

Modélisation numérique de la formation d'un projectile formé par explosion (EFP)

L. Antoinat¹, E. C. J. Gan¹, A. Remennikov¹

¹ Centre for Infrastructure Protection and Mining Safety, University of Wollongong, NSW 2522, Australia, e-mail: contact@leonardantoinat.com

² Faculty of Engineering and Information Sciences, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia, e-mail: ecjg428@uowmail.edu.au

³ Centre for Infrastructure Protection and Mining Safety, University of Wollongong, Wollongong, NSW 2522, Australia, e-mail: alexrem@uow.edu.au

Résumé — La simulation numérique permet de mieux comprendre le scénario de phénomènes physiques extrêmes tel que les déformations dynamiques et rapides des structures. La formation d'un projectile formé par explosion (EFP) en est un bon exemple. On se propose ici de simuler ce phénomène à l'aide du code explicite Europlexus et de décrire le scénario mécanique de la formation de ce projectile à partir de l'initiation de l'explosion.

Mots clefs — EFP, explosion, fluide-structure, dynamique rapide, éléments finis.

1. Instructions générales

La protection civile, et particulièrement celle des bâtiments, est un des grands enjeux des années à venir. Cela est la conséquence d'une augmentation des actes de malveillance. Dans ce cadre, l'équipe de recherche en dynamique rapide de l'université de Wollongong (Australie) travaille depuis plusieurs années par une approche expérimentale et numérique, aux conséquences d'explosions. Remmenikov a notamment étudié la déformation d'une plaque en acier soumis à l'explosion de nitrométhane [1]. Plus récemment, il s'est intéressé à la formation d'un projectile formé par explosion (EFP - Explosively Formed Projectile - en anglais) et sa pénétration dans une structure sandwich composée de plaques d'acier et d'un bloc de béton [2].

Les EFP sont connus pour être utilisés contre des véhicules militaires dans les zones de guerres à cause de leur simplicité de mise en œuvre. Ils sont composés d'un cylindre, de quelques centimètres, rempli d'explosif et d'une plaque, le plus couramment incurvée et en matériau cuivre.

Les EFP ont également été étudiés récemment dans la bibliographie par des approches numériques et expérimentales. Dans [3], leur conséquence de l'impact sur une cible est comparé par rapport à un projectile rigide. Xing [4] étudie plus particulièrement la formation d'un EFP et notamment la propagation de l'onde de détonation. Cardoso [5] s'intéresse lui à la sensivité de la forme du projectile aux nombres de points de détonation dans l'explosif. Il en déduit une configuration optimale d'EFP.

Le code de mécanique Europlexus¹ est connu pour sa capacité à modéliser des transitoires rapides tels que des explosions et des déformations rapides de structures. Récemment, une nouvelle fonctionnalité de frontières immergées a été développée. Elle permet de coupler un modèle élément fini d'une structure à un modèle en volume fini du fluide. Cette fonctionnalité sera utilisée dans cette étude afin de pouvoir modéliser la formation d'un EFP.

L'objectif de cette étude est la mise en place d'un modèle d'EFP équivalent à la configuration utilisée dans [2], en s'intéressant plus particulièrement scénario mécanique de la formation. Le matériau du

¹ Europlexus est un code propriété du CEA et du laboratoire européen du JRC.



projectile est du cuivre. L'explosif est en composition B (mélange de RDX et de TNT). Il est contenu dans un cylindre en polymère renforcé en fibre de carbone.

2. Présentation du modèle

Le modèle est composé d'un maillage en volumes finis fluide (explosif et air) et d'un maillage en éléments finis qui modélise un quart de tube cylindrique et un quart de plaque incurvée en cuivre (Figure 1). L'interaction entre l'explosif et les structures utilise l'approche des frontières immergées (FLSX) du code Europlexus. Elle est calculée directement par le code. Les deux maillages peuvent donc être topologiquement différents.

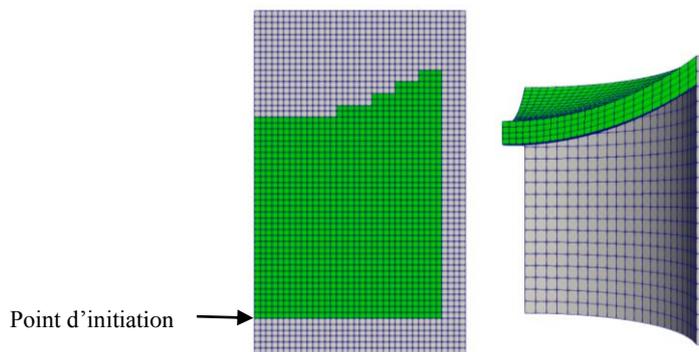


Figure 1 – Maillage de l'EFP : volume fini fluide à gauche (air en gris et explosif en vert) et élément fini structure à droite (plaque de cuivre en vert, tube cylindrique en gris)

La loi de Johnson Cook est utilisée pour modéliser le comportement de la plaque en cuivre. Le module d'Young du cuivre est de 117 GPa, la masse volumique est prise égale à 8960 kg/m³ et le coefficient de Poisson égale à 0.33. Cette loi phénoménologique de type additive est la combinaison de trois termes :

- un terme d'écrouissage qui dépend de la déformation plastique et de paramètres matériaux A, B et n ;
- un terme, fonction de la vitesse de déformation et qui dépend de paramètres C et $\dot{\epsilon}_0$;
- un terme qui dépend de la température.

Cette loi s'écrit :

$$\sigma = \left(A + B \epsilon_p^n \right) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

Les principaux paramètres sont donnés dans le tableau 1. Le terme dépendant de la température ne sera pas considéré ici. On indique également dans ce tableau la valeur prise en terme de déformation plastique maximale ($\epsilon_{p \text{ rupture}}$) pour définir le comportement à la rupture avant érosion.

Table 1 – Tableau de paramètres de la loi de Johnson Cook pour le cuivre

A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_0$	$\epsilon_{p \text{ rupture}}$
90	296	0.31	0.025	1	2.5

Bien que le matériau ait un comportement fragile, le tube de l'EFP en polymère renforcé en fibre de carbone est modélisé à l'aide d'un matériau élasto-plastique dans Europlexus. La rupture est considérée comme fragile (il n'y a pas d'écroutissement). Le module de Young du polymère est de 100GPa, le coefficient de Poisson à 0.33 et la limite à la rupture à 1500 MPa.

L'explosif en composition B est modélisé à l'aide de l'équation de Jones-Wilkins-Lee (JWL) qui permet de modéliser la détonation et la propagation des ondes dans l'explosif :

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

Où p est la pression hydrostatique et V représente le volume relatif. A , B , R_1 , R_2 , et ω sont des constantes du matériau explosif.

3. Analyse des résultats dans l'explosif

La détonation a lieu dans l'explosif au niveau du point d'initiation. A partir de cet instant, une onde circulaire de pression se propage dans l'explosif. Sur la figure 2, on observe l'évolution de cette onde à différents instants. A partir de $7 \mu s$, l'onde de pression touche le centre de la plaque incurvée en cuivre. C'est ainsi cette première zone de la plaque qui sera mis en mouvement.

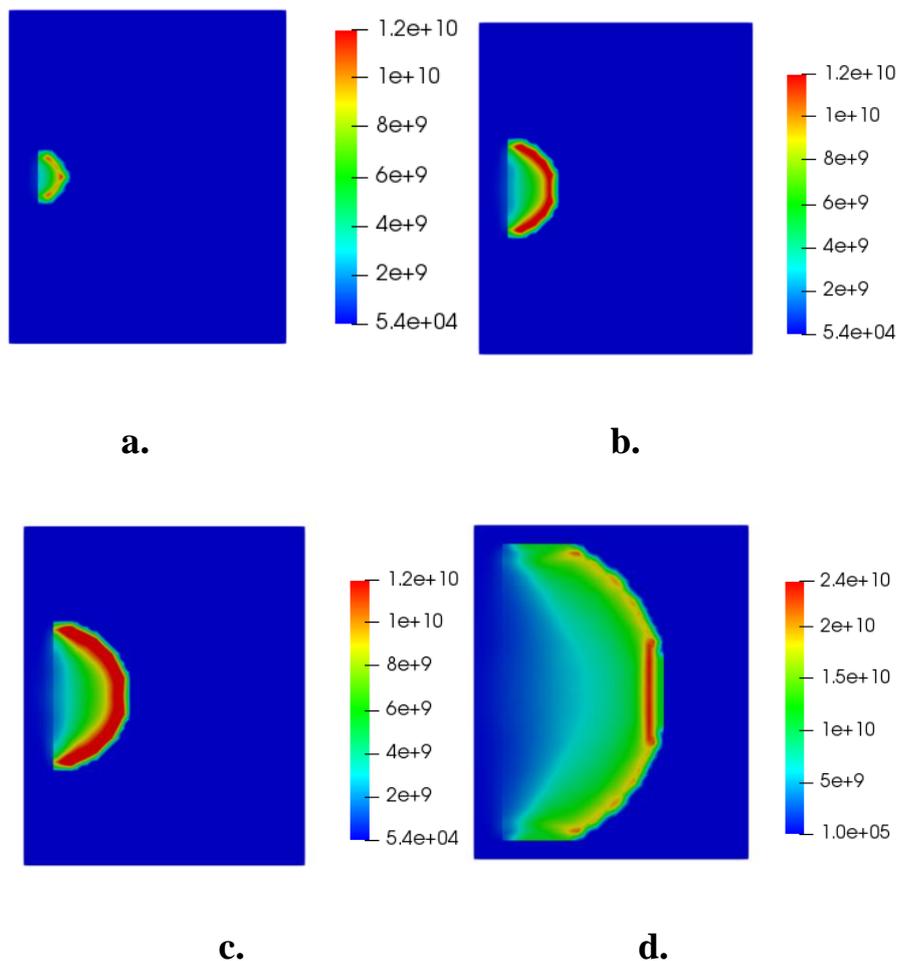


Figure 2 – Evolution de la pression dans l'explosif : à a. $1 \mu s$, b. $2 \mu s$, c. $3 \mu s$ et d. $7 \mu s$

Sur la figure 3, on trace l'évolution de la pression au niveau de 3 capteurs situés dans l'explosif en composition B. Pour l'ensemble des capteurs on observe, la même évolution de la pression :

- un premier pic entre 18 GPa et 22 GPa ;
- une diminution post-pic de la pression quasi-exponentielle.

On observe également que plus le capteur est situé loin du point d'initiation plus la pression est élevée, mais plus le pic de pression est en retard par rapport aux autres.

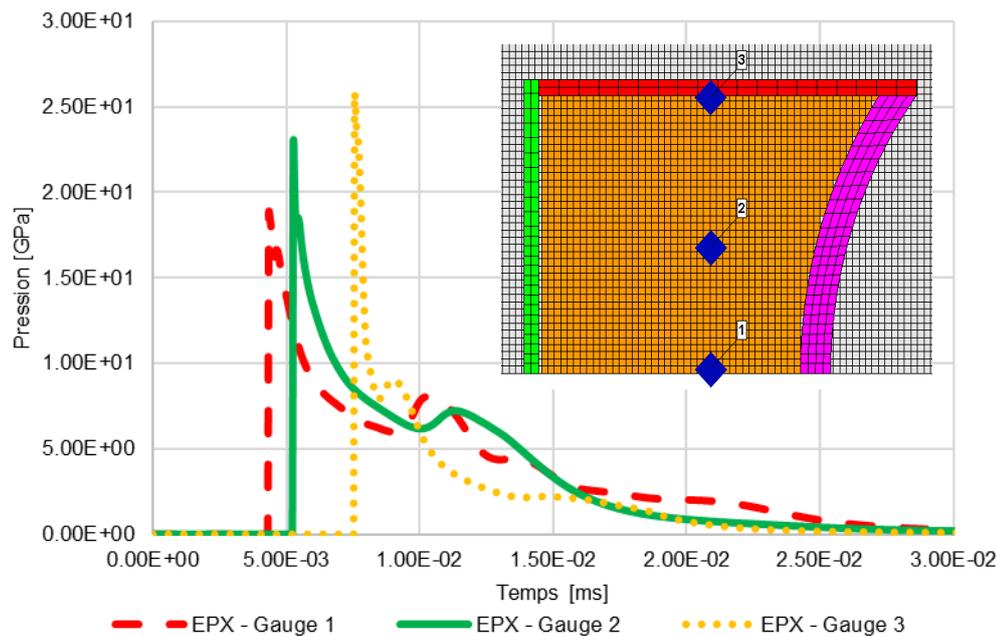


Figure 3 – Evolution de la pression au niveau de 3 point dans l'explosif en composition B

4. Analyse de la formation du projectile

Le premier point d'impact de l'onde de détonation est situé au centre de la plaque en cuivre. Elle commence à se déformer dans cette zone. On observe ainsi un retournement de la plaque incurvée (figure 4). Les déformations plastiques se cumulent alors principalement au centre de plaque qui devient le nez du projectile.

Le projectile continue de s'allonger. A l'instant, 150 μ s après la détonation le projectile commence à se couper en deux.

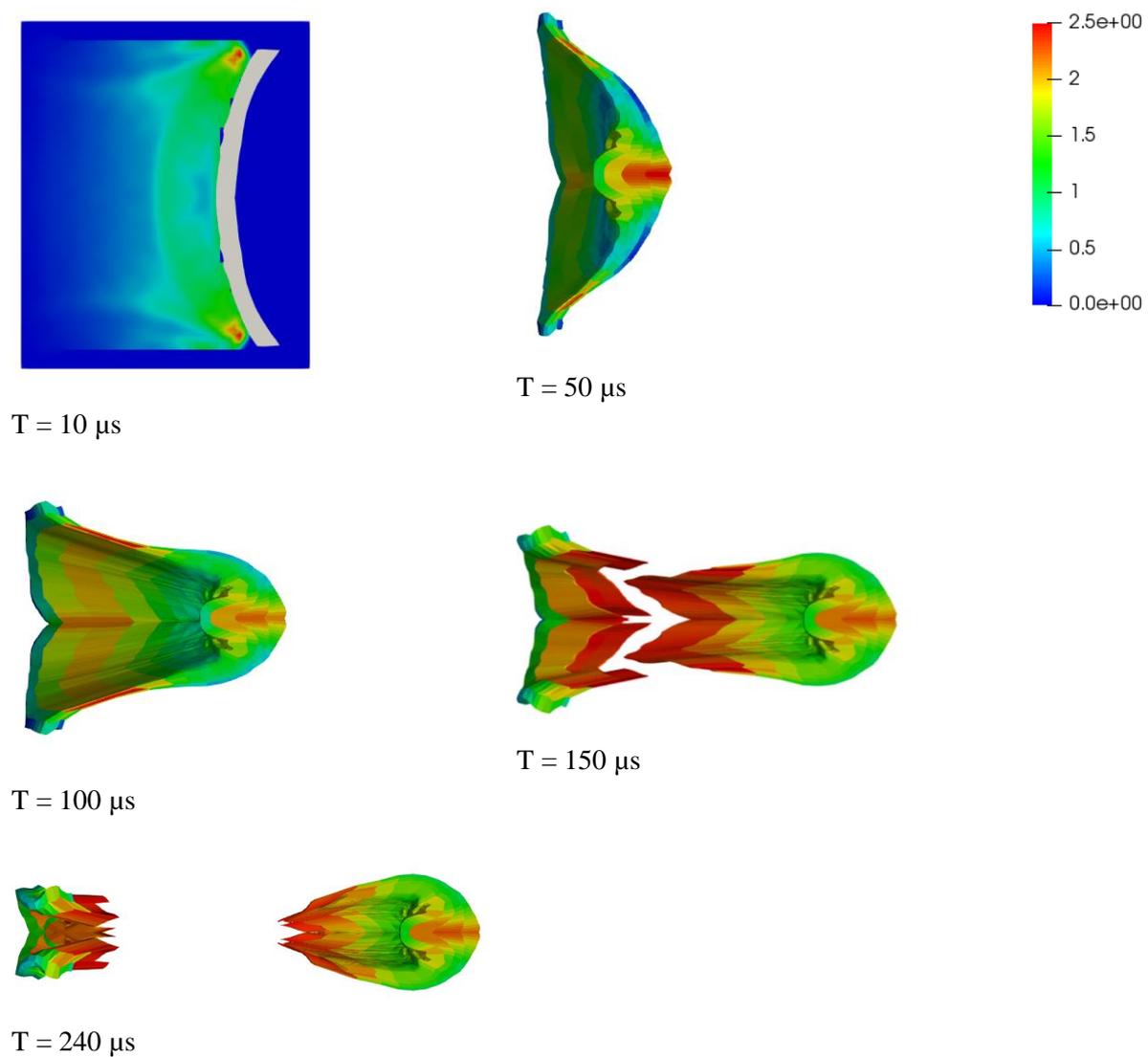


Figure 3 – Image de la formation de l'EFP

Sur la figure 4, on trace la vitesse en différents points du projectile. On observe que la vitesse finale du nez se stabilise autour de 1077 m/s. La queue du projectile quant à elle a une vitesse de 600 m/s.

La taille finale du projectile est de l'ordre de 65 mm. Lors d'essais expérimentaux, sur la même configuration, la taille du projectile est observée égale à 60 mm.

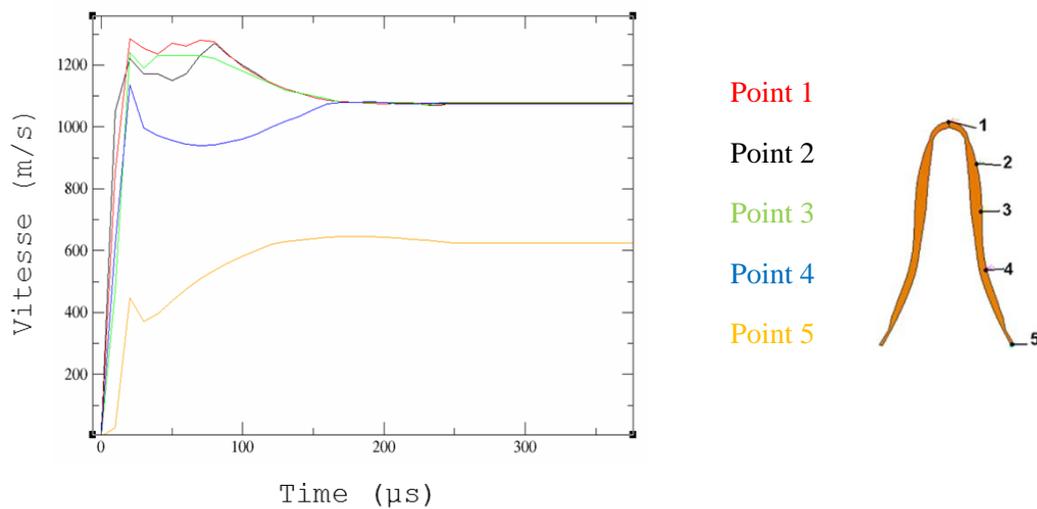


Figure 4 – Evolution de la vitesse à différents points du projectile

5. Conclusions

Une configuration de projectile formé par explosions (EFP) a été simulée à l'aide du code Europlexus. Elle est composée d'un tube cylindrique remplie d'explosif en composition B et d'une plaque en cuivre incurvée. La simulation a été réalisée en utilisant le code Europlexus et notamment la méthode d'interaction fluide-structure des frontières immergées.

Le scénario de formation d'EFP suivant a été observé :

1. A partir du point d'initiation, dans l'explosif, une onde de pression se propage et vient atteindre le centre de la plaque en cuivre incurvée.
2. Le centre de la plaque se déforme. Sa forme incurvée devient alors inversée.
3. La plaque prend la forme d'un projectile qui se déforme et se coupe en deux. La partie de nez se stabilise alors autour d'une vitesse balistique de 1077 m/s dans notre simulation.

Références

- [1] A. Remennikov, T. Ngo, B. Uy, M. Netherton et D. Mohotti, «Experimental investigation and simplified modeling of response of steel plates subjected to close-in blast loading from spherical liquid explosive charges,» *International Journal of Impact Engineering*, 2017.
- [2] A. Remennikov, E. C. J., T. Ngo et M. Netherton, «The development and ballistic performance of protective steel-concrete composite barriers against hypervelocity impacts by explosively formed projectiles,» *Composite Structures*, 2018.
- [3] F. Hu, H. Wu, Q. Fang et J. Liu, «Impact resistance of concrete targets pre-damaged by explosively formed projectile (EFP) against rigid projectile,» *International Journal of Impact Engineering*, 2018.

- [4] B.-y. Xing, R.-z. Liu, L. Chen, H. Zhou, Y.-l. Yang et L. Liu, «Influence of the embedded structure on the EFP formation of compact terminal sensitive projectile,» *Defence Technology*.
- [5] D. Cardoso et F. Teixeira-Dias, «Modelling the formation of explosively formed projectiles (EFP),» *International Journal of Impact Engineering*, 2016.