

COMPORTEMENT DE RESERVOIRS SOUS PRESSION A DES IMPACTS HYPERVELOCES

P. Deconinck, F. Plassard, J. Mespoulet, P. Héreil, P. Thiot. Thiot Ingénierie, Route Nationale, 46130 Puybrun. Téléphone : 05 65 38 36 07, Adresse électronique : recherche@thiot-ingenierie.com

Mots clés : débris spatiaux, impact hypervélocé, réservoir sous pression, composite, simulation

1. INTRODUCTION

Dans le contexte de la réduction des risques liés aux débris spatiaux, cette étude présente la vulnérabilité de réservoirs sous pression à l'impact de projectiles hypervéloces. Il est essentiel de connaître la limite entre un régime de perforation et un régime d'éclatement en fonction de la pression interne mais également des conditions d'impact (vitesse, masse de projectile, angle d'incidence, etc). Les premières études ont été réalisées par la NASA (Stepka *et al.*, 1963) et concernent l'impact de réservoirs remplis de liquide avec l'analyse des paramètres conduisant à leur explosion. D'autres études ont suivis à la NASA sur ce sujet (Whitney et White, 1992 – Whitney, 1993 – Christiansen *et al.*, 1997 – Mullin *et al.*, 1997). L'EMI et l'ESA ont réalisé de nombreux travaux expérimentaux, numériques et analytiques sur la vulnérabilité de réservoirs sous pression (Lambert et Schneider, 1997 – Schäfer *et al.*, 1997 – Telitchev *et al.*, 1999 – Palmieri *et al.*, 2001). Ils ont mis en évidence l'évolution du nuage de débris et sa décélération par le gaz sous pression. Le premier objectif des travaux présentés dans cet article est d'analyser l'influence de la pression interne sur les modes de ruptures de réservoirs impactés par une bille en aluminium de 8 mm de diamètre. Le second objectif est de mettre au point un modèle numérique capable de reproduire les principaux phénomènes observés expérimentalement. L'originalité de ce travail réside dans la gamme de pression explorée, qui s'étend jusqu'à la pression maximale admissible des réservoirs.

2. CONFIGURATION EXPERIMENTALE

Deux essais sont présentés dans cet article : l'un pour une pression interne atmosphérique (1 bar) et l'autre à 300 bar. Ces essais hypervéloces à 4400 m.s^{-1} ont été réalisés à l'aide du lanceur à gaz double-étage HERMES au laboratoire de physique des chocs de Thiot Ingénierie. La figure (1) représente la configuration expérimentale. La vitesse du projectile est mesurée à l'aide de barrières optiques avant l'impact. Deux tubes RX sont utilisés pour visualiser l'état du réservoir et du projectile après l'impact. La vitesse de surface libre en face arrière est mesurée au moyen d'un vélocimètre hétérodyne (VH). Le réservoir est composé d'un liner en aluminium (épaisseur variable de 2 à 4mm) enveloppé par plusieurs couches circonférentielles et croisées ($-45^\circ/+45^\circ$) de composites carbone/époxy et verre/époxy.

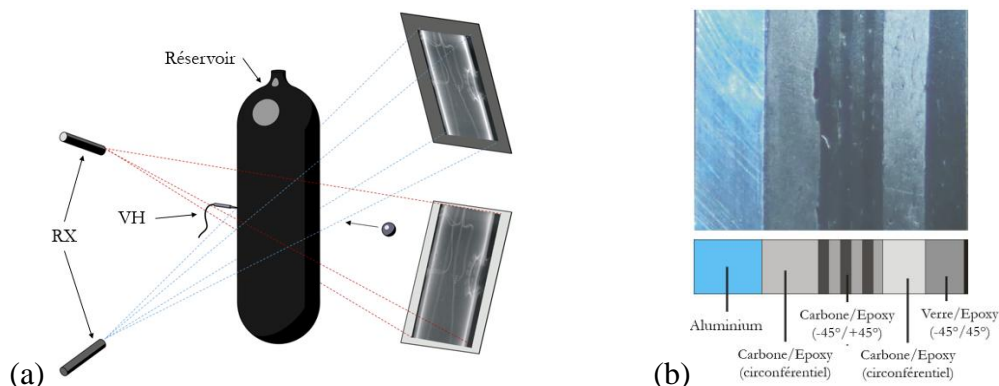


Figure 1. (a) Configuration expérimentale. (b) Composition du réservoir.

3. DESCRIPTION DU MODELE NUMERIQUE

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du code commercial LS-DYNA. Le réservoir est modélisé en formulation lagrangienne en utilisant les variations d'épaisseur relevées à partir d'une coupe. Une première étape non linéaire en statique est réalisée pour prendre en compte la précontrainte due à l'enroulement des fibres autour du réservoir. Cette contrainte est arbitrairement fixée à 100 MPa. Il est montré par calcul que le réservoir ne tient pas la pression de 300 bar sans cette étape. La bille en aluminium est modélisée en formulation SPH et le comportement des pièces en aluminium par une loi élasto-plastique avec un critère d'érosion en déformation. La loi de comportement utilisée pour les matériaux composites est une loi élastique à 9 paramètres avec critère de rupture de Chang-Chang. Pour le calcul à 300 bar, l'air à l'intérieur et à l'extérieur du réservoir est modélisée avec une formulation ALE. La pression de l'air est initialisée dans une seconde étape avec l'état de précontrainte issu du calcul implicite préliminaire (Figure (2)).

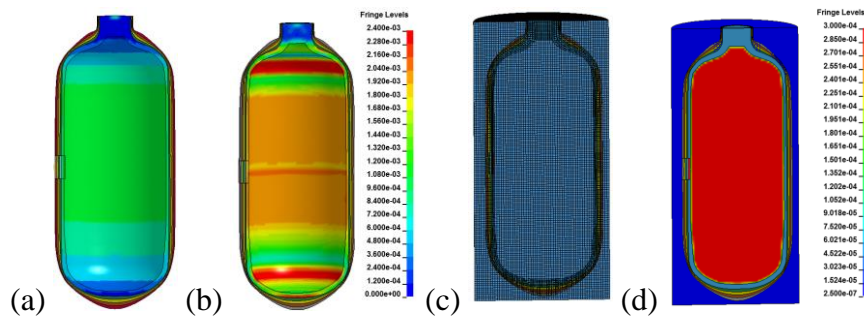


Figure 2. Contrainte initiale de Von Mises dans l'aluminium (a) à 0 bar et (b) 300 bar. (c) Maillage Lagrangien dans le maillage ALE. (d) Interaction fluide/structure avec 300 bar de pression initiale.

4. RESULTATS ET COMPARAISON AUX ESSAIS

4.1 Pression interne atmosphérique

L'onde de choc générée dans le gaz n'est pas décisive pour une pression interne de 1 bar. La simulation est donc réalisée sans maillage ALE (Figure (3a)). Le faciès de rupture obtenu numériquement est cohérent avec l'essai. Les fragments ne perforent pas la face arrière du réservoir mais viennent en revanche la grêler. La figure (3c) est une comparaison du calcul avec une radiographie RX prise à 41 μ s après l'impact. Cet instant correspond au moment où les débris atteignent la face arrière. La figure (3d) compare les profils de vitesse de surface libre. Une bonne corrélation est obtenue d'un point de vue chronométrie.

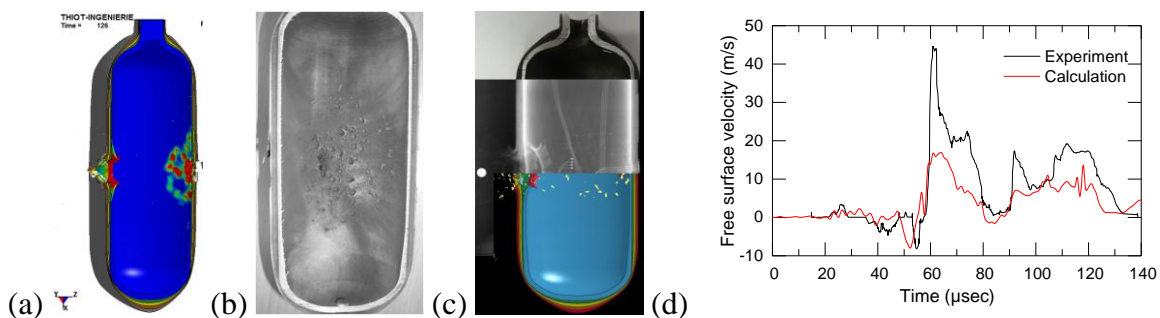


Figure 3. Zone endommagée de la face arrière interne par (a) simulation, (b) essai. (c) Comparaison simulation / RX 41 μ s après impact. (d) Evolution de la vitesse de surface libre.

4.2 Pression interne de 300 bar

La figure (4) montre l'évolution de l'onde de choc et l'avancée du projectile au sein du réservoir sous pression. La fragmentation du projectile n'est pas bien reproduite mais il est montré qu'il est arrêté par le gaz tel qu'observé expérimentalement. La rupture du réservoir est causée par la pression

interne qui est responsable de son ouverture. Celle-ci n'est pas due au retour de l'onde de choc puisqu'elle intervient avant que l'onde se réfléchisse sur la face arrière.

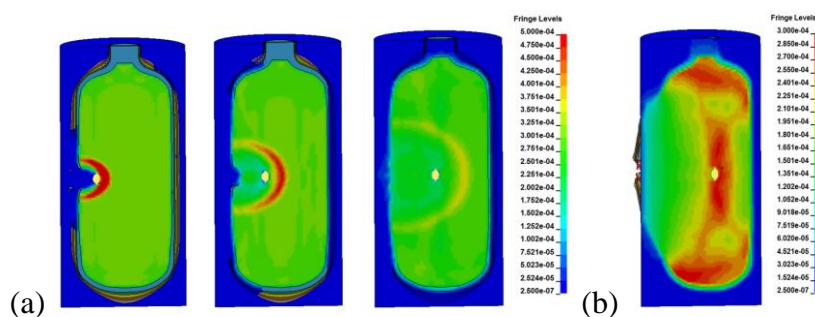


Figure 4. Onde de choc au sein du réservoir. (a) 48, 89, 144 μ s et (b) 300 μ s après l'impact.

Les figures (5a) et (5b) montrent la rupture du réservoir. Une bonne corrélation est obtenue puisque la formation des deux coupelles est reproduite numériquement. Ces coupelles sont formées par la rupture des fibres circonférentielles qui se propage sur toute la hauteur du réservoir et qui bifurque ensuite.

Les figures (5c) et (5d) comparent la position du front d'onde numérique avec les radiographies RX. La vitesse de propagation de l'onde de choc est sous-estimée. Un maillage plus fin, une meilleure connaissance des propriétés matériaux ainsi que l'amélioration de la fragmentation de la bille permettraient d'affiner ces résultats.

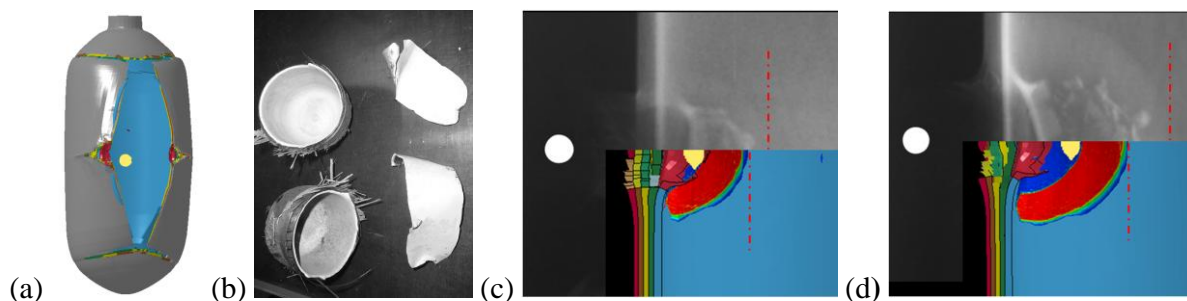


Figure 5. Comparaison des faciès de rupture obtenus par (a) simulation et (b) observation post-mortem. Comparaison entre simulation et radiographie RX à (c) 13 μ s et (d) 28 μ s après impact.

La figure (6) montre la vitesse de surface libre en face arrière du réservoir, qui met en évidence l'arrivée de l'onde de choc sur cette surface.

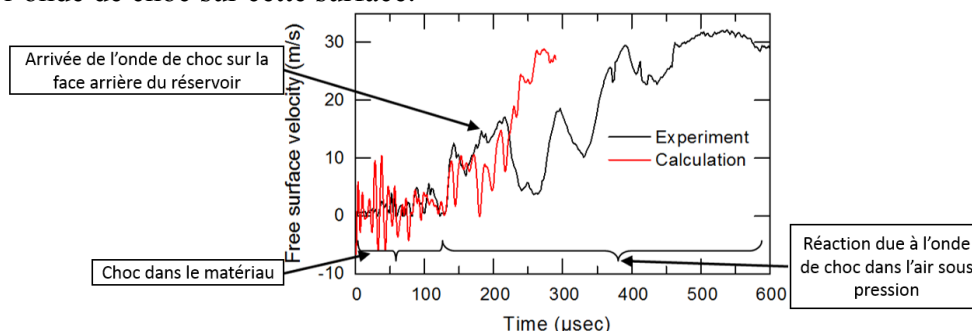


Figure 6. Comparaison de l'évolution de la vitesse de surface libre

4.3 Analyse

La figure (7) présente l'évolution de la vitesse du projectile en fonction du temps pour les configurations à 1 et 300 bar. Elle montre l'effet de la présence d'un gaz à haute pression sur la décélération du projectile.

Lors de l'impact sur la face avant, le projectile est ralenti jusqu'à 2250 m.s^{-1} (resp. 1250 m.s^{-1}) pour le réservoir non pressurisé (resp. à 300 bar). Dans le cas à 300 bar, les fragments sont arrêtés par le freinage aérodynamique du gaz sous pression.

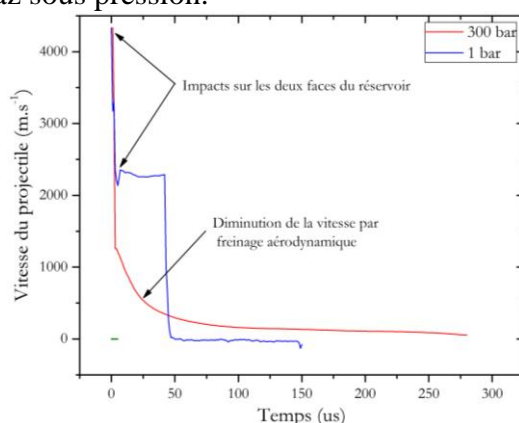


Figure 7. Evolution de la vitesse du projectile en fonction du temps par simulation

5. CONCLUSIONS

La réponse à un impact hypervélocité de réservoirs sous pression a été analysée numériquement. Ces travaux numériques se sont appuyés sur des résultats expérimentaux réalisés au laboratoire. Il est montré que les modes de rupture dépendent directement de la séquence d'empilement du composite enveloppe.

L'étude numérique développée dans ce papier a montré qu'un code commercial tel que LS-DYNA a les moyens de reproduire les phénomènes physiques observés expérimentalement. Une étude croisée entre l'expérience et le numérique permet de comprendre le scénario des impacts hypervélocité sur un réservoir sous pression. La principale difficulté en terme de modélisation réside dans la gestion des interactions entre les différentes formulations utilisées et notamment pour l'interaction SPH/ALE qui demande à être améliorée. Un important travail reste enfin à fournir pour améliorer la précision de ce modèle.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le CNES et Thiot Ingénierie pour le financement de ces travaux.

REFERENCES

- Christiansen E., Kerr J.H. et Whitney J.P., "Debris cloud ablation in gas-filled pressure vessels", *Int. J. of Imp. Eng.*, **20**, 1-5, (1997), pp. 173-184.
- Lambert M. & Schneider E., "Hypervelocity impacts on gas filled pressure vessels", *Int. J. of Imp. Eng.*, **20**, 6-10, (1997), pp. 491-498.
- Mullin S.A., Couque H., Court-Palais B.G., Grosch D.J. et Walker J.D., "Bursting of shielded pressure vessels subject to hypervelocity impact", *Int. J. of Imp. Eng.*, **20**, 6, (1997), pp. 579-590.
- Palmieri M., Schäfer F.E., Hiermaier S. et Lambert M., "Numerical simulation of non-perforating impacts on shielded gas-filled pressure vessels", *Int. J. of Imp. Eng.*, **26**, 1, (2001), pp. 591-602.
- Schäfer F.E., Schneider E. et Lambert M., "An experimental study to investigate HVI on pressure vessels", *Second European Conference on Space Debris*, Darmstadt, Germany (1997).
- Schäfer F.E., Schneider E. et Lambert M., "Impact fragment cloud propagating in a pressure vessel", *Acta Astronautica*, **39**, 1, (1997), pp. 31-40.
- Stepka F.S., Dengler R.P. et Morse C.R., "Preliminary Investigation of Catastrophic Fracture of Liquid-Filled Tanks Impacted by High-Velocity Particles", *NASA Technical Note D-1537* (1963).
- Telitchev I.Y., Schäfer F.E., Schneider E. et Lambert M., "Analysis of the fracture of gas-filled pressure vessels under HVI", *Int. J. of Imp. Eng.*, **23**, 1, (1999), pp. 905-919.
- Whitney J.P. & White P.D., "Designing hypervelocity impact testing for thin-walled pressure vessels", *Proceedings of the 43rd Meeting of the Aeroballistic Range Association*, Ohio (1992).
- Whitney J.P., "Hypervelocity impact tests of shielded and unshielded pressure vessels", *Report JSC 32294*, NASA Johnson Space Center (1993).