

Optimisation de protections balistiques multi-matériaux par corrélation expérience/simulation

Y. Cosquer¹, P. Longère¹, O. Pantalé², C. Gailhac³

¹ Institut Clément Ader, Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, MINES ALBI, UPS, INSA, CNRS, 3 rue Caroline Aigle 31400, Toulouse, France, {yohan.cosquer, patrice.longere}@isae-supaero.fr

² Laboratoire Génie de Production, ENI de Tarbes, 47 Avenue d'Azereix, 65000 Tarbes, France, olivier.pantale@enit.fr

³ CNIM Systèmes Industriels, 8 Zone Portuaire de Brégaillon 83500 La Seyne Sur Mer, France, claud.gailhac@cnim.com

Résumé — Les protections balistiques modernes sont des empilements multi-matériaux difficiles à optimiser sans une méthode numérique robuste. Nous présentons ici une méthodologie de prédimensionnement en trois étapes qui s'appuie sur un dialogue expérience/simulation : (i) calibration et vérification d'un modèle numérique, (ii) sa validation et (iii) son utilisation dans un processus d'optimisation. Cette méthodologie est appliquée à une protection multimatériaux dont les épaisseurs de chaque couche sont optimisées pour minimiser la masse en arrêtant un projectile donné.

Mots clefs — Balistique terminale, dynamique rapide, dialogue expérience-simulation, optimisation.

1. Introduction

Les systèmes de protection balistiques pour véhicules terrestres ont longtemps été le résultat d'une évolution incrémentale et empirique. Cependant, les évolutions récentes des zones de conflit, des menaces et des groupes armés imposent désormais une adaptation rapide de ces protections. Pour en réduire la masse, elles sont pour la plupart constituées d'empilements multi-matériaux. Leur conception dépend alors de nombreux paramètres (matériaux, nombre de couches, ordre d'empilement par exemple) qui doivent être optimisés pour réduire la masse tout en assurant le niveau de protection recherché. Le recours à la simulation numérique s'avère ainsi nécessaire (voir par exemple [5-6]) avec des résultats qui doivent être validés par l'expérience.

Nous présentons ici une méthodologie de pré-dimensionnement pour l'ingénieur de systèmes de protections balistiques multi-matériaux basée sur une corrélation entre expérience et simulation. Un modèle numérique est calibré et vérifié dans une première étape, puis il est validé en comparant ses résultats dans une situation nouvelle. Enfin, il est intégré dans une boucle d'optimisation pour minimiser la masse du système de protection face à un projectile donné. Nous nous intéressons ici à une protection constituée en couche avant d'une plaque d'acier à blindage MARS 380 et en couche arrière d'une plaque en alliage d'aluminium.

2. Moyens expérimentaux et numériques

Cette partie présente les moyens expérimentaux et numériques utilisés pour ce dialogue expérience-simulation.

2.1. Procédure expérimentale

Les essais sont réalisés avec deux des trois lanceurs à gaz de la plateforme STIMPACT de l'Institut Clément Ader. Le lanceur Ø40 (~ 100g à 230 m/s) est utilisé pour étudier la réponse de l'alliage d'aluminium face à un projectile en acier de diamètre 20 mm, à bout conique et de masse 58,9 g (« D20-Acier-Conique »). Le lanceur Ø60 (~ 200g à 800 m/s) est principalement utilisé pour étudier la réponse du MARS 380 face à un projectile en carbure de tungstène de diamètre 6,35 mm, à bout

conique et de masse 5,46 g (« D6.35-WC-Conique »). Les projectiles étant sous-calibrés, des sabots en mousse de polyuréthane sont utilisés pour les adapter aux diamètres intérieurs des lanceurs. La séparation sabot-projectile s'effectue entre la barrière optique et la caméra avant (AV). La vitesse du projectile pré-impact (« vitesse incidente ») est mesurée par une barrière optique à trois voies. Les interactions projectile-cible et la vitesse du projectile post-impact (« vitesse résiduelle ») sont enregistrées par des caméras rapides Photron Fastcam SA5 (AV et AR) avec des résolutions spatiales et temporelles de $320 \times 192 \text{ px}^2$ et 100 000 i/s. Le banc d'essais du lanceur Ø60 est schématisé en Figure 1.

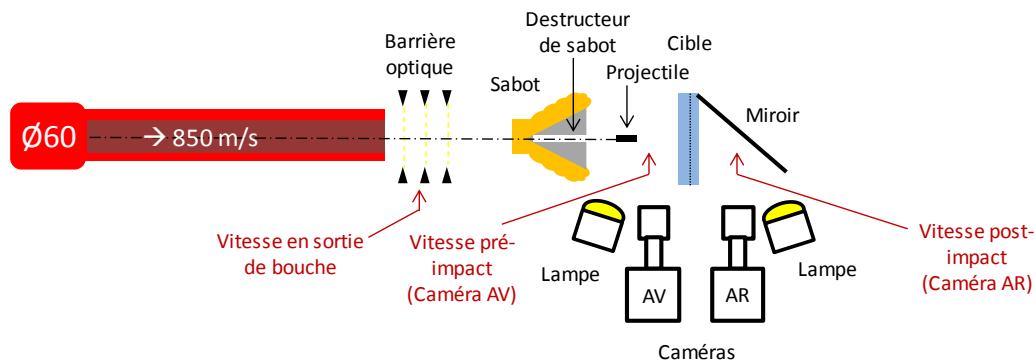


Figure 1 : Banc d'essai du lanceur Ø60

2.1. Procédure numérique

Dans l'approche ingénieur adoptée ici, Abaqus/Explicit 2016 est utilisé pour la simulation numérique et ISIGHT est utilisé pour les boucles d'identification et d'optimisation au moyen d'un algorithme Downhill Simplex (ou méthode de Nelder-Mead). Un script python permet d'interfacer les deux logiciels, voir Figure 2. Les calculs sont lancés selon le cas sur le supercalculateur Olympe opéré par CALMIP (36 cœurs par calcul) ou PANDO opéré par l'ISAE-SUPAERO (24 cœurs par calcul).

Les plaques et les projectiles sont discrétisés avec des éléments finis hexaédriques à 8 nœuds et à intégration réduite (C3D8R) formant un maillage non régulier de taille moyenne 0,5 mm, voir Figure 3. Un contrôle d'hourglass est réalisé. Le contact normal est de type pénalité et le contact tangentiel également avec un coefficient de frottement de Coulomb de 0,3.

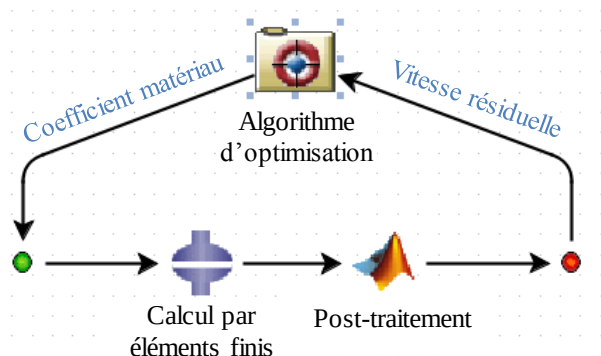


Figure 2 : Structure typique d'une boucle d'identification ISIGHT

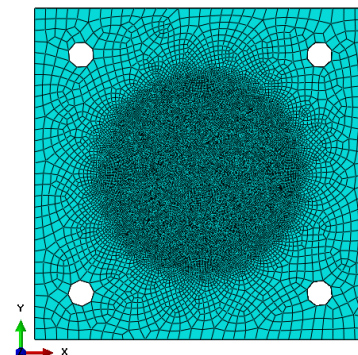


Figure 3 : Maillage des plaques en alliage d'aluminium et en MARS 380. Les trous sont utilisés pour l'assemblage par boulonnage

Le comportement des projectiles est supposé élastique car aucune déformation résiduelle n'a été

observée après les essais. Le comportement des matériaux des plaques est décrit par le modèle de Johnson-Cook [3] pour la partie déviatorique du tenseur des contraintes et par une équation d'état de type Mie-Grüneisen [1] pour la partie hydrodynamique. L'auto-échauffement est pris en compte en compte par un coefficient de conversion de la puissance plastique en chaleur égal à 1. Pour l'alliage d'aluminium, l'amorçage de l'endommagement est déterminé par l'indicateur d'endommagement de Johnson-Cook [4] et l'évolution de l'endommagement obéit à une loi de Hillerborg [2] avec énergie de rupture G_f . Pour le MARS 380, une déformation plastique à rupture ε_f est imposée. La rupture entraîne l'annulation totale de la rigidité de l'élément fini.

Les quantités G_f pour l'alliage d'aluminium et ε_f pour le MARS 380 sont les variables de corrélation expérience-simulation.

3. Dialogue expérience/simulation

Les modèles numériques de l'alliage d'aluminium et du MARS 380 sont individuellement calibrés, vérifiés et validés dans cette partie, en vue de l'optimisation de l'empilement complet dans la partie suivante. Les plaques sont de dimensions latérales 150×150 mm² et d'épaisseur variable.

3.1. Alliage d'aluminium seul

3.1.1 Calibration et vérification

Une plaque en alliage d'aluminium d'épaisseur 6 mm (« AA6 ») est impactée par un projectile D20-Acier-Conique projeté à 230 m/s. Le projectile traverse la plaque, et la vitesse résiduelle expérimentale est de 93 m/s. Le modèle numérique associé se compose de 393 409 éléments, 426 867 nœuds et le calcul dure 12 minutes sur 36 cœurs de CALMIP. Ce modèle est intégré à une boucle d'identification ISIGHT pour déterminer la valeur de G_f permettant d'obtenir une vitesse résiduelle numérique V_{res} égale à la vitesse résiduelle expérimentale. Après 15 itérations on trouve $G_f = 24,0$ mJ/mm² et $V_{res} = 95,0$ m/s, soit une différence de 2,2 % avec l'expérience que nous considérons acceptable. Les modes de ruine expérimentaux et numériques sont comparés en Figure 4 où l'on observe dans les deux cas un mécanisme d'ouverture en pétales. Ces derniers sont cependant moins marqués dans le cas numérique. D'après ces observations nous considérons le modèle numérique comme calibré et vérifié.

3.1.2 Validation

Pour cette étape on passe à une protection tricouche constitué de plaques d'aluminium de 6 mm en couches avant et arrière, et d'une lame d'air de 10 mm en couche intermédiaire (« AA6-air10-AA6 »). On considère toujours un projectile D20-Acier-Conique. La Figure 5 montre que les vitesses expérimentales et numériques sont très proches. On peut d'ailleurs identifier des vitesses limites de perforation expérimentale et numérique de 295 m/s et 300 m/s respectivement. Les modes de ruine sont également similaires à ceux observés précédemment, voir Figure 4. On considère ainsi le modèle numérique comme validé.

3.2. Acier à blindage MARS 380 seul

3.2.1 Calibration et vérification

Une plaque de MARS 380 d'épaisseur 8,8 mm est impactée par un projectile D6.35-WC-Conique à 714 m/s. Le projectile traverse la cible, et la vitesse résiduelle expérimentale est de 373 m/s. La ruine du matériau peut être décrite comme une compétition entre pénétration ductile, repoussement de

matière et légère ouverture en pétales en face arrière (voir Figure 6).

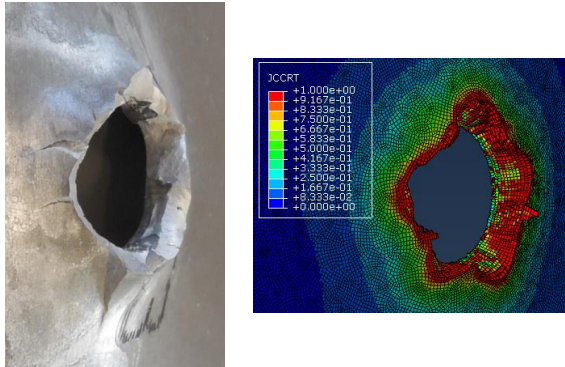


Figure 4 : Modes de ruine en face arrière expérimentaux et numériques d'une plaque AA6 impactée par un projectile D20-Acier-Conique à 230 m/s. Visualisation de l'indicateur d'endommagement de Johnson-Cook « JCCRT ».

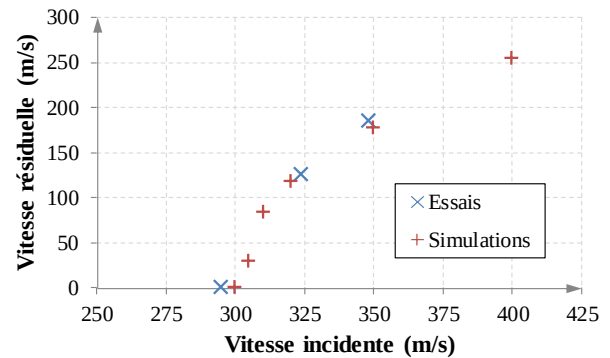


Figure 5 : Vitesses incidentes et résiduelles expérimentales et numériques de projectiles D20-Acier-Conique impactant des protections tricouches AA6-air10-AA6

Le modèle numérique est constitué de 593 740 éléments, 628 403 nœuds et le calcul dure environ 50 minutes sur 36 cœurs de CALMIP. Ce modèle est intégré dans une boucle d'identification ISIGHT, et après 15 itérations on trouve $\varepsilon_f = 0,75$ et $V_{res} = 374$ m/s, soit une différence de 0,3 % par rapport à l'expérience. Le repoussement de matière et la pénétration ductile sont bien reproduits mais les pétales ne sont pas clairement visibles (voir Figure 6 droite). Nous considérons ce modèle calibré et vérifié.

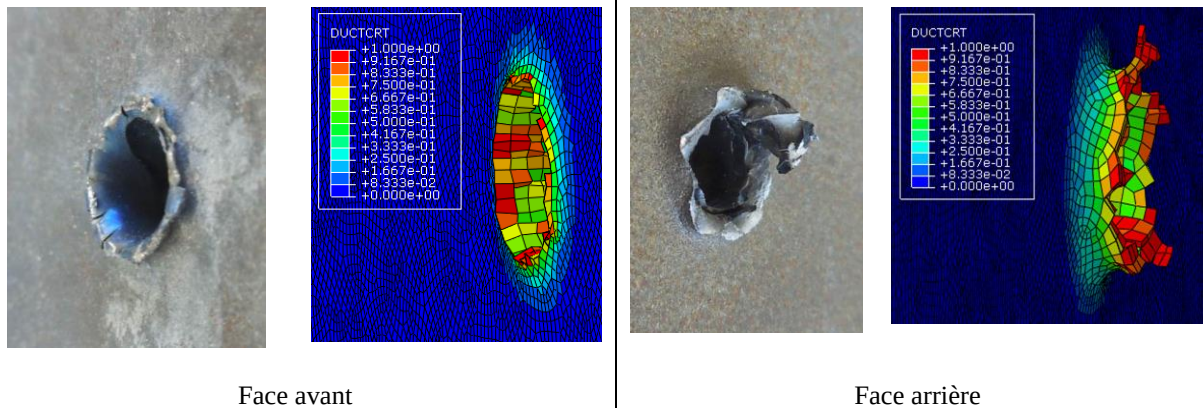


Figure 6 : Modes de ruine en face avant (gauche) et face arrière (droite) expérimentaux et numériques d'une plaque MS8.8 impactée par un projectile D6.35-WC-Conique à 714 m/s. Visualisation de l'indicateur d'endommagement « DUCTCRT ».

3.2.2 Validation

Pour valider le modèle nous étudions la réponse de la plaque MS8.8 pour des vitesses incidentes plus faibles, jusqu'à la vitesse limite de perforation. On voit sur la Figure 7 que les résultats expérimentaux et numériques sont très proches et on obtient dans les deux cas une vitesse limite de perforation d'environ 550 m/s. On considère ainsi que le modèle numérique est validé.

4. Optimisation numérique d'un système de protection multimatériaux

On étudie dans ce paragraphe la possibilité d'optimiser numériquement un système de protection

balistique constitué en couche avant d'une plaque de MARS 380 d'épaisseur initiale 8,8 mm et en couche arrière d'une plaque d'alliage d'aluminium d'épaisseur initiale 8,0 mm : « MS8.8-AA8 ». L'objectif est la minimisation de la masse de cette protection en modifiant les épaisseurs de chaque couche, pour une vitesse limite de protection de 345 m/s face à un projectile D6.35-WC-Conique.

4.1. Vérification et validation

Des protections MS8.8-AA8 sont impactées par des projectiles D6.35-WC-Conique, et les essais sont reproduits numériquement. La Figure 8 montre une bonne corrélation entre les vitesses expérimentales et numériques du projectile. Concernant les modes de ruines, on retrouve des résultats analogues à ceux des paragraphes précédents. Ce modèle est donc considéré comme validé.

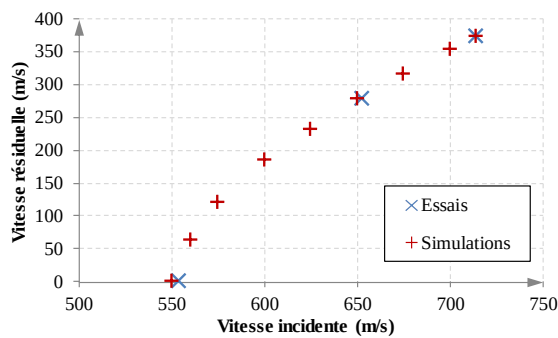


Figure 7 : Vitesses incidentes et résiduelles expérimentales et numériques de projectiles D6.35-WC-Conique impactant des plaques de MS8.8

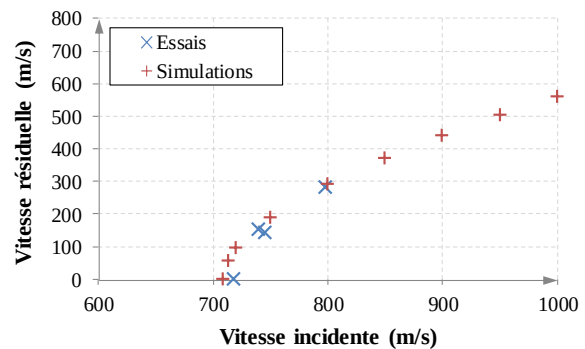


Figure 8 : Vitesses incidentes et résiduelles expérimentales et numériques de projectiles D6.35-WC-Conique impactant des plaques de MS8.8-AA8

4.2. Optimisation

Le modèle numérique d'impact d'une protection MS8.8-AA8 par un projectile D6.35-WC-Conique à 345 m/s est intégré à la procédure d'optimisation suivante :

- objectif : minimisation de la masse surfacique m_s
- variables : épaisseurs des plaques avant (e_{av}) en MARS380 et arrière (e_{ar}) en alliage d'aluminium
- contrainte : vitesse résiduelle du projectile négative ou nulle

L'épaisseur minimale admissible est fixée à 2,0 mm pour assurer la présence de quelques éléments dans l'épaisseur des plaques. La Figure 9 montre une convergence après 66 itérations (soit 120 heures de calcul sur 24 cœurs de PANDO) vers une plaque avant en MARS 380 plus fine et une plaque arrière en alliage d'aluminium plus épaisse. Cependant on remarque que la valeur finale de e_{av} est 2,0 mm, soit la limite inférieure imposée, le processus d'optimisation n'est donc pas terminé. En effet, une optimisation analogue (non présentée ici) sur une protection monolithique en alliage d'aluminium fournit une solution finale 2,1% plus légère (voir Tableau 1).

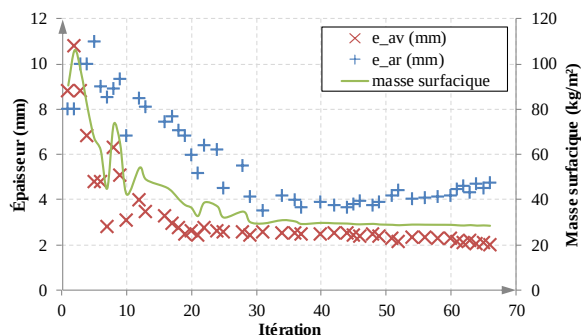


Figure 9 – Itérations de l’optimisation d’une protection MS8.8-AA8 impactée par un projectile D6.35-WC-Conique à 345 m/s. Les solutions ne bloquant pas le projectile sont masquées

	e_{av} (mm)	e_{ar} (mm)	m_s (kg/m ²)
MARS 380 + alliage d’aluminium	2,00	4,73	28,4
Alliage d’aluminium	10,3		27,8

Tableau 1 : Résultats d’optimisation d’une protection multimatériaux composée d’une couche avant en MARS 380 et en couche arrière d’une plaque en alliage d’aluminium, et d’une protection monolithique en alliage d’aluminium, impactées par un projectile D6.35-WC-Conique à 345 m/s.

5. Conclusion

Nous avons présenté une méthodologie de prédimensionnement de systèmes de protection balistique basée sur un dialogue entre expérience et simulation. Elle a été appliquée à l’optimisation d’une protection multimatériaux constituée en couche avant d’une plaque de MARS 380 et en couche arrière d’une plaque en alliage d’aluminium. Sa masse a été minimisée pour assurer une protection face à un projectile en carbure de tungstène de 5,46 g à 345 m/s. Cette solution est finalement moins intéressante qu’une protection monolithique en alliage d’aluminium, mais ce résultat peut être dû au fait que l’on néglige la rupture du projectile par la plaque en MARS 380, observée dans quelques essais. Cette approche doit désormais être étendue à d’autres types de matériaux, comme les céramiques ou les tissus balistiques, qui ont montré de bons résultats lors de nos essais.

Les auteurs reconnaissent le soutien financier de l’Association Nationale pour la Recherche et la Technologie (ANRT) et la mise à disposition des outils de calcul haute performance de CALcul en Midi-Pyrénées (CALMIP).

Références

- [1] E. Grüneisen, Theorie des festen Zustandes einatomiger Elemente, Ann. Phys., 1912.
- [2] A. Hillerborg, M. Modéer, P.E. Petersson, Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, Cem. Concr. Res. 6, 773–781, 1976.
- [3] G.R. Johnson, W.H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, 7th Int. Sympo. Ballistics, 1983.
- [4] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Eng. Fract. Mech. 21, 31–48, 1985.
- [5] A. Paman, G. Sukumar, B. Ramakrishna, V. Madhu, An optimization scheme for a multilayer armour module against 7.62 mm armour piercing projectile, Int. J. Prot. Struct. 11, 185–208, 2019.
- [6] M. Park, J. Yoo, D.T. Chung, An optimization of a multi-layered plate under ballistic impact, Int. J. Solids Struct. 42, 123–137, 2005.