivent être suffisamment faibles pour que la maquette puisse être considérée comme rigide (de l'ordre de la tolérance de fabrication).

Les différentes maquettes réalisées sont présentées ci-dessous.

Forme triconique

La forme triconique est une forme de révolution dont la section est présentée à la figure 4.5. On peut voir que cette forme s'apparente à celle d'un cône avec localement trois angles de relèvement différents.

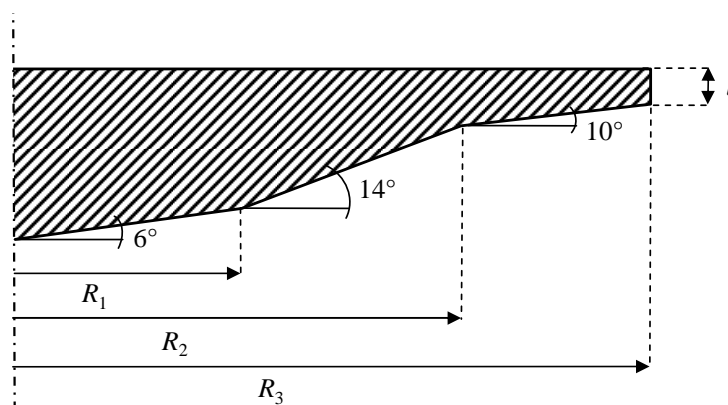


FIGURE 4.5 – Dessin de définition de la maquette triconique ($l = 25$ mm, $R_1 = 90$ mm, $R_2 = 135$ mm, $R_3 = 160$ mm)

Paraboloïde elliptique

La maquette du paraboloïde elliptique est construite à partir de la fonction $f(x, y) = 1.418x^2 + 0.517y^2$. Cette forme est tronquée comme indiqué sur la figure 4.6.

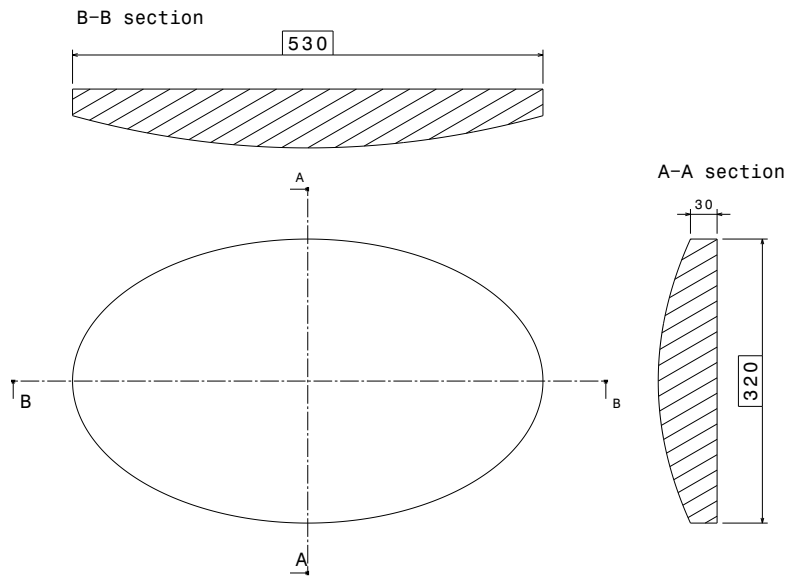


FIGURE 4.6 – Dessin de définition de la maquette du paraboloid elliptique

Dièdre-cône

La forme dièdre-cône décrite par la figure 4.7 est composée d'une partie centrale en forme de dièdre d'angle de relèvement 15° et de deux extrémités en forme de demi-cône.

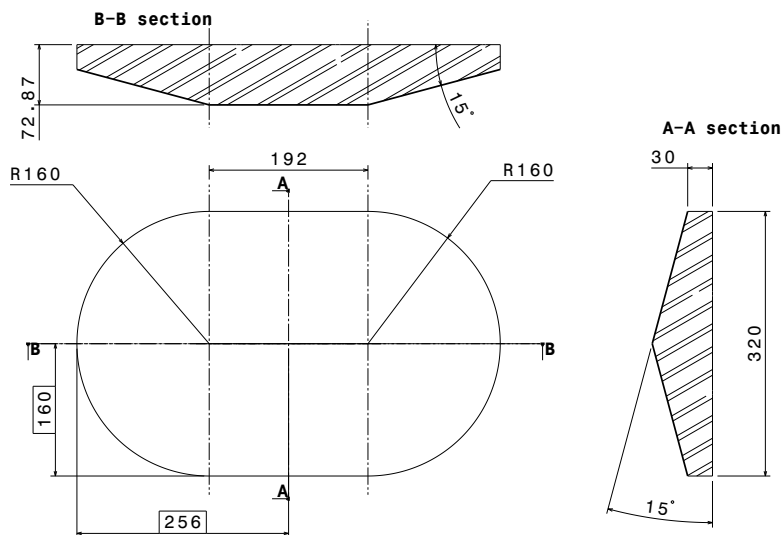


FIGURE 4.7 – Dessin de définition de la maquette dièdre-cône

Pyramide

Cette maquette représente une pyramide à base carrée d'angle 15° . On peut voir sur la figure 4.8 que les arêtes de la pyramide sont orientées dans les directions 0° et 90° . Ce choix a été fait car il devrait permettre à l'avenir une installation plus facile de capteurs de pression Tekscan. Ces derniers se présentent sous la forme d'une feuille se collant directement sur la pièce (pas de perçage nécessaire).

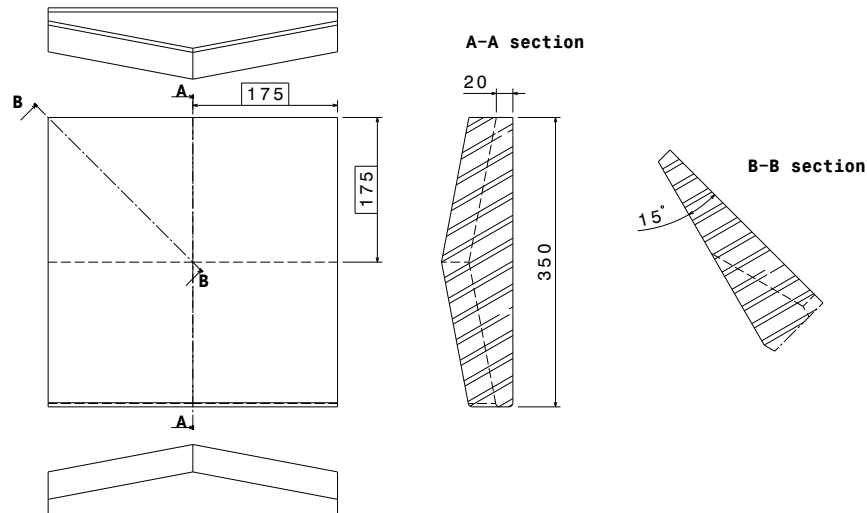


FIGURE 4.8 – Dessin de définition de la maquette pyramide

Cylindre-sphère (non testée)

La forme cylindre-sphère décrite par la figure 4.9 est inspirée de la forme étudiée par [Faltinsen et Chezian \(2005\)](#). Cette forme est composée d'une partie centrale en forme de cylindre circulaire et d'extrémités en forme de demi-calotte sphérique. Malheureusement, à cause de problèmes d'indisponibilité de la machine de choc, il n'a pas été possible de tester cette maquette jusqu'à aujourd'hui. Cette forme a néanmoins été étudiée au travers de simulations numériques.

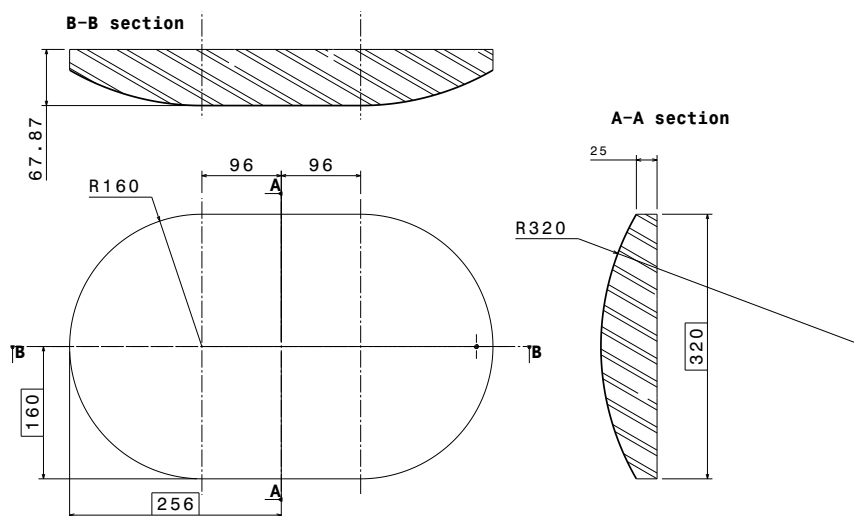


FIGURE 4.9 – Dessin de définition de la maquette cylindre-sphère

4.1.3 Répétabilité des essais

Lors des campagnes expérimentales précédentes, il a été observé que le contrôle de la vitesse durant l'essai conduisait à une très bonne répétabilité des essais. La répétabilité des essais et l'analyse de l'erreur ont été étudiées en détail par [Nême et El Malki Alaoui \(2009\)](#) dans le cas d'essais sur des cônes avec différents angles de relèvement. Nous présentons dans ce paragraphe une synthèse des phénomènes observés au cours des différents essais. Afin de comparer les essais à différentes vitesses d'impact, l'effort hydrodynamique est adimensionnalisé en introduisant le coefficient de slamming C_s défini par :

$$C_s = F_z / (0,5\rho V_z^2 S_{max}), \quad (4.3)$$

où F_z représente l'effort vertical d'impact hydrodynamique et S_{max} représente l'aire de la surface projetée de la maquette étudiée. Par exemple, dans le cas de la maquette du parabolôïde elliptique dont le dessin de définition est présenté à la figure 4.6, la surface projetée est un disque elliptique d'aire $S_{max} = \pi \times 0,16 \times 0,265 \text{ m}^2$. La profondeur de pénétration est également adimensionnalisée en introduisant le paramètre H défini par :

$$H = h(t) / S_{max}^{1/2}. \quad (4.4)$$

L'ensemble des essais réalisés vise à valider l'estimation des efforts d'impacts hydrodynamiques sur des pièces rigides et à vitesse constante. La campagne d'essais a montré que toutes les maquettes étudiées ne se comportaient pas de la même manière. Les maquettes dièdre-cône et pyramide conduisent à des résultats très proches

quelle que soit la vitesse d'impact considérée alors que pour les maquettes paraboloides elliptique et forme triconique, la courbe C_s-H mesurée n'est pas totalement indépendante de la vitesse d'impact.

Considérons tout d'abord le cas de la maquette dièdre-cône. La figure 4.10 présente deux séries de mesures de l'effort hydrodynamique pour deux vitesses d'impact différentes. On peut voir qu'il n'y a que très peu de dispersion entre les six essais considérés et que la vitesse d'impact n'a pas d'influence sensible.

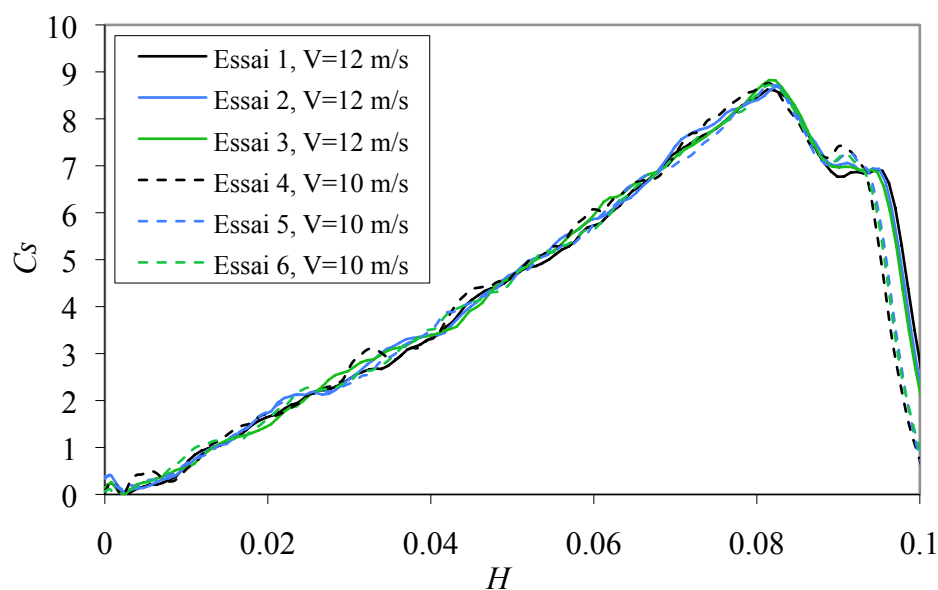


FIGURE 4.10 – Mesures du coefficient de slamming au cours de l'impact de la maquette dièdre-cône

Considérons ensuite le cas de la maquette paraboloides elliptique. La figure 4.11 présente deux séries de mesures de l'effort hydrodynamique au cours de l'impact. On constate une bonne répétabilité des essais pour des vitesses identiques mais de légères différences apparaissent entre des essais à vitesses différentes. Ces courbes semblent osciller autour d'une courbe maîtresse. Afin d'analyser ces oscillations, nous avons estimé leur période. La figure 4.12 montre les points utilisés pour estimer cette grandeur. Ces relevés conduisent à une période d'oscillation comprise entre 0,848 et 0,916 ms. Cette période d'oscillation est proche de la période du premier mode propre de la maquette hors d'eau qui se situe autour de 1 ms (cette valeur a été déterminée par un calcul de structure par éléments finis). Ces oscillations révèlent donc des vibrations de la maquette induites par l'impact hydrodynamique. Il est vrai que l'effort évolue beaucoup plus rapidement dans le cas du paraboloides elliptique que dans le cas du dièdre-cône (figure 4.10), ce qui provoque des vibrations sous l'effet du « choc ».

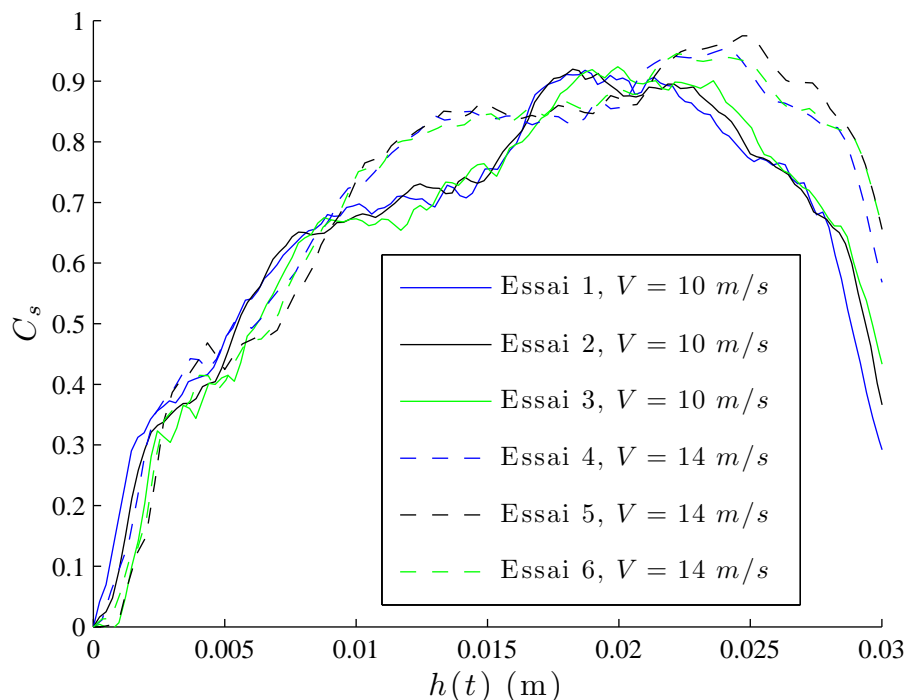


FIGURE 4.11 – Comparaison de différentes mesures du coefficient de slamming au cours de l'impact de la maquette parabolöide elliptique

Dans le cas de la forme triconique, on observe également des effets dynamiques bien que l'évolution de l'effort d'impact soit plus douce que dans le cas du parabolöide elliptique. Comme on peut le voir sur la figure 4.13, il y a peu de dispersion entre deux essais à vitesse égale mais de légères différences assimilables à des oscillations apparaissent pour des vitesses d'impact différentes à partir de $h(t)/R_3 \approx 0,046$. Cette profondeur de pénétration coïncide avec l'instant où la surface mouillée atteint le premier changement d'angle de relèvement. L'effort chute alors brutalement du fait que l'angle de relèvement augmente subitement au niveau de la ligne de contact. Contrairement au cas du parabolöide elliptique, ce n'est pas une augmentation mais une chute brutale de l'effort qui induit des vibrations de la maquette triconique.

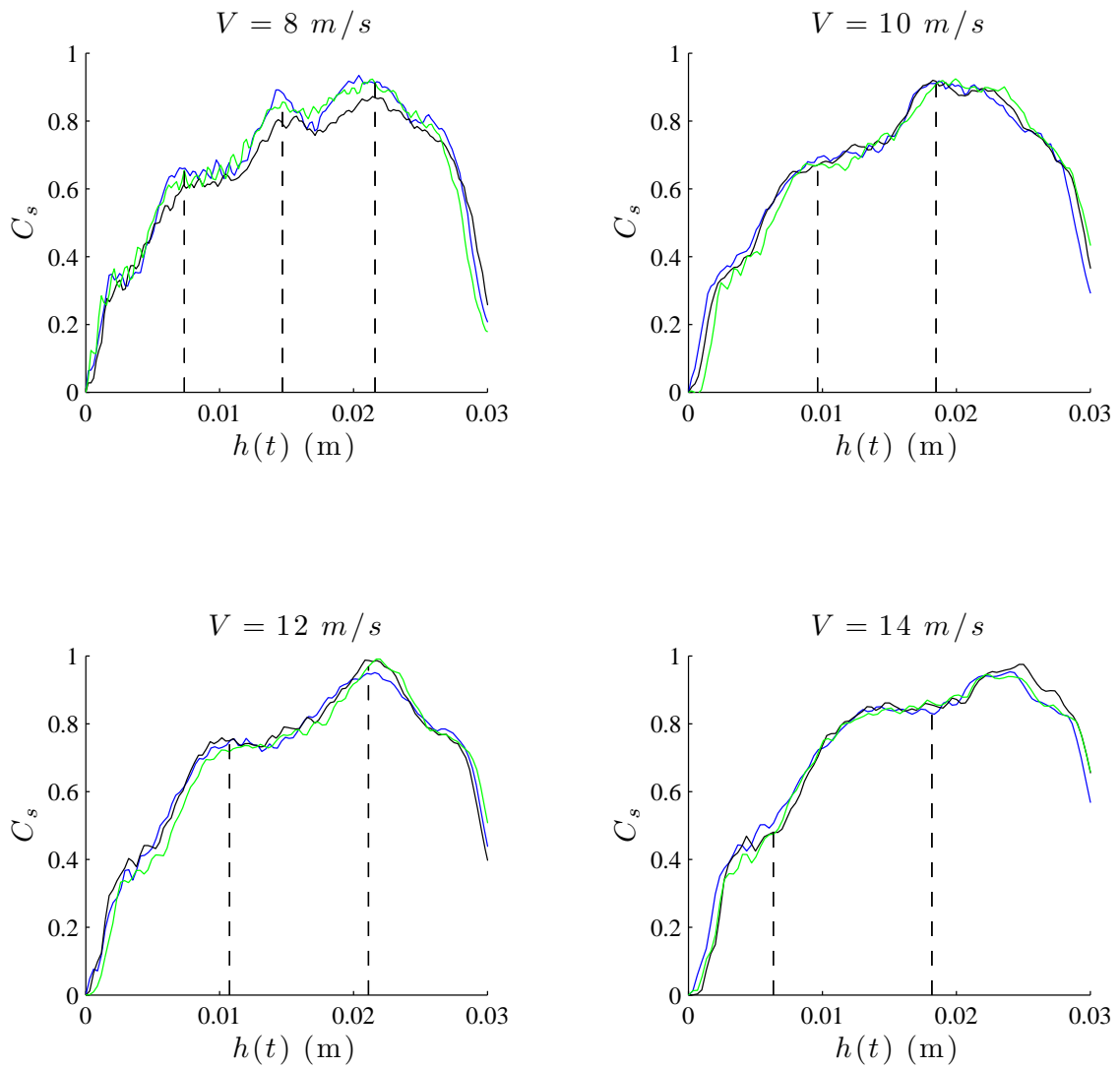


FIGURE 4.12 – Relevé des périodes d'oscillation sur les mesures d'effort aux différentes vitesses d'impact pour le paraboloïde elliptique.

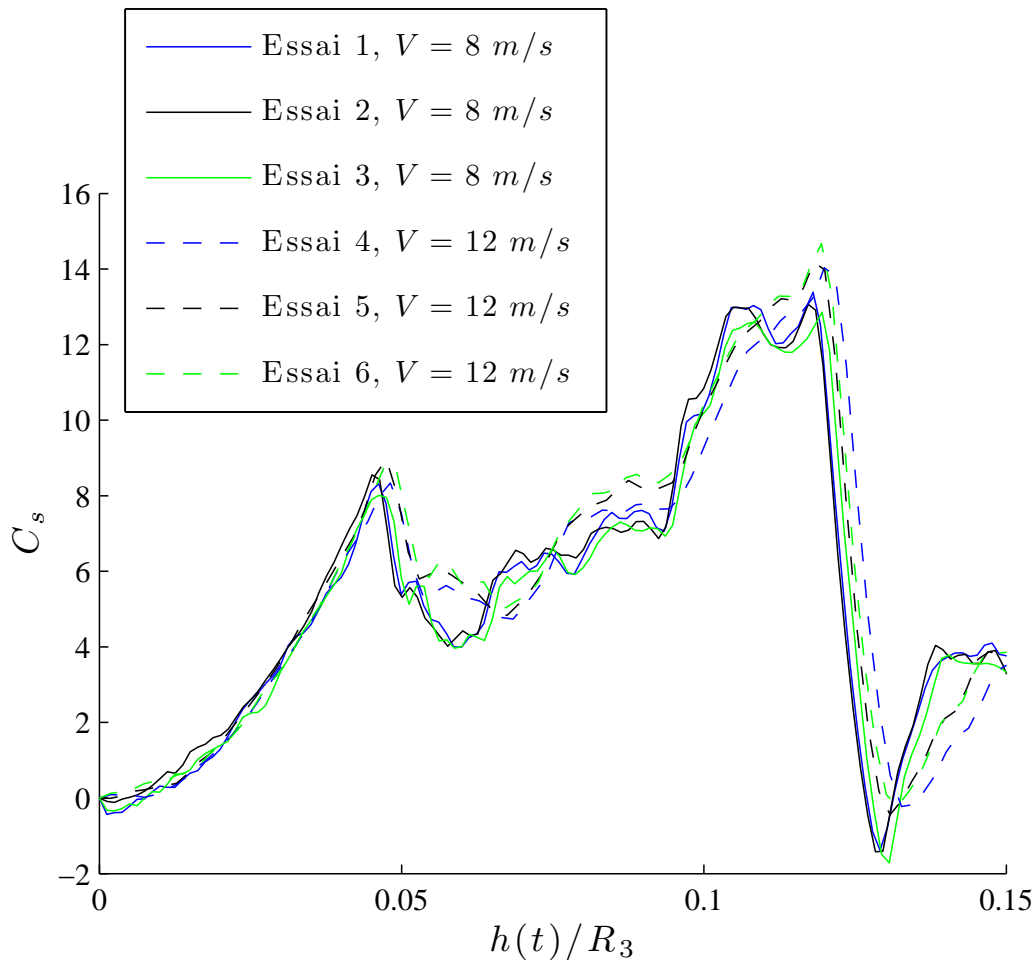


FIGURE 4.13 – Mesures du coefficient de slamming au cours de l'impact de la maquette triconique

4.2 Simulations numériques par éléments finis d'impacts hydrodynamiques

Nous utilisons le module de « Couplage Euler-Lagrange » (CEL) du logiciel de calcul par éléments finis ABAQUS/Explicit (version 6.7-EF1) qui permet de simuler des écoulements à surface libre avec interaction fluide/structure. Les principes de base de cette méthodologie sont présentés au paragraphe 4.2.1. L'influence du maillage (taille du domaine et finesse) sur la simulation est ensuite étudiée à travers l'exemple du paraboloïde elliptique au paragraphe 4.2.2. Quelques difficultés liées à la modélisation du couplage sont présentées au paragraphe 4.2.3. Enfin, deux cas de référence sont traités pour valider l'outil de simulation au paragraphe 4.2.4. Cet outil nous servira de moyen de comparaison pour l'étude de formes non symétriques pour lesquelles nous n'avons pas réalisé d'essais.

4.2.1 Outil de calcul

Les principes de la méthode CEL sont décrits en détail dans [Aquelet \(2004\)](#) et dans un chapitre de l'ouvrage de [Souli et Sigrist \(2009\)](#). Il faut noter que ces documents sont dédiés à la méthode CEL qui est implantée dans le code Ls-Dyna. Nous disposons de moins d'informations concernant le fonctionnement du module CEL du code ABAQUS. Nous présentons cependant les points importants de cette méthode, d'un point de vue utilisateur, en se basant sur la documentation d'ABAQUS.

La méthode CEL repose sur l'utilisation de deux domaines de calcul différents : un domaine Eulérien sert à la description de l'écoulement du (ou des) fluide(s) et un domaine Lagrangien correspond au solide. Comme le montre la figure 4.14, ces deux domaines sont généralement superposés. En d'autres termes, il n'est pas nécessaire que les maillages du domaine Eulérien et du solide soient coïncidents. Cela simplifie grandement la réalisation de ceux-ci et permet d'utiliser un maillage structuré pour le domaine fluide. L'interaction entre le solide et les fluides présents dans le domaine Eulérien est traitée à l'aide d'un algorithme par pénalisation qui sera brièvement décrit par la suite.

Un élément du maillage Eulérien peut contenir du fluide, du vide ou un mélange des deux. Cet aspect est géré par un modèle de type Volume-Of-Fluid (VOF). Dans un tel modèle, une variable appelée fraction volumique est introduite dans chaque cellule. Cette variable indique la fraction du volume de la cellule qui est remplie de fluide. Dans le cas d'un modèle multiphasique, une fraction volumique est associée à chaque phase en présence. La figure 4.15 donne un exemple de répartition de la fraction volumique correspondant à une goutte de fluide de forme elliptique. Dans une représentation VOF, on repère le passage d'une phase à une autre par une variation progressive de la fraction volumique. Il n'y a donc pas de description précise de la frontière entre les deux phases (même s'il existe différentes méthodes

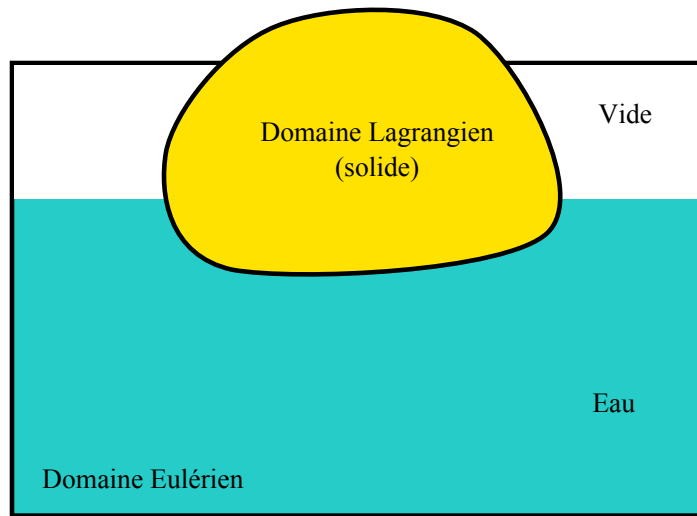


FIGURE 4.14 – Description mixte Eulerienne et Lagrangienne

pour « reconstruire au mieux » l'interface à partir de l'information sur les fractions volumiques).

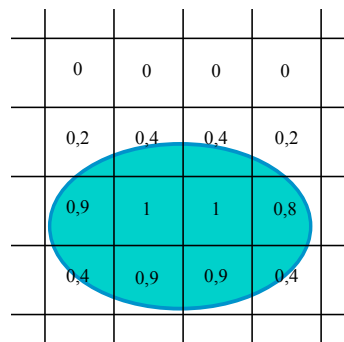


FIGURE 4.15 – Illustration de la méthode Volume-Of-Fluid (VOF)

L'interaction entre le fluide et le solide se traduit classiquement par une condition de non pénétration du fluide dans le solide. Pour faire respecter une telle condition, il est nécessaire de déterminer la géométrie de la frontière du domaine fluide. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour cela (voir [Souli et Sigrist \(2009\)](#) et [Zaleski](#)). La méthode de couplage entre le fluide et le solide utilisée par ABAQUS est basée sur une méthode inspirée de la modélisation du contact solide/solide par une méthode de pénalisation (voir [Wriggers \(2006\)](#) et [Belytschko *et al.* \(2000\)](#)). Le principe d'une méthode de pénalisation est d'appliquer un effort réparti proportionnel à la distance de pénétration du fluide dans le solide (figure 4.16). L'algorithme de couplage par pénalité implique donc un paramètre, la raideur de contact de l'interface, dont la qualité des résultats dépend. Si la raideur est trop faible, une in-

terpénétration trop importante entre le fluide et le solide peut survenir. D'un autre côté, une raideur de contact trop grande conduit par contre à des oscillations importantes des efforts de contact et oblige à réduire significativement le pas de temps de calcul pour garantir la stabilité du schéma d'intégration temporelle explicite. [Aquelet et al. \(2006\)](#) proposent un couplage par pénalité avec amortissement pour réduire les oscillations des efforts de contact. Dans le cas de l'impact hydrodynamique de dièdres, [Aquelet \(2004\)](#) a montré que le facteur de pénalité permettant d'obtenir des niveaux de pression proches de ceux du modèle analytique de [Zhao et Faltinsen \(1993\)](#) doit être 17 fois plus important pour un dièdre d'angle de relèvement de 4° que pour un dièdre de 30° . Dans le cas d'une structure telle qu'un cylindre, dont la tangente varie selon la position, [Aquelet](#) suggère d'ajuster le facteur de pénalité localement en fonction de l'angle de relèvement de l'élément solide par rapport à la surface libre initiale, ce qui n'est pas possible avec ABAQUS. En effet, ABAQUS détermine automatiquement la raideur de contact utilisée en choisissant celle-ci en fonction de la raideur des éléments de part et d'autre de la surface de contact. Cette méthode peut paraître quelque peu arbitraire mais présente des avantages :

- Tout d'abord, la raideur de contact augmente naturellement lorsque le maillage est raffiné. Par conséquent, l'erreur sur la condition de non pénétration liée à la méthode de pénalisation diminue lorsque l'on raffine le maillage.
- Avec la raideur de contact déterminée par défaut par ABAQUS, le pas de temps du schéma d'intégration (limité à la limite de stabilité du schéma d'intégration temporelle) est peu affecté par le couplage par pénalité (d'après la documentation, la réduction du pas de temps est de 5 %).

Notons que, même si la raideur de contact est choisie de manière automatique par ABAQUS, l'utilisateur peut affecter ce choix. Il est en effet possible de multiplier la raideur par défaut par un coefficient appelé « scaling factor ». Ce point sera rediscuté par la suite (paragraphe 4.2.3).

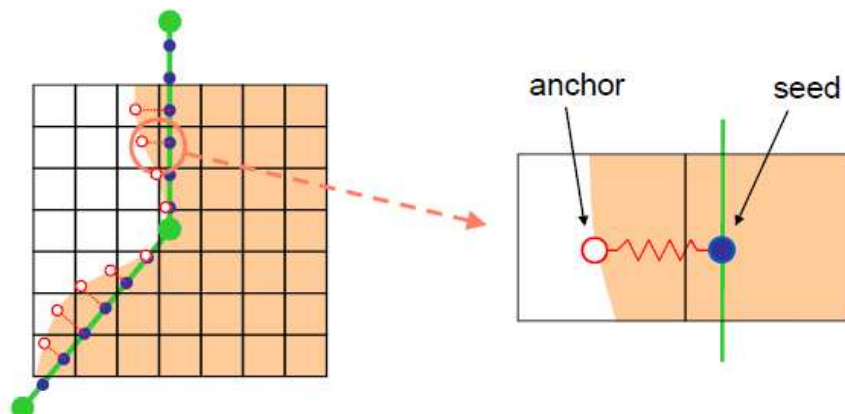


FIGURE 4.16 – Principe du couplage par pénalité dans le module CEL d'ABAQUS/Explicit. (Source : [Abaqus \(2008\)](#))

Les simulations effectuées se basent sur l'hypothèse d'un fluide compressible non visqueux dont l'équation d'état est définie par :

$$p = K(1 - \rho_0/\rho), \quad (4.5)$$

où p représente la pression, K est le module de compressibilité du fluide, ρ sa masse volumique et ρ_0 sa masse volumique initiale. Bien que la compressibilité du fluide soit prise en compte, les vitesses d'impact considérées pour les simulations sont déterminées de sorte que la compressibilité du fluide n'influence que très peu les résultats afin de pouvoir effectuer des comparaisons avec les résultats issus du modèle incompressible proposé dans les chapitres précédents.

Afin de réduire la taille du domaine fluide autour de l'objet tout en évitant des réflexions d'ondes parasites, des conditions aux limites non-réfléchissantes sont appliquées sur les frontières du domaine fluide, ce qui se traduit par la condition suivante :

$$p = \rho c U_n, \quad (4.6)$$

où c représente la célérité du son dans le fluide ($c = \sqrt{K/\rho_0}$) et U_n la composante de vitesse normale à la frontière du domaine fluide.

4.2.2 Influence du maillage

Dans ce paragraphe nous allons illustrer l'influence du maillage sur les résultats de calculs dans le cas de l'impact du paraboloïde elliptique décrit à la figure 4.6 avec une vitesse de 12 m/s. Le domaine fluide considéré (vert) ainsi que le corps impactant (rouge) sont décrits par la figure 4.17. On remarque qu'un seul quart du domaine est modélisé du fait des symétries du problème d'impact. Le domaine est partitionné en plusieurs régions afin de pouvoir définir des tailles de maille différentes dans chaque région. Le domaine Eulérien représenté en vert a une forme de pavé. Une petite portion du domaine eulérien n'est pas représentée afin de mieux visualiser le domaine Lagrangien coloré en rouge. Les différents paramètres fixes sont donnés en *mm* : $L_1 = 300$, $l_1 = 180$, $h_2 = 36$, $h_3 = 50$. Les paramètres étudiés sont L_2 , l_2 , h_1 et la taille de maille l_e dans la zone fine. Les trois cas suivants ont été considérés :

Cas 1 : $l_e = 2$, $L_2 = 265$, $l_2 = 160$, $h_1 = 530$, $2,1 \times 10^6$ éléments
 Cas 2 : $l_e = 3$, $L_2 = 265$, $l_2 = 160$, $h_1 = 530$, $0,9 \times 10^6$ éléments
 Cas 3 : $l_e = 3$, $L_2 = 530$, $l_2 = 320$, $h_1 = 795$, $1,7 \times 10^6$ éléments

La figure 4.18 illustre l'influence de la taille des éléments dans la zone de contact sur les niveaux d'effort et la figure 4.19 montre l'influence de la taille du domaine fluide. On peut voir que la taille de maille influence directement le niveau de bruit sur le signal d'effort. La taille du domaine influence surtout le niveau de l'effort à la fin de l'impact. L'effort correspondant au cas 1 devient supérieur d'environ 3,4% à l'effort issu du cas 3 à l'approche de l'immersion totale de la maquette. Cela indique que le domaine fluide pour le cas 1 est trop petit pour que les résultats soient tout à fait représentatifs d'un impact en milieu infini.

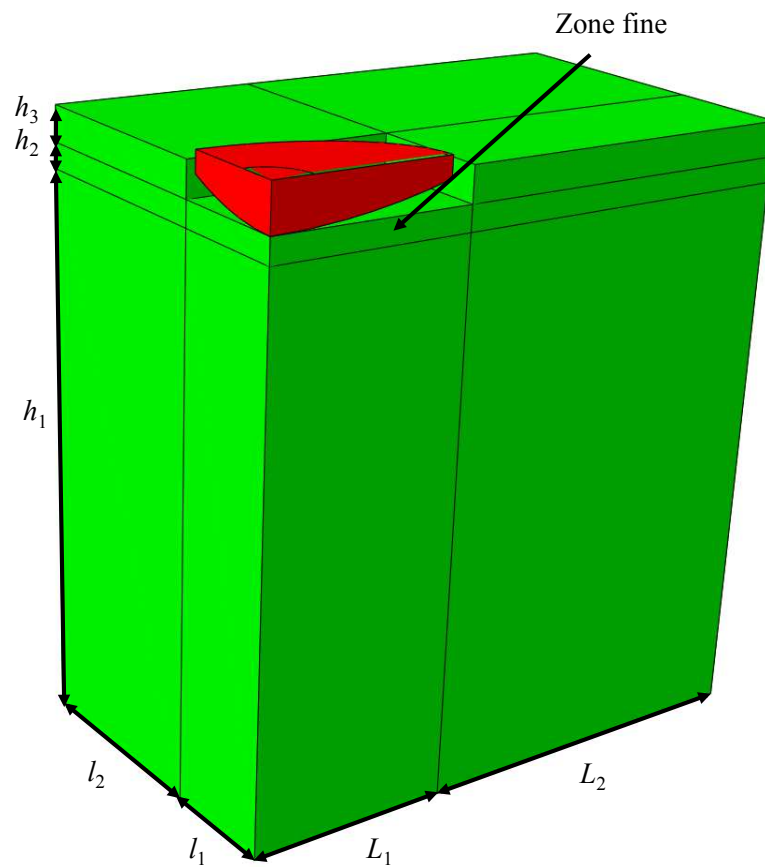


FIGURE 4.17 – Description du domaine fluide pour la simulation de l'impact du parabolôïde elliptique

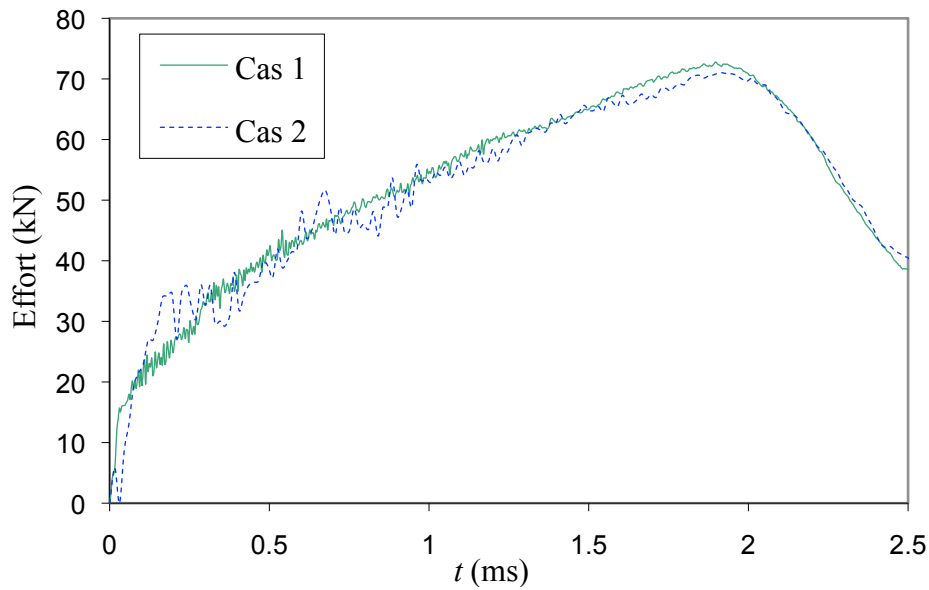


FIGURE 4.18 – Effet de la taille de maille dans la zone fine sur l'effort hydrodynamique d'impact pour le paraboloïde elliptique. Cas 1 : $l_e = 2$ mm, $2,1 \times 10^6$ éléments. Cas 2 : $l_e = 3$ mm, $0,9 \times 10^6$ éléments.

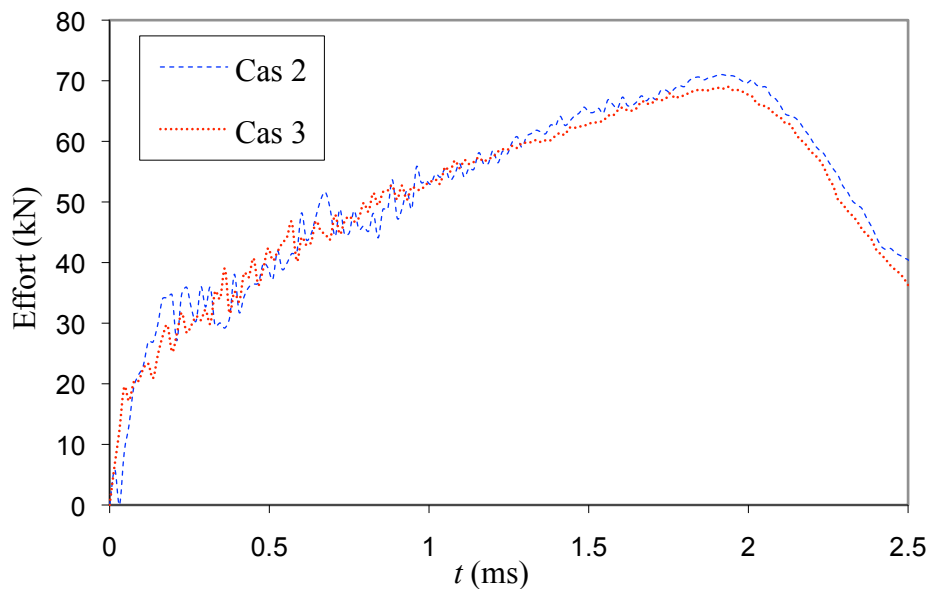


FIGURE 4.19 – Effet de la taille du domaine fluide sur l'effort hydrodynamique d'impact pour le paraboloïde elliptique. Cas 2 : $L_2 = 265$ mm, $h_1 = 530$ mm, $0,9 \times 10^6$ éléments. Cas 3 : $L_2 = 530$ mm, $h_1 = 795$ mm, $1,7 \times 10^6$ éléments.

4.2.3 Influence de la raideur de contact

Nous allons à présent illustrer l'influence de la raideur de contact sur l'estimation de l'effort d'impact hydrodynamique dans le cas de la maquette cylindre-sphère définie au paragraphe 4.1.2. Cette maquette est constituée d'une partie centrale en forme de cylindre circulaire, ce qui entraîne une montée de l'effort très rapide au début de l'impact. La figure 4.20 compare l'évolution de l'effort hydrodynamique au cours de l'impact pour trois raideurs de contact différentes (pour cela, nous avons utilisé la paramètre « scaling factor » évoqué précédemment). Notons qu'avec cette maquette les courbes d'efforts sont toutes assez bruitées (ce phénomène est d'autant plus marqué que la raideur de contact est forte). Pour contourner ce problème, les résultats présentés à la figure 4.20 ont été préalablement filtrés à l'aide d'un filtre passe-bas de type Butterworth avec une fréquence de coupure de 50 kHz. On peut voir sur la figure 4.20 que le facteur de pénalité a tendance à réduire l'oscillation que l'on observe au début de l'impact ($0 < t < 0,3$ ms). Le facteur de pénalité le plus important conduit par contre à une instabilité de l'effort autour de 0,8 ms. Il apparaît donc que l'impact de cette maquette est particulièrement délicat à traiter avec ABAQUS/Explicit.

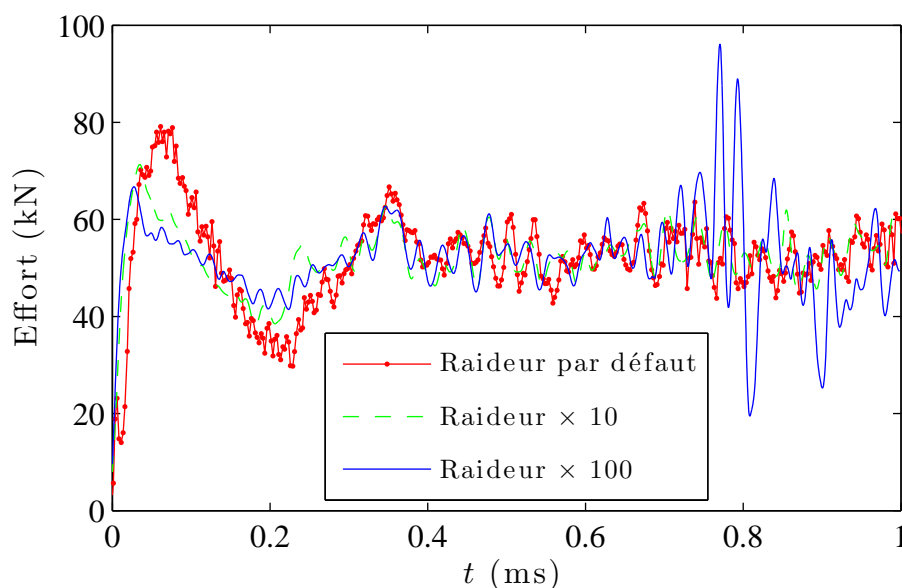


FIGURE 4.20 – Effet de la raideur de contact sur l'effort hydrodynamique lors de l'impact de la maquette cylindre-sphère ($V_z = 12$ m/s).

4.2.4 Comparaison des résultats de simulation avec quelques résultats de la littérature

Nous proposons de comparer les résultats de simulation avec des résultats de référence dans le cas d'un cône et d'une sphère.

Cônes

Une campagne d'essais exhaustive sur des cônes d'angle 7° , 15° et 30° a été menée sur la machine de choc (Nême et El Malki Alaoui (2009)). Cette base de données est utilisée pour la validation des estimations d'efforts hydrodynamiques. Dans le cas d'un cône, l'effort adimensionnel $f(\beta)$ est habituellement défini par :

$$f(\beta) = \frac{F_z \tan^3 \beta}{\rho V_z^4 t^2}. \quad (4.7)$$

Les résultats issus des calculs et des essais présentés au tableau 4.2 montrent qu'il est possible de déterminer correctement l'effort d'impact à l'aide des simulations ABAQUS.

β ($^\circ$)	7	15	30
$f(\beta)$ Abaqus	7,17	6,01	4,62
$f(\beta)$ Exp.	6,79	6,18	4,75

TABLE 4.2 – Comparaison des calculs et mesures de l'effort adimensionnel ($f(\beta)$) pour différents cônes d'angle β

Sphère

Dans le cas d'une sphère de rayon R , le coefficient de slamming (C_s) ou effort adimensionnel est défini par :

$$C_s = \frac{F_z}{0,5\rho V_z^2 \pi R^2}. \quad (4.8)$$

Les résultats d'efforts issus des calculs par éléments finis sont comparés à différents résultats de référence de la littérature. Parmi les résultats présentés sur la figure 4.21 se trouvent l'approche numérique potentielle non linéarisée de Battistin et Iafrati (2003), les essais de Nisewanger (1961) et de Baldwin et Steves (1975). L'évolution de l'effort d'impact hydrodynamique est globalement bien évaluée par le calcul par éléments finis. Ce dernier semble toutefois surestimer l'effort en fin d'impact par rapport aux essais et au résultat numérique de Battistin et Iafrati (2003). On remarque également que le niveau de bruit sur l'effort est relativement important sur l'ensemble du calcul. On retrouve des niveaux de bruit plus importants sur les signaux d'efforts issus des calculs par éléments finis dans le cas d'une maquette à fond plat, comme la sphère, que dans le cas d'une maquette avec un angle de relèvement minimal non nul, comme un cône ou une pyramide (des résultats seront présentés dans le chapitre suivant).

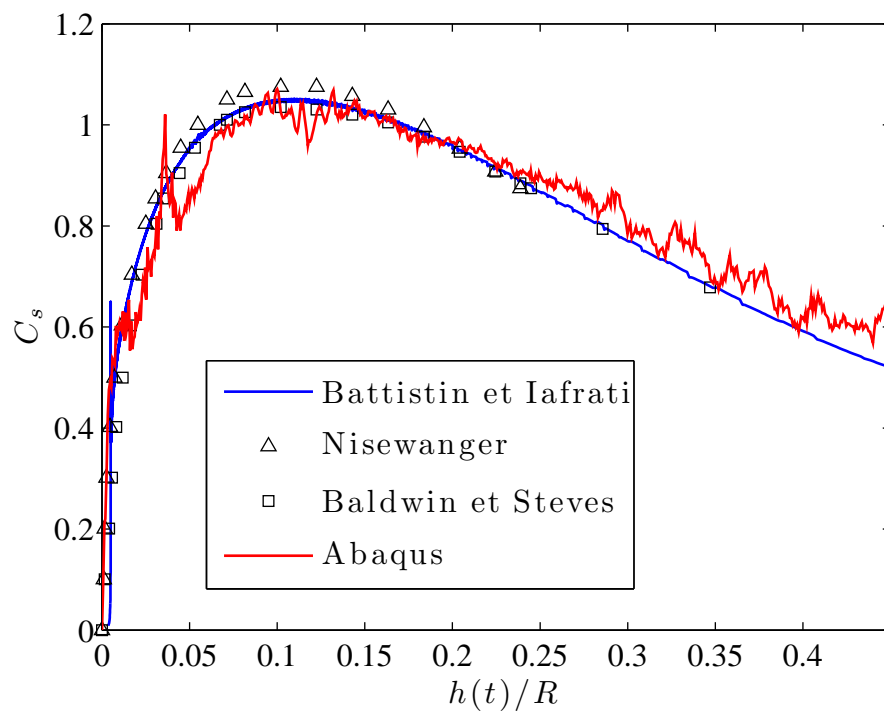


FIGURE 4.21 – Evolution du coefficient de slamming au cours de l'impact d'une sphère de rayon R

