

Flambage dynamique de coques cylindriques minces soumises à un pulse de pression externe

V. Thierry¹, B. Tang¹, P. Joffrin², T.T. Bui³, A. Limam⁴

¹ DLA, Centre National d'Etudes Spatiales, victor.thierry.utc@gmail.com, benoit.tang@cnes.fr

² RRO, Université Gustave Eiffel, Bron, patrick.joffrin@univ-eiffel.fr

³ GEOMAS, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, tan-trung.bui@insa-lyon.fr

⁴ MATEIS, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, ali.limam@insa-lyon.fr

Résumé — Le moteur d'un lanceur et sa tuyère, une structure coque de forme complexe, sont soumis à de nombreux efforts dynamiques, cependant ces structures sont dimensionnées en quasi-statique. Le flambage dynamique des coques minces sous pulse de pression externe a été très peu investigué. Un travail de recherche est donc en cours pour analyser ce type de flambage sur une configuration géométrique représentative du divergent du lanceur Ariane. Ici, la géométrie simplifiée considérée est une coque cylindrique. Cette contribution, traite du flambage dynamique de ce modèle, tant du point de vue expérimental que de la simulation numérique.

Mots clés — Flambage dynamique, Coque cylindrique mince, Pulse de pression externe.

1 Introduction

Le flambage est un phénomène mécanique traduisant généralement l'instabilité d'une structure. Ce phénomène est caractéristique des structures élancées et se traduit par l'apparition d'un mode de déformation non sollicité suite à l'atteinte d'une charge importante.

Une des premières études de flambage dynamique est proposée par Hoff et al. en 1953 [1]. Ils étudient le flambage d'une arche plate soumise à une charge dynamique latérale et découvrent que la charge critique dynamique est largement supérieure à la charge critique quasi-statique. Ces conclusions ont été retrouvées par la suite dans de nombreuses publications [2, 3, 4, 5, 6]. Par la suite, Zaczynska et al. [2] étudient numériquement l'instabilité dynamique des coques cylindriques minces en composite sous pulse de compression axiale. Ils découvrent qu'augmenter la durée du pulse fait diminuer considérablement la charge critique.

Linberg et al. en 1966 [7] ont étudié expérimentalement un autre phénomène du flambage dynamique. Ils ont soumis une coque cylindrique à un pulse de compression axiale et ont filmé les essais à l'aide d'une caméra très rapide (240 000 images par secondes). Ils observent que le mode de ruine semble être identique au mode de flambage, alors que ce n'est pas le cas en quasi-statique. Grâce à la caméra rapide, le mode de flambage avant la ruine a été observé et il a été confirmé que la structure n'a "pas le temps" de changer de mode de déformation.

Plusieurs critères de flambage existent : en 1962, Budiansky and Roth [8] étudient le comportement axisymétrique d'une coque sphérique de faible profondeur soumise à un chargement dynamique. Ils ont proposé un critère pour identifier la charge critique dynamique : charge pour laquelle l'amplitude de la réponse transitoire augmente considérablement pour une faible augmentation de la charge. Ce critère a été largement utilisé par la suite [9, 2, 3, 4, 5, 10, 11]. D'autres critères de flambage dynamique ont été proposés, notamment la méthode d'énergie potentielle totale, aussi appelée critère de Hoff-Simitses [1, 12]. Dans ce cas, l'énergie potentielle totale, l'énergie de déformation, l'énergie cinétique et le travail extérieur du système total sont étudiés en fonction du temps. Tant que les courbes oscillent de manière harmonique, la charge critique n'est pas atteinte. Lorsque la charge critique dynamique est atteinte, la structure libère de l'énergie et donc l'oscillation n'est plus visible. L'avantage de ce critère sur celui de Budiansky-Roth est qu'il est plus global et il n'y a pas à choisir de points en particulier à surveiller pendant l'analyse [4].

Il existe peu d'études expérimentales du flambage dynamique de coques par pulse de pression ex-

terne. On peut cependant citer le travail de Duong et al. [13, 14] qui proposent dans une double publication l'étude expérimentale d'un réservoir cylindrique soumis au souffle d'une explosion. Une réduction de modèle est proposée pour les essais expérimentaux. La première publication de cette série se concentre sur la caractérisation de l'onde de choc provoquée par l'explosion tandis que la seconde se porte sur les résultats des essais ainsi que sur le développement d'un modèle analytique. Le gaz provoquant l'explosion est un mélange de propane et d'oxygène. Le mélange est contenu dans une bulle de savon.

Dans cet article, une méthodologie permettant d'observer le flambage dynamique de coques cylindriques par pulse de pression externe est proposée. Des résultats d'essais expérimentaux sont comparés avec un modèle de simulation numérique.

2 Étude expérimentale

Pour notre étude expérimentale, des essais d'explosion sont menés en champ libre.

2.1 Spécimens d'essais et instrumentation

Afin de mieux comprendre la phénoménologie du flambage dynamique, l'étude est menée sur une géométrie simplifiée. Trois coques cylindriques en acier d'épaisseur 0,1mm, de diamètre 110 mm et de hauteur 150 mm ont été testées. Pour la fabrication des échantillons, des plaques d'acier sont découpées dans un feuillard acier, puis roulées et collées autour de brides massives jugées infiniment rigides. Une barre filetée en acier sert d'axe central, un système d'écrous et contre-écrous permet de reprendre l'effort axial 1.

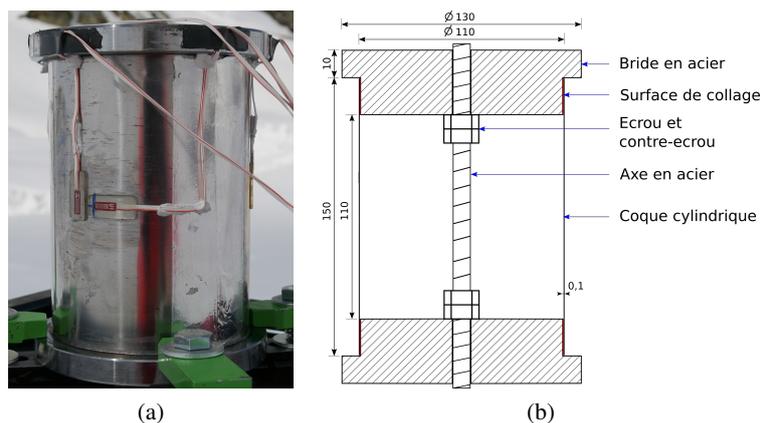


FIGURE 1 – (a) Photographie de la coque cylindrique avant essais. (b) Schéma d'une coupe de la coque cylindrique.

Le matériau constitutif des coques a été caractérisé, des essais de tractions ont été menés sur des éprouvettes normalisées usinées selon le sens circonférentiel et axial du cylindre.

Pour générer le pulse de pression externe, un explosif de type EMULSTAR M-40, une émulsion encartouchée conçu pour un usage de déclenchement d'avalanche a été utilisé. La vitesse de détonation de la réaction est supérieure à 5,3 km/s et libère en moyenne une énergie totale de 4,81 MJ/kg.

Deux caméras rapides Fastcam Mini WX50 de la marque Photron, munies chacune d'un objectif Canon ultrasonic 70-200 sont utilisées pour filmer l'essai. Diamétralement opposées et cadrées sur la coque, elles permettent d'évaluer l'apparition d'un cloquage. Les films sont enregistrés à une fréquence de 3000 images par seconde.

Deux sondes PZT de surpression (modèle PCB 137B25) sont utilisées pour quantifier les variations temporelles de la sollicitation de pression dynamique au voisinage de la coque (voir figure 2).

Six jauges de déformation unidirectionnelles (modèle WFLA-6-11-5LDBTB de Tokyo-Sokki) de longueur 6 mm, sont collées en peau externe du spécimen en six points, à mi-hauteur de la coque, trois dans la direction circonférentielle et trois selon le sens axial, dans les deux cas espacées entre elles de 120° .

Une centrale d'acquisition, composée de deux modules de type SIRIUS STGM 8 voies chacun, nous permet l'enregistrement de toutes les mesures à la fréquence d'échantillonnage de 20 kHz.

2.2 Méthode

La figure 2 donne une vue globale de l'installation. On y précise le positionnement de la coque sur un trépied, à environ 1 m du sol pour éviter une réflexion trop rapide de l'onde incidente, ainsi que l'instrumentation et l'explosif utilisé.

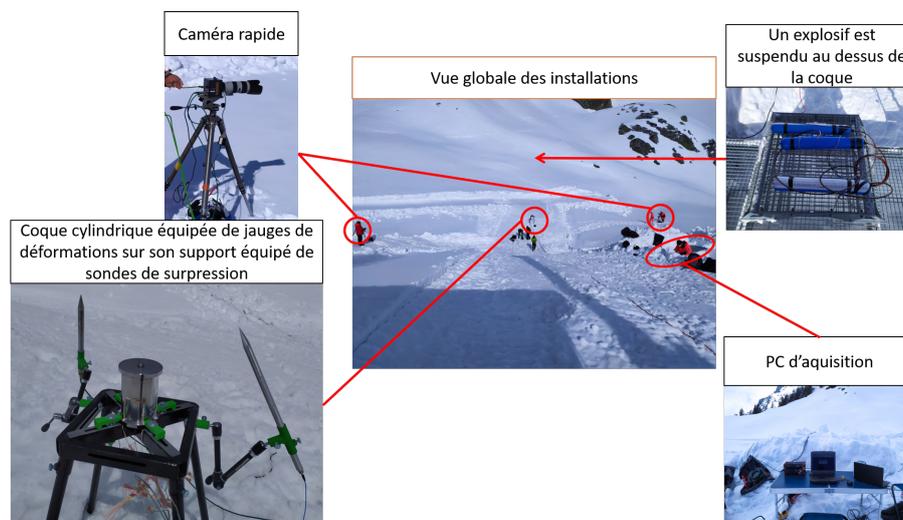


FIGURE 2 – Vue d'ensemble de l'installation.

Un système CATEX (Cable Transporteur d'EXplosifs) par MONTAZ, est utilisé pour suspendre les explosifs au dessus de la coque, dans son axe de symétrie. La hauteur à laquelle est placée la charge explosive est réglable, ce qui permet de faire varier l'intensité maximale de surpression.

2.3 Protocole d'essai et remarques préliminaires

L'objectif de ces essais est d'observer le flambage dynamique des coques cylindriques et de déterminer la charge critique. Dans ce but, la première coque a été soumise à une série d'explosions avec une pression maximale croissante pour chaque essai (le tableau 1 résume les paramètres des essais). Les conditions d'essais et la taille des fichiers ne nous permettant pas de traiter les données acquises entre chaque essai, notamment les déformations mesurées par les jauges, on détermine que le flambage dynamique est atteint lorsque la coque présente des déformations résiduelles visibles. Lorsque le flambage est atteint pour cette coque, on répète le même essai (charge et distance) sur une nouvelle coque intacte pour corroborer l'apparition du flambage. Ainsi Le flambage a été à nouveau observé sur la coque. Pour la troisième et dernière coque, nous avons essayé de mieux caractériser la charge critique. Après cette série d'essais, nous avons pu conclure que la charge critique se situe entre 42,2 et 55,6 kPa. En effet, à 42,2 kPa enregistrée, on n'observe pas de déformations résiduelles tandis qu'à 55,6 kPa on observe des ondulations rémanentes.

On observe dans le tableau 1 que la pression maximale enregistrée diminue lorsque la distance entre la source et le point d'observation augmente. Cette baisse d'intensité est due à l'expansion de la sphère de l'onde en fonction du temps, qui suit l'explosion. Les courbes de surpression obtenues lors de nos essais sont normées et présentées dans la figure 3. Le temps caractéristique de ces courbes, c'est à dire la durée du premier et du second pic, de la dépression etc., est similaire à celui d'un pulse classique généré par une explosion [13].

TABLE 1 – Résumé des essais.

Essai #	Coque #	Charge (kg)	Distance (m)	Pression maximale (kPa)	Observations
1	1	1,440	10	13,4	RAS
2	1	1,440	4	42,2	RAS
3	1	1,920	4	52,9	Légères déformations à peine visible mais identifiable au toucher
4	1	1,920	2	117	Flambage visible
5	2	1,920	2	Pb acquisition	Flambage visible
6	3	1,920	4	55,6	Légères déformations à peine visible
7	3	1,920	3	61,9	Flambage visible comme essais #4 et #5 mais non axisymétrique

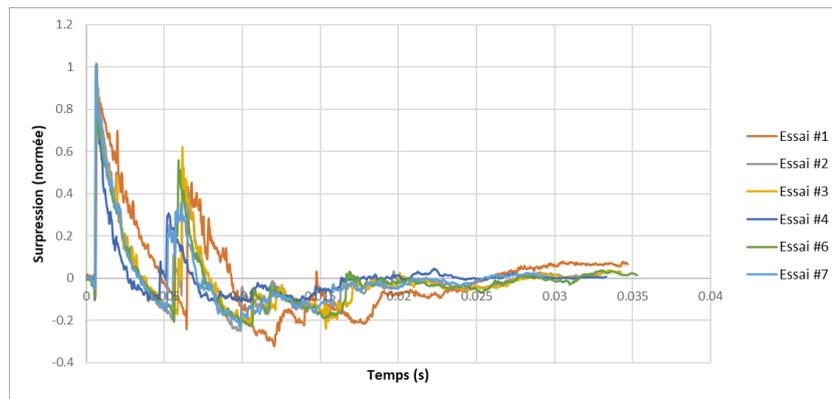


FIGURE 3 – Pulses de surpression enregistrés au voisinage immédiat de la coque pour les différents essais. Le paramètre surpression est normé pour comparer les temps caractéristiques.

3 Comparaisons simulations/essais

3.1 Modèle de simulation

Conditions aux limites La coque est collée de part et d’autre aux brides inférieure et supérieure. La hauteur collée est superposée à la bride sur 20 mm. La hauteur utile de la coque est donc de 110 mm. On considère que les deux extrémités de la coque sont rigides avec leurs brides respectives encastrées (voir figure 4).

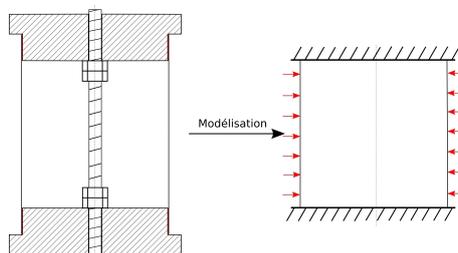


FIGURE 4 – Conditions aux limites.

Éléments et maillage Les éléments coque S4R sont des éléments quadrilatères composés de quatre noeuds. Ils sont robustes et adaptés pour de nombreuses applications. Ils sont les éléments de choix pour la discrétisation de notre modèle de coque cylindrique. Après une étude de convergence, on fixe la dimension des éléments à 1,4 mm, ce qui génère un modèle d’environ 20 000 noeuds.

Critère de flambage dynamique Dans cette étude, on utilisera le critère de flambage de Budiansky-Roth, mais au lieu de suivre un point en particulier (comme c'est normalement le cas) et ainsi d'avoir un critère local, on évalue ce critère pour tous les noeuds du maillage, ce qui en fait un critère global.

3.2 Comparaison préliminaire

La comparaison préliminaire consiste d'une part à déterminer par la simulation la charge critique dynamique de flambage et à comparer avec le pulse pour lequel on a observé expérimentalement le flambage. Pour déterminer la charge critique dynamique par la simulation, on applique le pulse de surpression enregistré par la sonde à notre modèle en variant l'amplitude maximale de ce pulse (ΔP^+), et l'on extrait le maximum d'amplitude de déplacement (magnitude) de tous les noeuds du modèle. On a donc pour chaque pulse (désigné par sa valeur ΔP^+) une valeur de déplacement maximale. Lorsque pour une faible variation de ΔP^+ , on a une grande variation du déplacement maximal, alors on a flambage (d'après le critère de Budiansky-Roth). On fait figurer une verticale correspondante à la valeur ΔP^+ pour chaque essai expérimental. Dans un second temps, on compare visuellement le mode de flambage post-critique entre la simulation et les essais.

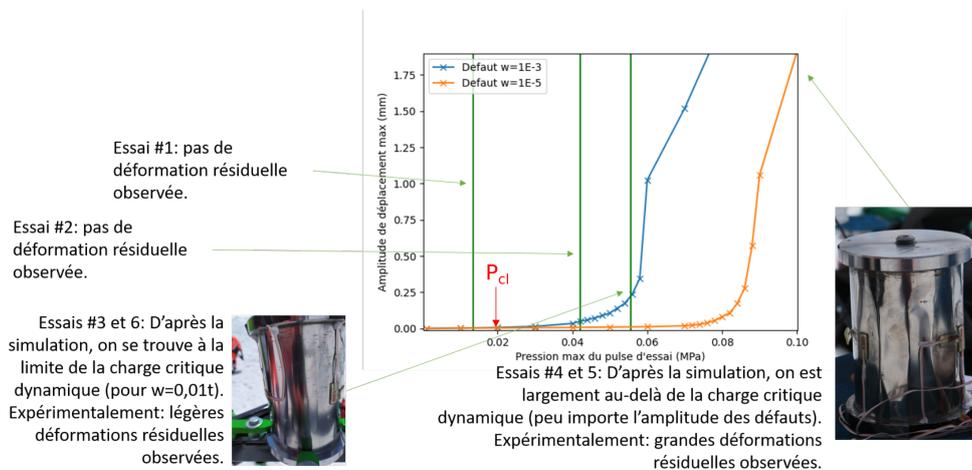


FIGURE 5 – Déplacement maximal fonction de l'intensité du pulse de pression. Les verticales représentent les pressions des essais ΔP^+ . P_{cl} est la pression classique. Comparaison préliminaire avec les observations d'essais.

Une analyse des valeurs propres en quasi-statique a permis d'établir la pression critique de flambage pour une structure sans défauts initiaux, elle est aussi appelée la pression classique (P_{cl}) et vaut 19,8 kPa. Une analyse "Riks" a établie la pression critique en quasi-statique à 17,8 kPa pour une amplitude de défauts initiaux de $w=1E-5$ (ce qui correspond à $w=0.0001t$). Une analyse similaire sur une coque dont les défauts initiaux sont de $w=1E-3$ (ce qui correspond à $w=0.01t$) n'a pas permis d'identifier la pression critique puisqu'il n'y a pas de changement brusque de pente. Les résultats de simulations dynamiques présentés dans le graphique en figure 5, montrent que pour une amplitude de défauts de $w=1E-5$, le flambage dynamique apparaît pour un pulse d'explosion dont le ΔP^+ se situe entre 70 et 80 kPa. Alors que pour une amplitude de défauts de $w=1E-3$, le flambage apparaît plutôt entre 40 et 50 kPa. Avec les défauts initiaux d'amplitude $w=1E-3$, lorsque l'on considère les pulses de pressions pour lesquels le flambage est observé, on a une bonne corrélation entre l'expérimental et la simulation (voir figure 5). On a d'ailleurs observé visuellement une corrélation du mode de déformation avec $n=11$ (voir figure 6). Cependant, bien que le flambage soit observé pour les mêmes pulses de pression en expérimental et en simulation, les déformations résiduelles (observées après retour à l'équilibre de la structure) sont visuellement peu semblable. Lorsque l'on considère des défauts initiaux d'amplitude $w=1E-5$, en simulation, le flambage n'est plus observé pour un pulse de pression maximale d'environ 60kPa, alors qu'il l'est expérimentalement.

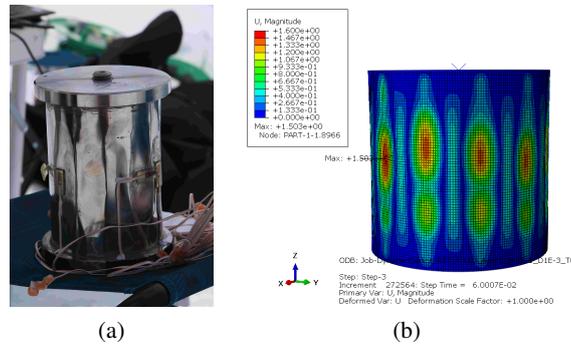


FIGURE 6 – (a) Photographie de la coque cylindrique après essai ($\Delta P^+ = 120$ kPa). (b) Coque après simulation du même essai.

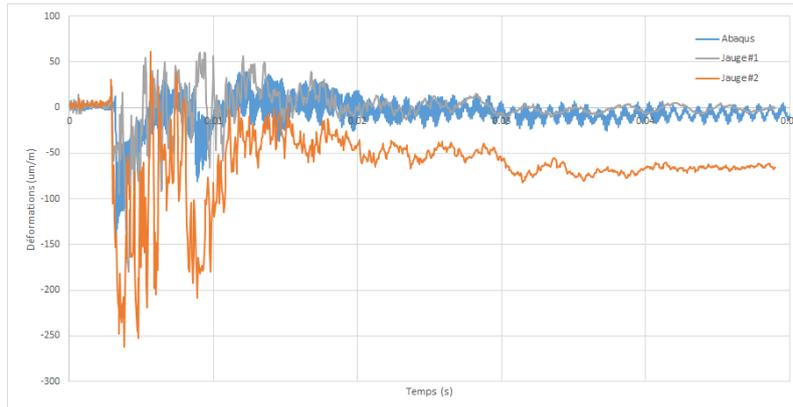


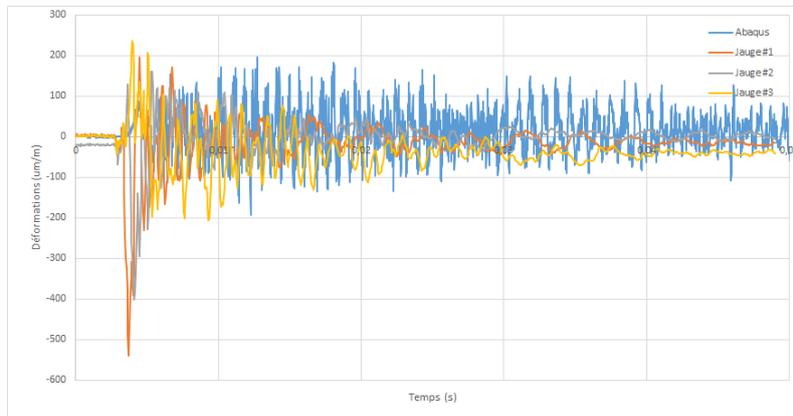
FIGURE 7 – Évolution temporelle (secondes) des déformations ($\mu m/m$) mesurées par les jauges circumférentielle, lors de l'essai #2, et les prévisions numériques, pour un défaut d'amplitude $w=1E-5$.

3.3 Comparaison des mesures de déformations

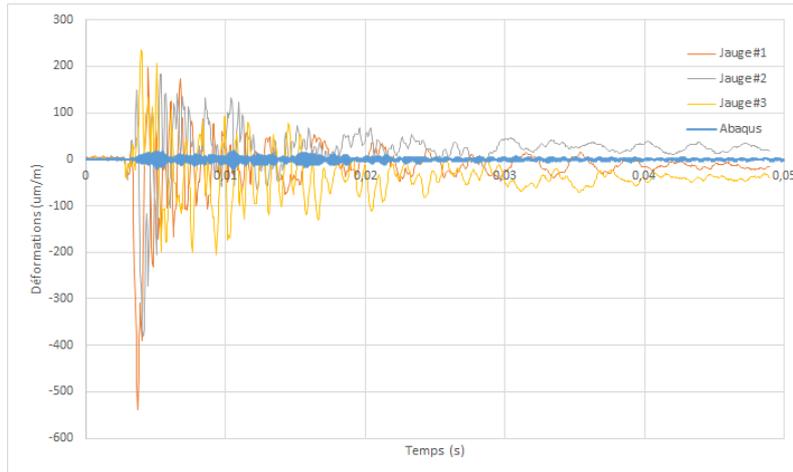
Les jauges de déformations ont une longueur utile de 6 mm, ce qui correspond dans le modèle Abaqus à environ quatre éléments de côté 1,4 mm, c'est pourquoi les résultats de simulation sont moyennés sur quatre éléments. Les variables qui nous intéressent dans Abaqus sont les déformations logarithmiques (LE), qui représentent les déformations réelles. Dans notre cas, LE11 et LE22 représentent respectivement la déformation dite circumférentielle et axiale (les directions 1 et 2 sont données par l'orientation des éléments et équivalent donc aux directions d'un repère cylindrique).

Essai #2 En considérant des défauts initiaux peu important ($w=1E-5$), on retrouve la forme de la courbe de déformation circumférentielle avec la simulation et les ordres de grandeurs sont similaires aux mesures (voir figure 7). Pour ce qui est des jauges axiales, nous n'avons pas été en mesure de retrouver les résultats mesurés, quelle que soit l'amplitude des défauts initiaux (voir figure 8).

Essai #3 On compare à nouveau les mesures aux résultats de simulations pour un modèle dont les défauts initiaux ont une amplitude de $w=1E-5$. Une fois encore, une bonne corrélation est observée pour les déformations circumférentielles. En axial, les ordres de grandeurs sont différents et la corrélation n'est pas observée.



(a)



(b)

FIGURE 8 – Évolution temporelle (secondes) des déformations ($\mu m/m$) mesurées par les jauges circonférentielle, lors de l'essai #2, et les prévisions numériques, (a) pour un défaut d'amplitude $w=1E-3$, (b) pour un défaut d'amplitude $w=1E-5$.

4 Conclusions

Des essais de flambage dynamique sous pulse de pression externe et leurs simulations numériques nous ont permis les conclusions suivantes :

- On observe une corrélation essais/calculs de la charge critique dynamique pour un modèle dont l'amplitude des défauts initiaux est de l'ordre de $w=1E-3$.
- Nous constatons aussi une corrélation du mode de déformation ($n=11$).
- Il est généralement plus délicat de corréler mesures locales et simulations dans le cas du flambage quasi-statique sous pression externe du fait de la présence des défauts géométriques. Nous obtenons ici en différents points de la coque une corrélation des déformations mesurées par les jauges circonférentielles et simulées, ceci pour les essais #2 et #3 et pour un modèle dont l'amplitude des défauts initiaux est de $w=1E-5$. Cependant, les déformations axiales mesurées n'ont pas pu être corrélées.

Par la suite, la méthodologie sera appliquée à des modèles de coques coniques dont la sensibilité aux défauts initiaux est moins importante que pour les coques cylindriques. On étudiera aussi l'influence de vibrations sinusoïdales combinées au pulse de pression externe sur les coques minces. Finalement, la méthodologie de simulation sera appliquée à une configuration proche du cas industriel du divergent du lanceur d'Ariane.

5 Remerciements

Nos remerciements à l'équipe du domaine skiable de la Flégère de la Compagnie du Mont Blanc, plus particulièrement à Jeannot Bellin et Arnaud Trinquier, pour la mise en oeuvre des explosifs détonants. Nous remercions aussi Phillipe Berthet-Rambaud de la société Engineerisk pour l'organisation des essais. Enfin, nos remerciements à Nicolas Vermorel et Christophe Pruvost de l'Université Gustave Eiffel pour le support technique relatif aux essais.

Références

- [1] Nicholas John Hoff and Victor G. Bruce. Dynamic analysis of the buckling of laterally loaded flat arches. *Journal of Mathematics and Physics*, 32(1-4) :276–288, 1953.
- [2] Monika Zaczynska, Haim Abramovich, and Chiara Bisagni. Parametric studies on the dynamic buckling phenomenon of a composite cylindrical shell under impulsive axial compression. *Journal of Sound and Vibration*, page 115462, 2020.
- [3] Chiara Bisagni. Dynamic buckling of fiber composite shells under impulsive axial compression. *Thin-Walled Structures*, 43(3) :499–514, March 2005.
- [4] A. Rostamijavanani. Dynamic Buckling of Cylindrical Composite Panels Under Axial Compressions and Lateral External Pressures. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, pages 1–10, 2020.
- [5] Jerome M. Klosner and Robert S. Roth. Nonlinear response of cylindrical shells subjected to dynamic axial loads. *AIAA Journal*, 2(10) :1788–1794, 1964.
- [6] D. G. Zimecik and R. C. Tennyson. Stability of circular cylindrical shells under transient axial impulsive loading. *AIAA Journal*, 18(6) :691–699, 1980.
- [7] H. E. Lindberg and R. E. Herbert. Dynamic buckling of a thin cylindrical shell under axial impact. 1966.
- [8] Bernard Budiansky. Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells. *NASA TN*, 1510 :597–606, 1962.
- [9] Xiaozhi Huyan and George J. Simitses. Dynamic buckling of imperfect cylindrical shells under axial compression and bending moment. *AIAA journal*, 35(8) :1404–1412, 1997.
- [10] A. C. Shiau, R. S. Roth, and T. T. Soong. Dynamic buckling of conical shells with imperfections. *AIAA Journal*, 12(6) :755–760, 1974.
- [11] A. H. Sofiyev. On the dynamic buckling of truncated conical shells with functionally graded coatings subject to a time dependent axial load in the large deformation. *Composites Part B : Engineering*, 58 :524–533, 2014.
- [12] George John Simitses. Dynamic snap-through buckling of low arches and shallow spherical caps. 1965.
- [13] Duy-Hung Duong, Jean-Luc Hanus, L Bouazaoui, Olivier Pennetier, J Moriceau, Gaetan ProdHomme, and Mathieu Reimeringer. Response of a tank under blast loading–part I : experimental characterisation of blast loading arising from a gas explosion. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(9) :1023–1041, 2012. Publisher : Taylor & Francis.
- [14] Duy-Hung Duong, Jean-Luc Hanus, L Bouazaoui, X Regal, Gaetan ProdHomme, E Noret, Thierry Yalamas, Mathieu Reimeringer, Patrice Bailly, and Olivier Pennetier. Response of a tank under blast loading-Part II : Experimental structural response and simplified analytical approach. *European journal of environmental and civil engineering*, 16(9) :1042–1057, 2012. Publisher : Taylor & Francis.