
Identification des caractéristiques de flambage dynamique de tube

4.3.1 Introduction

L'impact sur un tube à son extrémité peut produire le flambage de celui-ci. La revue bibliographique de la section 4.1.3 a montré que la force résultante de ce flambage évolue souvent sous forme de pics. Dans cette partie, une étude sur l'impact de tubes en alliages d'aluminium de désignation 6060 T6 est présentée. On se propose d'étudier les similitudes entre les pics d'un impact sur une structure en flambage dynamique et d'un impact à l'eau. Dans un premier temps, une étude numérique va permettre d'étudier l'influence de différents paramètres sur la réponse en terme de force durant un impact. Dans un deuxième temps, des essais d'impact sur des tubes percés vont être effectués sur un puits de chute. Ces essais sont comparés à des simulations numériques. Seule une modélisation numérique (pas analytique) est donc proposée ici.

4.3.2 Simulations préliminaires de flambage dynamique sous impact

4.3.2.1 Présentation du modèle numérique

Des simulations numériques en éléments finis à l'aide du code de calcul Abaqus/Explicite sont effectuées afin d'étudier le flambage dynamique plastique sous impact de tube en alliage d'aluminium de désignation 6060 T6 (Figure 4.25). Dans ce modèle, un tube de diamètre extérieur D , d'épaisseur e et de hauteur h est positionné de façon longitudinale sur une plaque. Cette plaque est considérée comme un corps analytique rigide encasté. Un deuxième corps analytique rigide dont une masse m est associée vient impacter ce tube avec une vitesse initiale de valeur V_0 . Le tube est maillé à l'aide d'éléments finis de type coque avec 5 points d'intégration dans l'épaisseur et une taille caractéristique de 3 mm. Le comportement de l'alliage d'aluminium de désignation T6 suit une loi de Johnson Cook (Équation 2.1).

Pour le flambage dynamique, des calculs ont montrés que l'influence de la température sur la réponse à l'impact est faible en terme d'effort. Dans le cas d'un impact axiale sur un tube dont les caractéristiques sont données dans le tableau 4.7, l'échauffement est inférieur à 10 K. Un couplage thermo-mécanique ne sera donc pas nécessaire. Le temps de calcul est donc réduit. Les paramètres de la loi de Johnson Cook du matériau sont disponibles dans le tableau 4.6. Ils sont issus d'une identification réalisée à partir d'une loi de comportement présentée par Chen [Chen 2009]. La méthode d'identification du comportement est présentée dans l'Annexe E.

A (MPa)	B (MPa)	n	C	m	T_f (K)	T_a (K)	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)
186,4	114,2	0,337	0,00390	1	665	293	0,001

Tableau 4.6 – Paramètres de la loi de Johnson Cook pour l'AA 6060 T6.

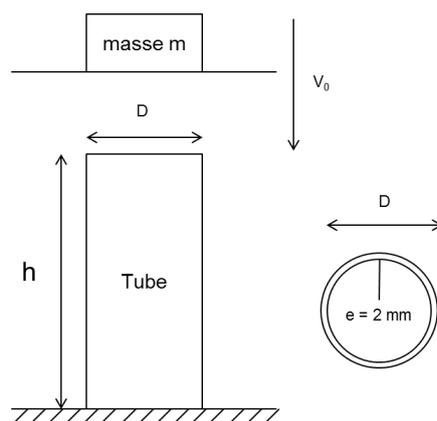


FIGURE 4.25 – Schémas de l'impact d'un tube

4.3.2.2 Étude paramétrique numérique de flambage dynamique de tubes en alliage d'aluminium 6060 T6

Une étude est menée dans cette section pour identifier l'influence de divers paramètres sur la force d'impact. Un tube témoin de référence est utilisé pour cette étude. Les caractéristiques de ce tube et de l'essai sont disponibles dans le tableau 4.7. Sur la figure 4.26, les résultats de la simulation sur le tube témoin sont tracés en terme de force d'impact et comparés à ceux trouver dans le cadre de l'étude de l'impact à l'eau de la section 4.2.3. La force évolue sous forme de pics, dont le premier a une valeur égale à 155 kN. La durée de montée de ce pic est de 10,16 μs , le pic oscille alors autour de sa valeur maximale pendant une durée identifiée sur la figure 4.26 comme la durée de pic, de 160 μs , puis il chute pendant 640 μs . Il est alors identifié que la durée du pic est trop importante pour approcher celui de l'impact à l'eau.

La simulation permet l'analyse de la propagation de l'onde de déformation dans le tube pendant l'impact (Figure 4.27). À un temps $t = 0,0086$ ms, la déformation axiale dans le tube appelée ε_{xx} se propage dans le sens de la longueur du tube. Cette onde de déformation continue à se propager (Figure 4.27 (b.) (2)) et atteint l'autre extrémité du tube. A cet endroit, l'onde de déformation est réfléchiée et ainsi sa valeur s'accumule (Figure 4.27 (b.) (3)). La déformation plastique apparaît et à partir d'une valeur équivalente de 0,15 %, la paroi du tube commence à s'effondrer. Ainsi, c'est bien cette apparition localisée de la déformation plastique qui, dans le modèle numérique, permet l'apparition d'une imperfection et donc le flambage du tube. A noter que cette localisation est dû à la propagation des ondes de chocs élastiques dans la structure. Le flambage est donc élastique suivi d'un post-flambage élasto-plastique.

Un jeu d'imperfections est ajouté au tube de référence. Ces imperfections ont été dimensionnées à l'aide d'un calcul de mode propre du tube. Un calcul explicite d'impact sur ce tube ne change pas la réponse en termes de force de flambage par rapport au calcul sans imperfection. La prédiction du flambage ici n'a donc pas besoin d'un premier calcul type « buckling » pour l'ajout d'imperfection géométrique. Le comportement visco-plastique suffit pour obtenir de bons résultats.

Afin de réduire la durée du pic de force, l'influence de la géométrie du tube est analysée dans l'annexe M. Il est alors conclu que pour réduire de façon significative la durée du pic de force, le facteur géométrique le plus influent est l'épaisseur. Cependant, réduire l'épaisseur d'un tube fait chuter de façon significative la valeur maximale du pic de force.

Il est proposé de percer les tubes par deux fentes et d'étudier leur influence sur l'évolution de ce pic d'impact. Cette étude est une approche couplée entre une simulation numérique et

quelques essais sur puits de chute instrumenté.

D (mm)	e (mm)	V_0 (m/s)	m (kg)	h (mm)
105	2	10	250	300

Tableau 4.7 – Paramètres de la simulation d'impact sur le tube témoin.

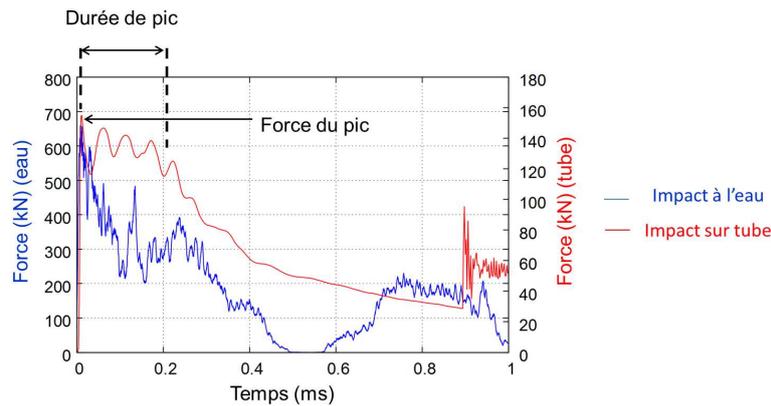


FIGURE 4.26 – Évolution de la force en fonction du temps pour un impact sur le tube témoin.

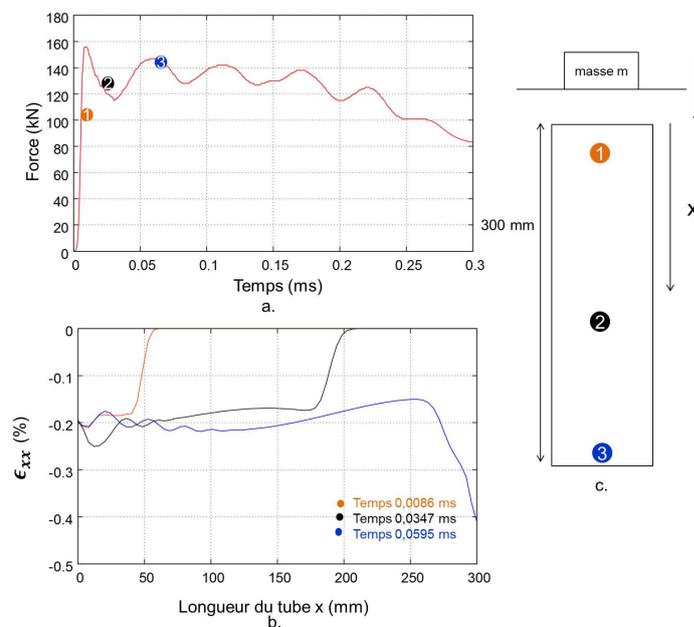


FIGURE 4.27 – Force en fonction du temps du tube de référence pour le premier pic de flambage (a.) déformation axiale en fonction de la longueur du tube pour 3 temps différents (b.) schéma du tube et position des déformations axiales maximales (c.).

4.3.3 Étude du flambage dynamique symétrique et asymétrique sous impact d'un tube fragilisé : expériences et simulations

4.3.3.1 Moyens expérimentaux

Deux expérimentations de flambage ont été réalisées sur un puits de chute disponible à Arts et Métiers ParisTech campus d'Aix en Provence (Figure 4.28). Une plaque, dont la masse est de 13 kg, guidée par une glissière, chute d'une hauteur de 1,3 m sur un tube percé par deux bandes symétriques (Figure 4.29). La vitesse à l'impact est calculée à l'aide de la hauteur du puits de chute ($V = \sqrt{2gh} = 5 \text{ m/s}$) (absence de frottement). Une caméra rapide Phantom Miro 3 permet de filmer le flambage du tube pendant l'impact avec une vitesse de 2700 images/s. Des jauges de déformation Vishay CEA-06-125UW-120 sont collées à l'extérieur du tube de façon à mesurer la déformation dans le sens longitudinal. Elles serviront à comparer l'expérience à la simulation. Elles sont situées sur la partie basse du tube, à 1 cm du bord, de façon symétrique, au milieu des bandes de perçage et au milieu des zones non percées. Les mesures de jauges sont relevées à l'aide d'un système d'acquisition *National Instruments* composé de quatre compléments de quart de pont **NI9944**, d'un module de pont de Wheasthone **NI9237**, d'un compactDAQ **Ni c-DAQ-9174** et d'un ordinateur avec le logiciel *Labview*.

Deux essais d'impact sont réalisés sur le puits de chute sur des tubes en alliage d'aluminium 6060 T6 de hauteur 300 mm, de largeur 105 mm et dont deux fentes symétriques ont été ajoutées (Figure 4.29). Chaque fente est située au centre du tube (dimension de 100 mm de largeur et 20 mm de hauteur). Deux cas de flambage sont étudiés ici. Le premier est un flambage symétrique. Le deuxième est un flambage asymétrique (le tube plie d'un côté).

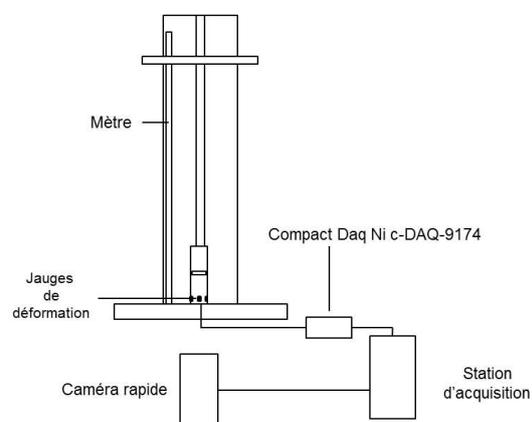
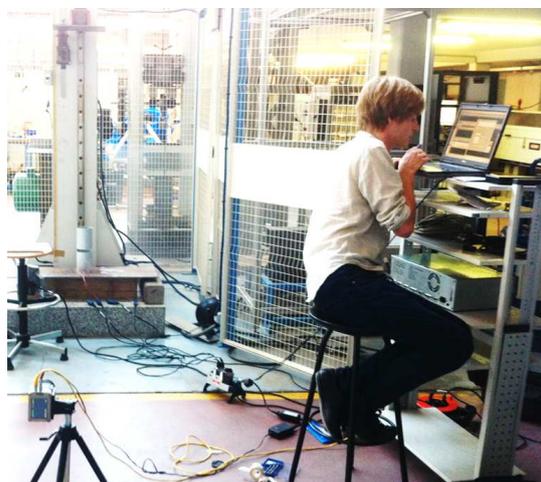


FIGURE 4.28 – Instrumentation du puits de chute d'Aix en Provence pour les essais de flambage.

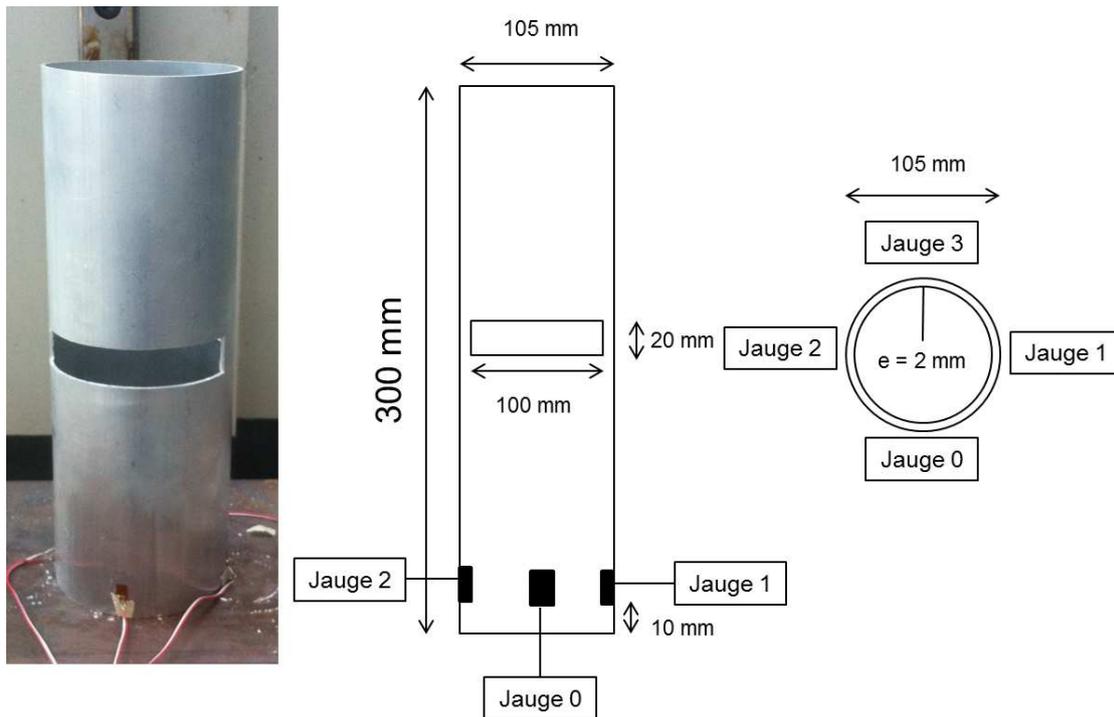


FIGURE 4.29 – Tube en alliage d'aluminium de désignations 6060 T6 percée et instrumentée.

4.3.3.2 Étude du flambage dynamique symétrique sous impact

Analyse des résultats expérimentaux

Un tube cylindrique en alliage d'aluminium 6060 T6 a été percé par de deux fentes symétriques. Ce tube est impacté longitudinalement sur le puits de chute. Un flambage symétrique est observé au centre du tube (Figure 4.31) et correspond au lieu du perçage.

Les jauges de déformation, placées en bas du tube, vont permettre de caractériser l'impact. Pendant l'impact, seule la jauge 1 a donné des résultats exploitables. Elle est placée au milieu d'une bande non percée. Sur la figure 4.30, la déformation est tracée en fonction du temps. Un premier pic de déformation est observé. La valeur minimale de la déformation est de 0,22 %.

La caméra rapide permet l'observation de la déformée du tube pendant l'impact. Sur la figure 4.31, le tube est observé pour trois instants différents. À $t=0,625$ ms, la déformation atteint son minimum et le tube commence à flamber. À $t=1,25$ ms, la déformation augmente et le tube plie au niveau des fentes. Le tube ne plie pas au centre des fentes. À $t=3,4$ ms, la déformation oscille autour d'une valeur. Le tube continue à plier. Les deux parties supérieure et inférieure du tube se déforment. La partie supérieure est mise en compression et la partie inférieure en traction. Ces deux parties tubulaires deviennent alors des ellipses désaxées de 90 degrés.

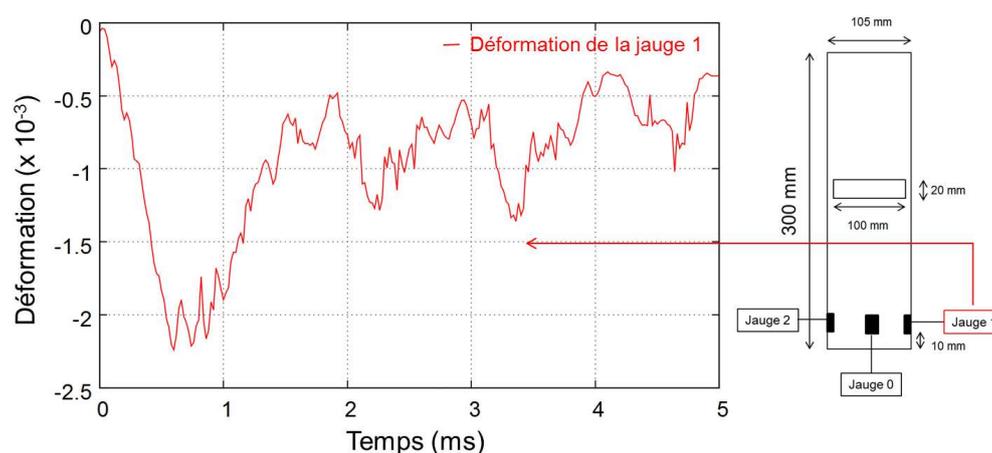


FIGURE 4.30 – Déformations pendant le flambage symétrique.

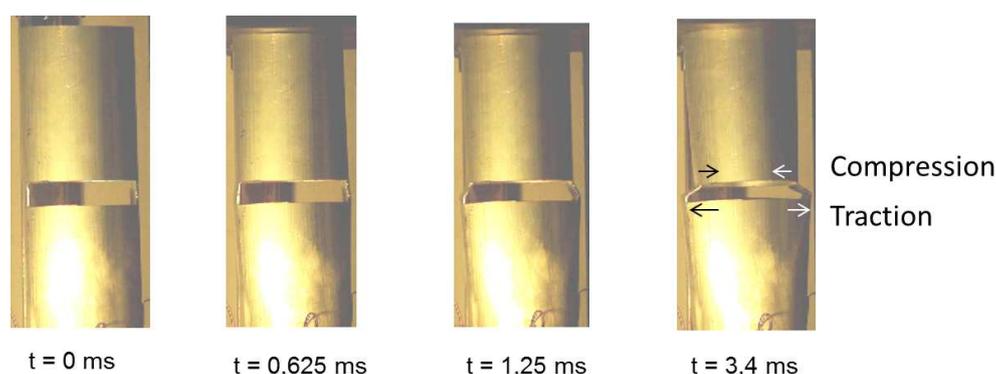


FIGURE 4.31 – Déformées du tube pendant le flambage symétrique.

Comparaison de l'essai et de la simulation numérique

Sur la figure 4.33, les déformations de la jauge 1 et de la simulation numérique sont tracées en fonction du temps. Le premier pic de déformation, sa valeur minimale et sa durée sont similaires à la simulation. Après ce pic, la déformation numérique est quasi-nulle alors que pendant l'essai, elle oscille autour d'une valeur constante. Les déformées expérimentales et numériques sont aussi comparées sur la figure 4.34. Dans la simulation numérique, le flambage apparaît au centre des bandes de perçage ($t=0,625$ ms et $t=1,25$ ms) alors que dans l'expérience le flambage s'effectue vers le bas. À $t = 3,4$ ms, un flambage similaire est observé. Comme observé lors de l'expérience, les deux parties inférieure et supérieure du tube deviennent elliptiques après flambage.

Le modèle numérique permet alors d'obtenir la courbe d'effort pendant l'impact pour le flambage symétrique. Sur la figure 4.35, la force est tracée en fonction du temps. Le pic de force observé est alors de 51 kN et dure environ 1 ms.

La simulation numérique permet l'observation des déformations plastiques équivalentes dans le tube pendant l'impact. La zone de flambage, c'est à dire la bande de perçage (Figure 4.32 (c.)), est plus particulièrement observée. L'onde de choc provoque la propagation d'une onde

élastique dans cette zone. La réflexion de cette onde provoque l'apparition de déformation plastique équivalente (Figure 4.32 (a.) et (b.) (1)) à un instant $t = 0,0096$ ms. La valeur maximale de déformations plastiques se déplace dans la bande (Figure 4.32 (a.) et (b.) (2)) et se stabilise au centre à un instant $t = 0,0505$ ms (Figure 4.32 (a.) et (b.) (3)) pour une valeur de 0,55 %. A cet instant, la déformation plastique est suffisamment concentrée pour que le structure flambe en ce lieu. Ainsi, à l'instar de Karagiozova [Karagiozova 2001], il est montré par la simulation que le flambement est bien dû à l'accumulation de la déformation plastique grâce à la propagation des ondes de choc de déformation élastique. Le flambage est donc élastique suivi d'un post-flambage élasto-plastique.

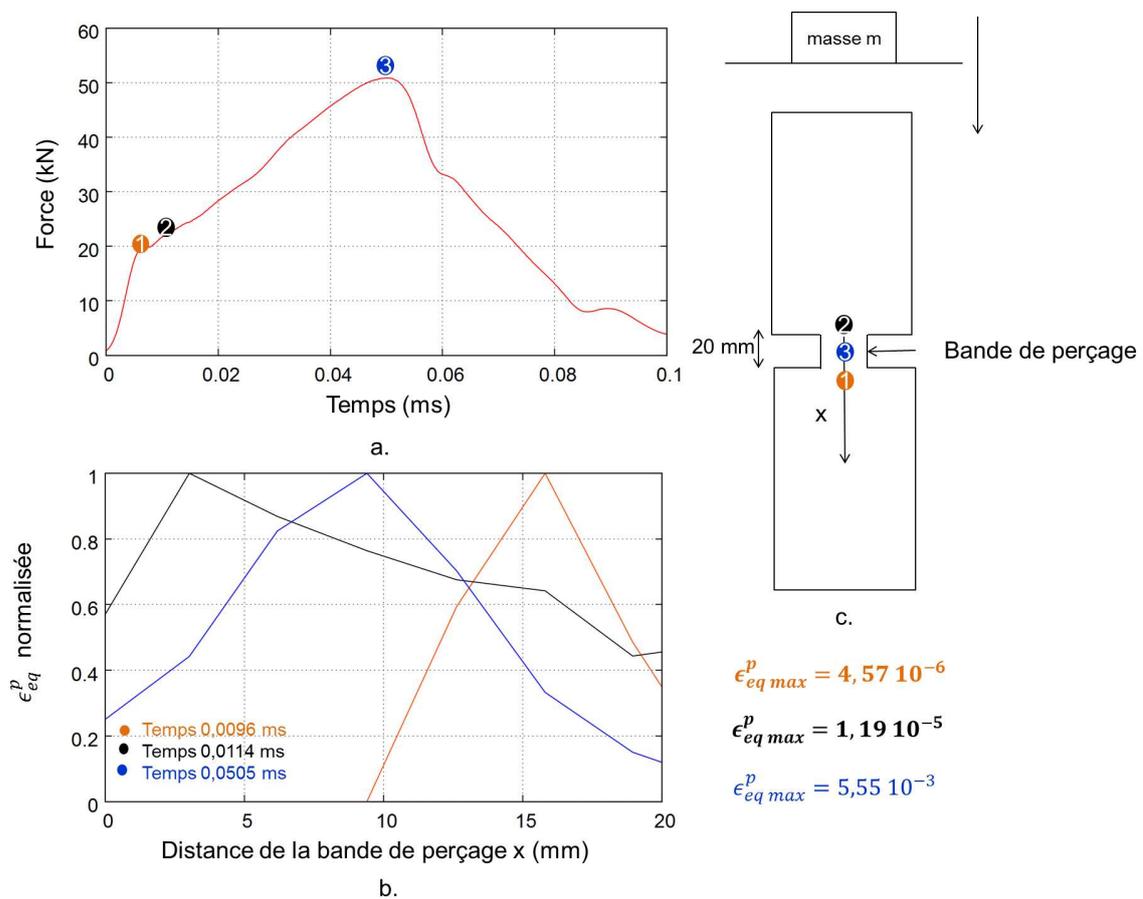


FIGURE 4.32 – Force en fonction du temps pour le premier pic de flambage d'un tube percé (a.) déformation plastique équivalente normalisée avec la déformation plastique équivalente maximale en fonction de la distance de la bande de perçage pour 3 temps différents (b.) schéma de la bande de perçage et position des déformations plastiques maximales au centre de cette bande (c.).

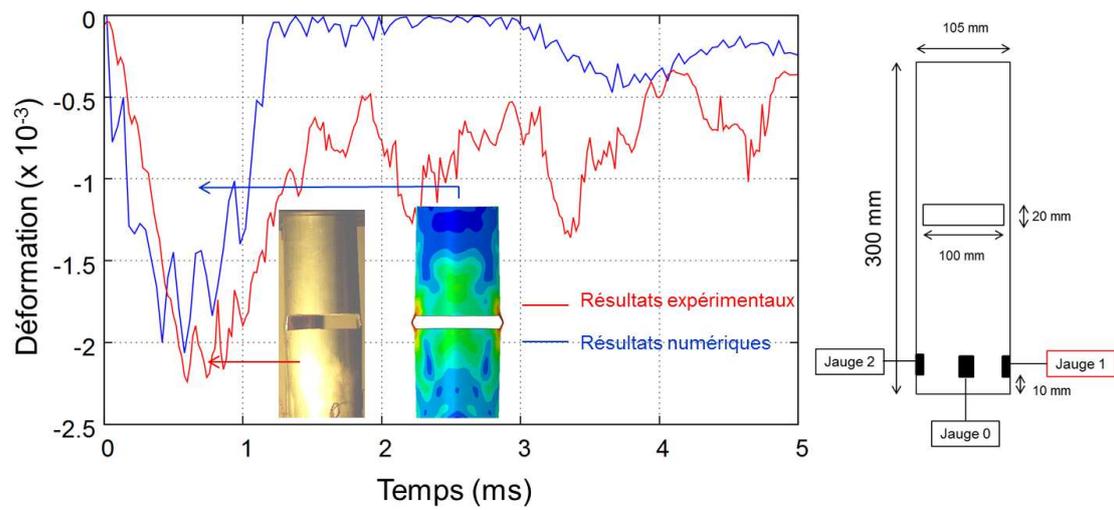


FIGURE 4.33 – Comparaison entre les déformations expérimentales et numériques pendant le flambage symétrique.

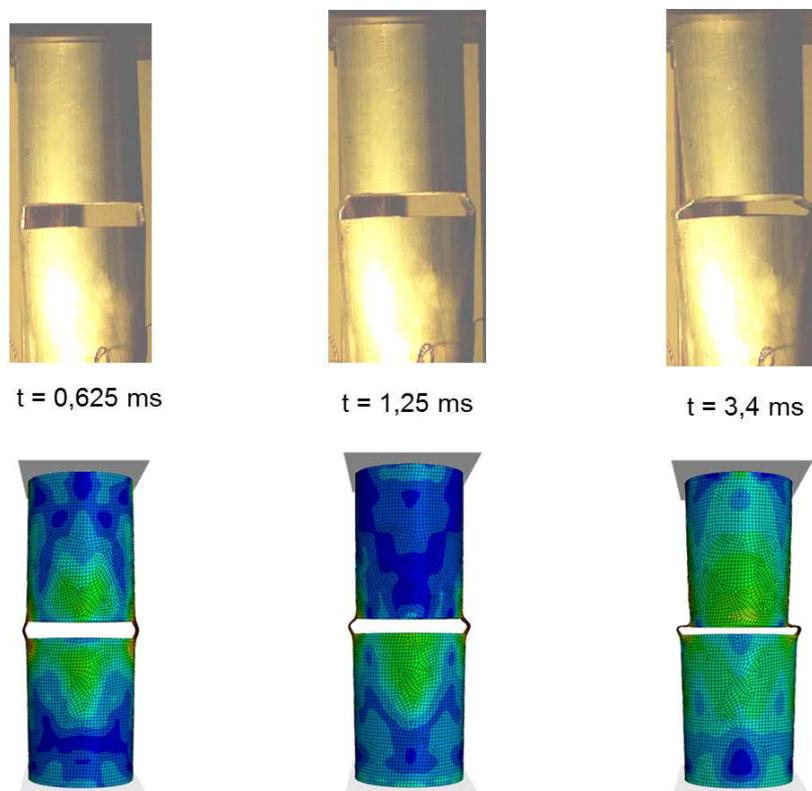


FIGURE 4.34 – Comparaison entre les déformées expérimentales et numériques du tube pendant le flambage symétrique.

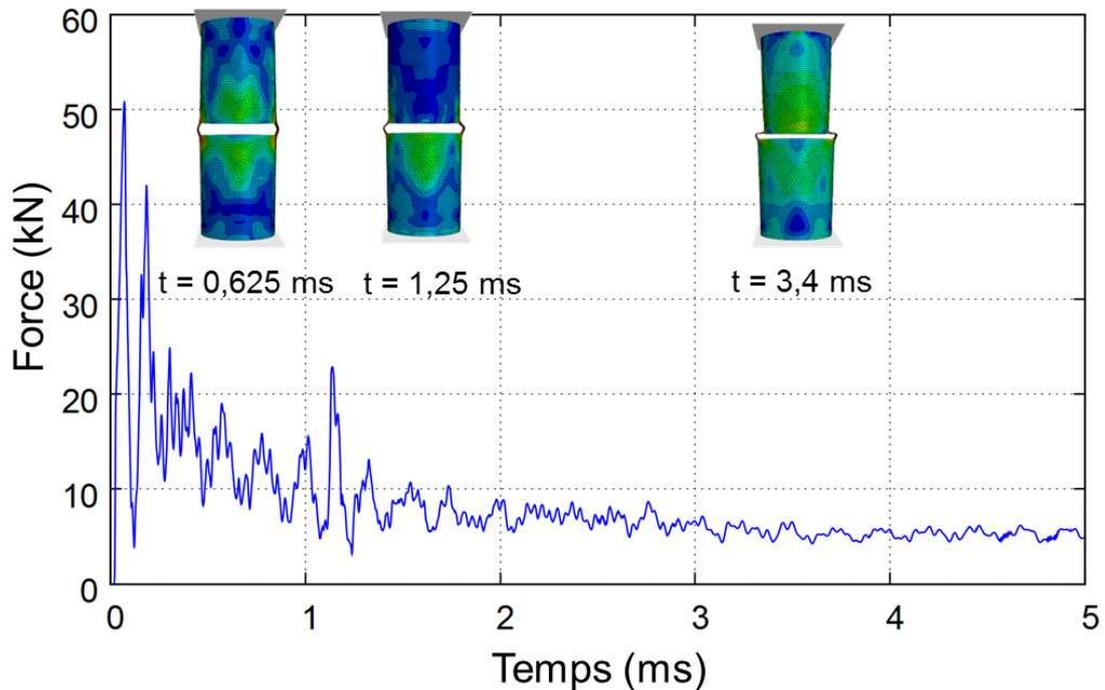


FIGURE 4.35 – Évolution de la force en fonction du temps pour un flambage symétrique.

4.3.3.3 Étude du flambage dynamique asymétrique sous impact

Analyse des résultats expérimentaux

Un tube percé en alliage d'aluminium 6060 T6 est impacté par une plaque de 13 kg. La figure 4.36 montre le tube impacté. Le tube n'a pas été mis en compression symétriquement. Le flambage est donc ici asymétrique (le tube a plié sur la droite).

Les résultats obtenus par les jauges de déformation vont permettre une analyse de l'essai d'impact et une comparaison avec le modèle numérique. Sur la figure 4.37, les déformations relevées sur les différentes jauges sont tracées en fonctions du temps. Ici les valeurs des jauges ne sont pas symétriques. Cette asymétrie peut s'expliquer par la non-planéité des surfaces supérieure et inférieure du tube. Ainsi tout le tube n'est pas forcément en contact avec les plaques pendant l'impact. Les observations sont les suivantes :

- Jauge 0 : Un premier petit pic est observé. Ensuite la jauge oscille autour de 0 ;
- Jauge 1 : Un premier pic de déformation puis un deuxième pic important sont observés. Cette jauge est placée du côté où le pli se réalise ;
- Jauge 2 : Un premier puis un deuxième pic de déformation sont observés. Cette jauge est opposée à la jauge 1 ;
- Jauge 3 : Un premier petit pic est observé. Ensuite la jauge oscille autour de 0.



FIGURE 4.36 – Tube après l'impact pour le flambage asymétrique.

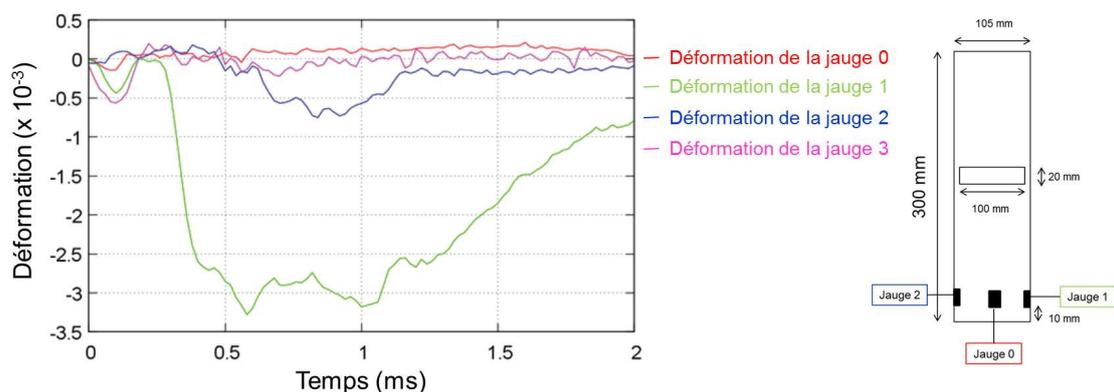


FIGURE 4.37 – Déformations relevées sur les différentes jauges (flambage asymétrique).

Comparaison de l'essai et de la simulation numérique

Pour introduire le flambage asymétrique, la plaque impactante est inclinée de $0,05$ degré dans la simulation. Les déformations obtenues sur les jauges 0 et 3 ne donnent pas de résultats exploitables ici car elles sont quasi-nulles. De plus, la perte de contact ne permet pas de comparer directement les jauges 1 et 2 à la simulation. Les déformations des jauges 1 et 2 sont alors comparées en les moyennant pendant l'impact. Le graphique 4.38 montre les résultats en terme de déformation. Les premiers pics de déformation se superposent pour l'expérience et la simulation. Après ce premier pic, un deuxième pic est observé dans la simulation. Ce pic n'est pas retrouvé lors de l'expérience. Cela montre qu'une fois le flambage commencé le phénomène est plus difficilement modélisable. Contrairement au flambage symétrique, les parties inférieure et supérieure du tube gardent leur forme circulaire.

Comme pour le flambage symétrique, la courbe d'effort pendant l'impact peut être tracée

pour le flambage asymétrique (Figure 4.39). Le pic de force de flambage observé est alors de 40 kN et dure environ 1 ms. La force est comparée sur le même graphique à la force du flambage symétrique. La courbe de force est similaire dans les deux cas, sauf pour la valeur du premier pic de flambage qui est plus importante dans le cas du flambage symétrique. Le tableau 4.8 résume les deux essais de flambage et leur simulation.

Ces forces d'impact sont comparées sur la figure 4.40 en fonction du temps pour l'impact caractéristique du système BELOCOPA à l'eau (80 m/s). Il en résulte une bonne corrélation temporelle entre les pics de force. Dans le cas du flambage, le premier pic de force a une durée de croissance plus longue que pour l'impact à l'eau. La force d'impact à l'eau est 15 fois plus grande que celle du flambage moyen (moyenne des deux pics de flambage symétrique et asymétrique).

Essai	Type de flambage	Type de perçage	F_{max} (kN)
1	symétrique	2 fentes de 20 mm	40
2	asymétrique	2 fentes de 20 mm	51

Tableau 4.8 – Résultats de simulations d'impact sur les tubes percés

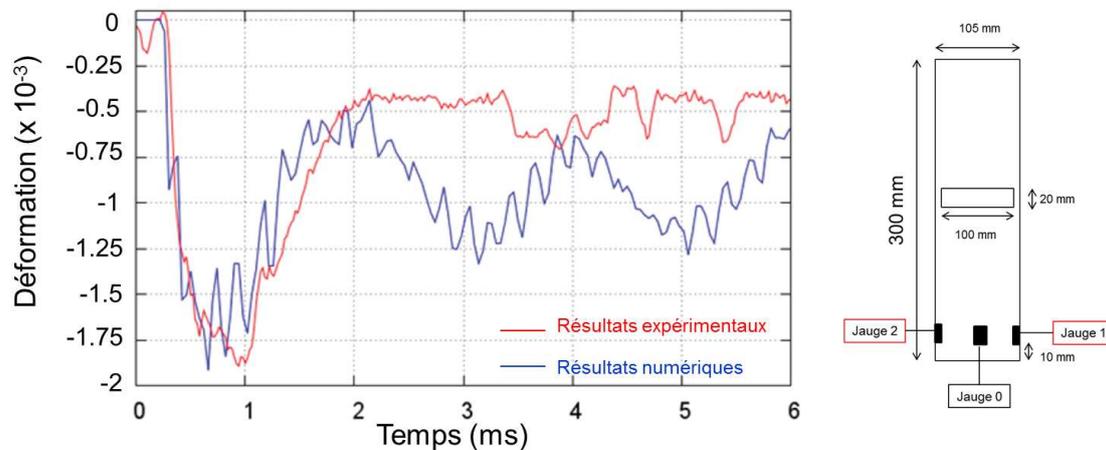


FIGURE 4.38 – Comparaison entre les déformations expérimentales et numériques pendant le flambage asymétrique.

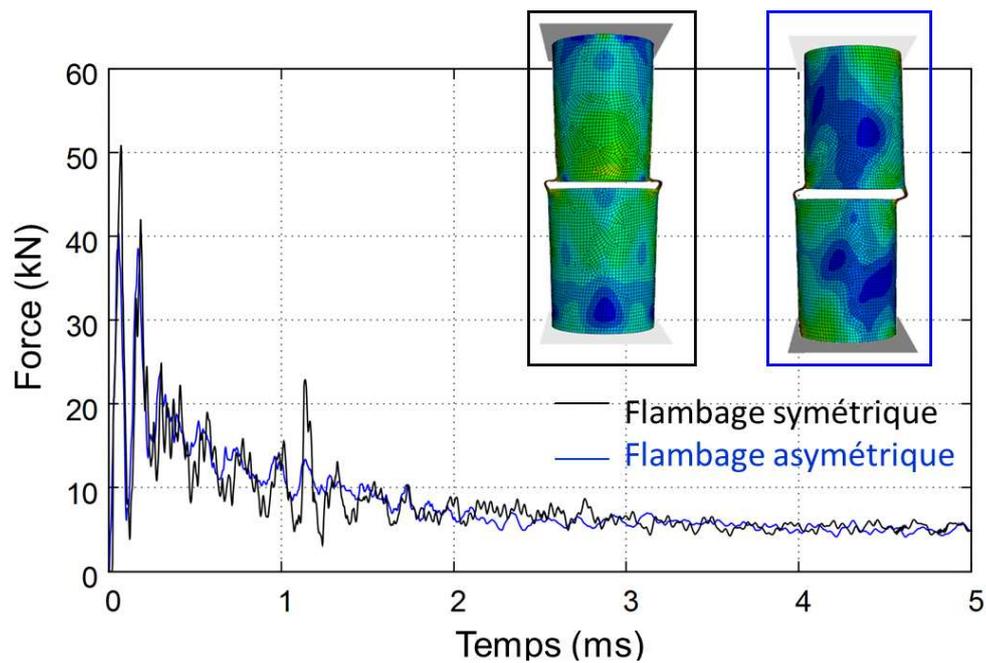


FIGURE 4.39 – Évolution de la force en fonction du temps pour un flambage symétrique et asymétrique.

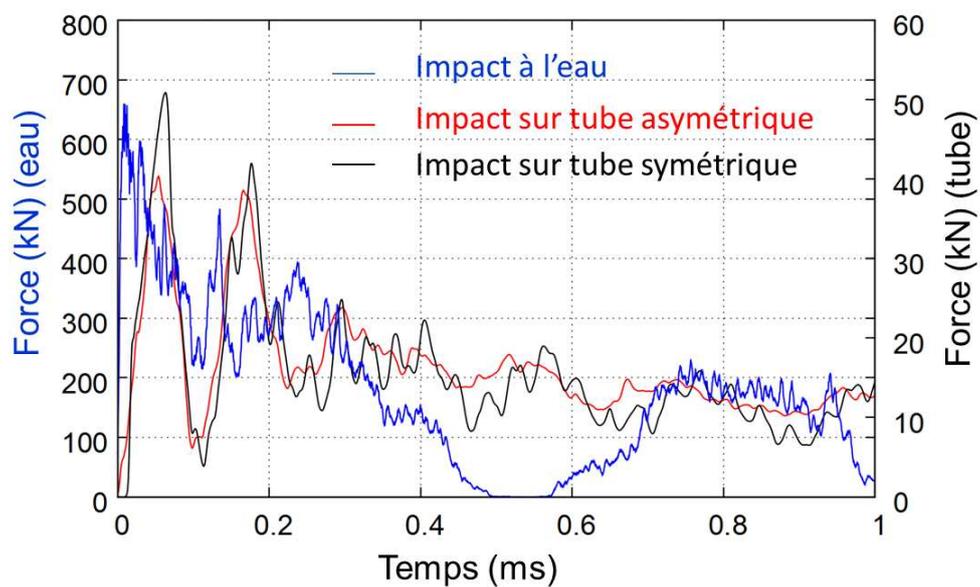


FIGURE 4.40 – Comparaison entre la force d'impact à l'eau et les forces de flambages asymétrique et symétrique.

4.3.4 Conclusion et perspectives

Deux types de flambage, symétrique et asymétrique, ont été étudiés ici. Ce sont les deux cas de flambage possibles lors de l'impact sur un tube percé par deux fentes d'épaisseur 20 mm.

La simulation numérique a été validée à l'aide de l'évolution des déformations, relevées sur le tube, pendant les essais. La fragilité des jauges n'a pas permis d'obtenir des résultats sur toutes les zones instrumentées. Les images relevées par la caméra rapide sont confronté aux résultats éléments finis. Les simulations sont alors utilisées afin d'obtenir l'évolution de la force pendant l'impact. Dans les deux cas de flambage, une courbe de force similaire est observée. Seule la valeur du premier pic de force change. Elle est plus faible dans le cas du flambage asymétrique.

Il est proposé un programmeur d'impact qui reproduit l'effort de l'impact sur l'eau d'un cylindre par le phénomène de flambage dynamique de structures tubulaires métalliques. L'effort à l'impact à l'eau est 15 fois supérieur que l'impact sur tube (Figure 4.40). Pour garantir un même niveau, il est proposé un essai composé d'une plaque associée au système (masse de 195 kg (15 x 13 kg)) qui vient impacter de façon axiale, avec une vitesse de 5 m/s, 15 tubes percés par deux fentes d'épaisseur 20 mm en alliages d'aluminium de désignation 6060 T6. La figure 4.41 illustre une solution pour cette configuration. Cet essai permettra de garantir l'intégrité des composants du système BELOCOPA à l'impact à l'eau.

Dans le cas de l'impact à l'eau, la pression en chaque point du tube évolue en fonction du temps sous forme d'un pic. Cette évolution de pression n'est pas retrouvée dans le cas du flambage sur un tube. Dans ce dernier cas, la pression est équi-répartie. Il est possible d'imaginer un programmeur d'impact qui reproduit en chaque point ou en chaque zone du système l'évolution de la pression à l'impact. Pour cela il faudrait un nombre n de structures flambantes pour chacune de ces zones. Une première solution est schématisée sur la figure 4.42. Dans celle ci, le programmeur est divisé en trois parties ($n = 3$). Chaque partie est composée d'un tube qui par flambement vient reproduire une courbe de pression visée. Pour des raisons d'encombrement, ces solutions théoriques semblent difficiles à mettre en oeuvre.

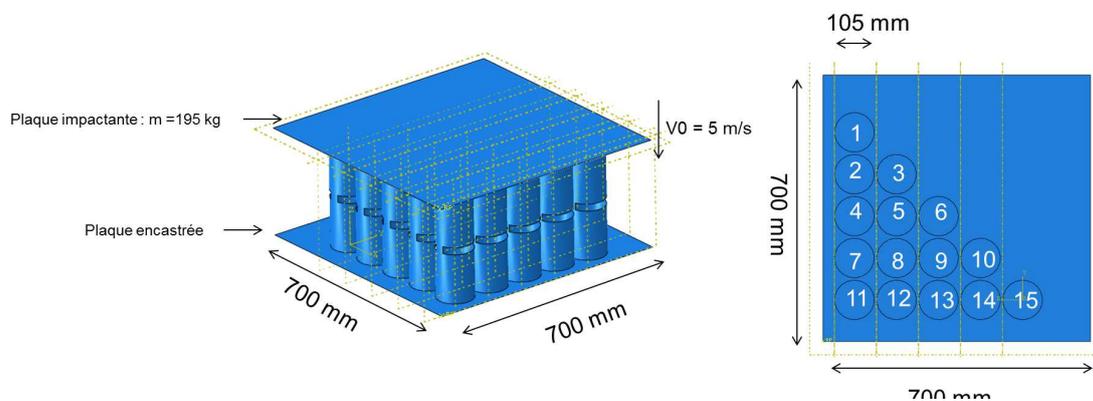


FIGURE 4.41 – Programmeur d'impact équivalent au crash du système BELOCOPA en mer en terme de force.