HAL
open science

Optimisation de systèmes de protection balistique basée sur une corrélation expérience/simulation

Yohan Cosquer, Patrice Longère, Olivier Pantalé, Claude Gailhac

To cite this version:

Yohan Cosquer, Patrice Longère, Olivier Pantalé, Claude Gailhac. Optimisation de systèmes de protection balistique basée sur une corrélation expérience/simulation. CFM2022 -25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-03773120

HAL Id: hal-03773120

https://hal.science/hal-03773120v1

Submitted on 6 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation de systèmes de protection balistique basée sur une corrélation expérience/simulation

Y. COSQUER[a], P. LONGÈRE[a], O. PANTALÉ[b], C. GAILHAC[c]

a. Institut Clément Ader, Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, INSA-T, UPS, IMT Mines Albi, CNRS, Toulouse, France, yohan.cosquer@isae-supaero.fr, patrice.longere@isae-supaero.fr
b. Laboratoire Génie de Production, ENI de Tarbes, Tarbes, France, olivier.pantale@enit.fr
c. CNIM Systèmes Industriels, La Seyne-sur-Mer, France, claude.gailhac@cnim.com

Résumé :

Les protections balistiques les plus efficaces sont des empilements complexes de plusieurs couches et matériaux, éventuellement hybrides et composites. Ainsi, une recherche exclusivement empirique des paramètres de conception optimaux n'est pas adaptée et l'utilisation de simulations numériques est préférable, voire obligatoire. Cette étude propose une méthodologie d'optimisation de protection balistique multicouche basée sur une corrélation expérience/simulation. Un modèle numérique est d'abord calibré sur la base de résultats d'essais d'impact sur des cibles monolithiques, puis un système multicouche est construit. Une fois le modèle vérifié et validé, il est intégré à un processus d'optimisation qui recherche des valeurs optimales de certains paramètres de conception (par exemple les épaisseurs de chaque couche) afin de minimiser la masse totale tout en conservant la capacité de protection du système. Un système tricouche impacté par un projectile cylindrique à bout plat est utilisé ici à titre d'exemple. Le processus d'optimisation montre que, dans ce cas précis, un système multicouche est plus intéressant qu'un système monolithique.

Abstract :

The most effective ballistic protections are complex structures made of multiple layers and potentially hybrid and composite materials. Thus, an exclusive empirical search for optimal design parameters is not adapted and the use of numerical simulations is preferable or even mandatory. This study proposes a methodology for the optimisation of multilayer ballistic protection systems, based on an experimental/numerical correlation. A numerical model is first calibrated based on the results of impact tests on monolithic targets, then a multilayer system is built. Once the model has been verified and validated, it is integrated into an optimisation process that searches for optimal design parameters (for example the thicknesses of each layer) in order to minimise the total mass while maintaining the protective capacity of the system. A three-layered system impacted by a flat-nosed cylindrical projectile is used here as an example. The optimisation process shows that, in this case, a multilayer system is more interesting than a monolithic system.

Mots clefs : Balistique terminale, optimisation, endommagement, rupture

1 Introduction

La conception de systèmes de protection balistique pour les véhicules terrestres a longtemps été un processus itératif fondé sur des approches empiriques. L'émergence de nouvelles zones de conflit, de menaces et de groupes armés implique un niveau de protection de véhicules accru, entrainant une augmentation de leur masse. Les systèmes de protection balistique sont souvent constitués de plusieurs couches composées de différents matériaux afin d'améliorer leurs performances spécifiques [1]. Cette structure complexe nécessite de fixer de nombreux paramètres de conception, par exemple le type de matériau, le nombre de couches et leurs épaisseurs, l'ordre d'empilement. Des modèles analytiques permettent de déterminer les valeurs optimales d'un ou plusieurs de ces paramètres, mais ils s'appliquent généralement à des situations très spécifiques. Par exemple, le modèle de Florence [2] permet de minimiser la masse d'un blindage bicouche, en optimisant les épaisseurs de la couche avant en céramique et de la couche arrière en matériau ductile, impacté par un projectile à bout plat. Cependant, ce modèle n'est plus valable si on change un type de matériau et/ou la forme du projectile.
Avec des configurations plus complexes, l'optimisation analytique d'un ensemble de paramètres à l'aide d'une approche entièrement expérimentale est irréaliste, et l'utilisation de simulations numériques est alors nécessaire. Des optimisations de systèmes de protection basées sur une approche numérique ont été réalisées avec succès par plusieurs auteurs. Par exemple, Park et al. [3] ont optimisé les épaisseurs d'un système de protection bicouche acier-aluminium impacté par une bille d'acier grâce à des calculs par éléments finis; Paman et al. [4] ont optimisé numériquement un système de protection multi-couches (acier, titane, aluminium) selon l'ordre d'empilement et l'épaisseur des couches. Cependant, ces travaux sont principalement limités aux matériaux métalliques et/ou par des hypothèses initiales, à savoir le nombre de couches, les matériaux choisis, le type de projectile.
L'objectif de cette étude est de proposer une méthodologie permettant des optimisations plus diversifiées. Il met en œuvre une procédure de vérification et validation, et est basé sur une corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques. Des protections tricouches, composées de plaques en alliage d'aluminium comme couches avant et arrière séparées par une lame d'air, sont prises comme exemple d'application de cette méthodologie.
La procédure expérimentale et les résultats expérimentaux saillants sont présentés dans la section 2. Les différentes étapes de calibration, vérification et validation, et optimisation sont décrits et appliquées dans la section 3. Des conclusions sont tirées dans la section 4.

2 Campagne expérimentale

2.1 Procédure expérimentale

Les essais d'impacts ont été réalisés à l'aide du lanceur à gaz de diamètre intérieur 40 mm de la plateforme STIMPACT de l'Institut Clément Ader. Les systèmes de protection tricouches se composent en couche avant et arrière de deux plaques en alliage d'aluminium d'épaisseur 6 mm et de dimensions latérales 150×150 mm², séparées par une lame d'air d'épaisseur 10 mm. Le projectile sous-calibré en acier à haute résistance possède une géométrie cylindrique à extrémités plates, de diamètre 20 mm, et de masse 60 g. Les vitesses incidentes sont comprises entre 140 m/s et 230 m/s et le projectile impacte les systèmes de protection avec une incidence normale. Deux caméras rapides Photron Fastcam SA5 ont été utilisées pour enregistrer l'interaction projectile/plaque d'une part, et pour déterminer les vitesses initiales et résiduelles des projectiles d'autre part. Pour ce faire, des résolutions spatiales et temporelles de 320×192 pixels² et 10^5 i/s, respectivement, ont été choisies.

2.2 Résultats expérimentaux

Les vitesses résiduelles en fonction des vitesses incidentes sont tracées pour les essais d'impact sur une plaque seule (utilisés plus tard à l'étape de calibration et de la vérification du modèle numérique) en Figure 1a. D'après ces résultats, on peut estimer une vitesse limite de perforation (VLP) proche de 150 m/s. De plus, on observe sur la Figure 1b un mode de défaillance par poinçonnage qui s'accompagne de l'éjection d'une pastille. Ensuite, la Figure 2 montre la zone endommagée d'un système de protection tricouche (utilisé plus tard à l'étape de validation du modèle numérique) après un essai d'impact à 227 m/s. La plaque avant rompt par poinçonnage, et la pastille éjectée vient se placer entre le projectile et la plaque arrière, qui se déforme mais ne rompt pas.

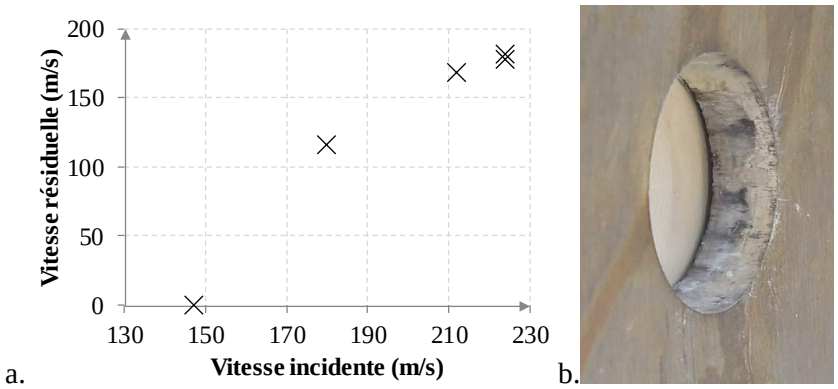

Figure 1. Plaque en alliage d'aluminium seule impactée par un projectile en acier à haute résistance, cylindrique à bout plat et de masse 60 g. a. Vitesse résiduelle en fonction de la vitesse incidente. b. Face arrière de la plaque après un impact à 224 m/s.

Figure 2. Système de protection multicouche impacté par un projectile en acier à haute résistance, cylindrique à bout plat et de masse 60 g lancé à 227 m/s. De gauche à droite : face arrière de la plaque avant (le projectile est resté bloqué), pastille éjectée, face avant de la plaque arrière, face arrière de la plaque arrière.

3 Simulations numériques

3.1 Procédure numérique

Les simulations numériques sont réalisées à l'aide du code de calcul par éléments finis ABAQUS/Explicit exécuté sur les supercalculateurs Olympe (opéré par CALMIP) et PANDO (opéré par l'ISAE-SUPAERO). Les calibrations et les optimisations sont effectuées à l'aide du logiciel commercial ISIGHT. Les plaques sont discrétisées par des éléments finis C3D8R (éléments 3D hexaédriques à intégration réduite) tandis que le projectile est modélisé comme étant purement

élastique (aucune déformation plastique n'a été observée sur les projectiles après les essais). Le comportement de l'aluminium est reproduit à l'aide du modèle de Johnson-Cook [5] (dépendant de la température et de la vitesse de déformation) pour sa partie déviatorique, et de l'équation d'état Mie-Grüneisen pour sa partie hydrodynamique (adaptée de [6]). L'amorçage de l'endommagement suit la loi d'endommagement de Johnson-Cook [7] et l'évolution de l'endommagement jusqu'à rupture est supposée suivre l'approche de Hillerborg [8]. Les coefficients matériaux sont pour la plupart tirés de la littérature. Le coefficient G_f, lié à l'énergie dissipée lors de l'évolution de l'endommagement, sert de variable d'ajustement entre les résultats expérimentaux et numériques.

3.2 Calibration et vérification

Cette première étape consiste à calibrer le coefficient G_f à partir d'essais d'impact effectués sur une plaque seule en minimisant la différence entre les valeurs expérimentales et numériques des vitesses résiduelles. ISIGHT est utilisé à cet effet avec l'algorithme Downhill Simplex (ou méthode de Nelder-Mead). Seul l'essai ayant la vitesse incidente la plus élevée est pris en considération pour minimiser l'effet des conditions aux limites. 393 409 éléments et 426 867 nœuds composent le modèle numérique. Le temps de calcul est d'environ 12 minutes sur 36 cœurs d'Olympe. Après vingt itérations, l'algorithme converge en une valeur $G_{f,0}$. La même procédure avec un projectile à bout conique conduit à un $G_{f,0}$ différent, car les mécanismes de défaillance sont très différents entre les projectiles à bout conique et à bout plat. Une valeur commune de $G_{f,1}$ est déterminée pour minimiser la différence entre les résultats expérimentaux et numériques pour les deux types de projectiles, voir le Tableau 1. Les résultats qualitatifs numériques obtenus pour le projectile à bout plat sont illustrés en Figure 3, proches des résultats expérimentaux en Figure 1b.

Tableau 1. Résultats de l'étape de calibration

	Bout plat	**Bout conique**
Vitesse incidente (m/s)	224	230
Vitesse résiduelle expérimentale (m/s)	180	93
$G_{f,0}$ (normalisé)	1,0	6,3
$G_{f,1}$ (normalisé)	6,0	
Vitesse résiduelle numérique (m/s)	174,5	95,0
Écart expérience/simulation	-3,06 %	+2,15 %

3.3 Validation

Le but de l'étape de validation est de montrer la robustesse du modèle en comparant les résultats expérimentaux et numériques dans des configurations nouvelles, non utilisées dans les étapes de calibration et de vérification. Pour cela, le système de protection évolue d'une plaque seule au système de protection tricouche décrit précédemment. Le modèle numérique contient 771 169 éléments, 841 926 nœuds et nécessite 45 minutes de calcul sur 36 cœurs d'Olympe. D'après les figures 4 et 5, les résultats numériques qualitatifs sont proches des observations expérimentales : la plaque avant rompt par poinçonnage causant l'éjection d'une pastille, et la plaque arrière est déformée (voir Figure 2). Le modèle numérique est ainsi considéré comme validé.

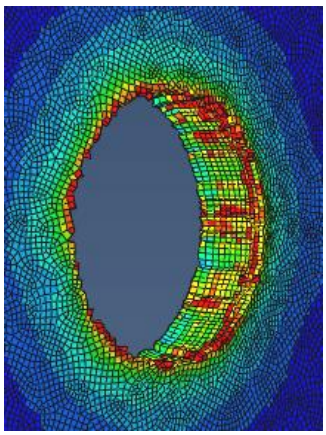

Figure 3. Simulation d'impact sur une plaque seule par un projectile à bout plat à 224 m/s. Visualisation de la variable d'amorçage de l'endommagement.

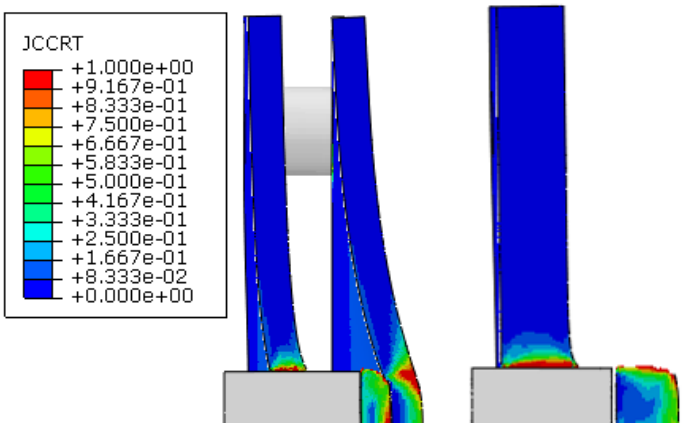

Figure 4. Simulation d'un projectile à bout plat impactant à 226 m/s une protection multicouche (2×6 mm), et une protection monocouche (1×12 mm). Visualisation de la variable d'amorçage de l'endommagement.

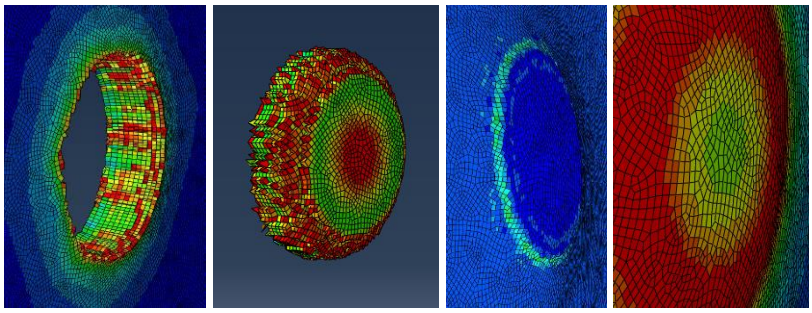

Figure 5. Simulation d'impact d'un système de protection multicouche par un projectile à bout plat à 226 m/s. Visualisation de la variable d'amorçage de l'endommagement. De gauche à droite : face arrière de la plaque avant (le projectile est masqué), pastille éjectée, face avant de la plaque arrière, face arrière de la plaque arrière.

3.4 Optimisation

Le modèle numérique peut maintenant être utilisé pour rechercher une conception optimale du système de protection tricouche. L'objectif est de minimiser sa masse tout en garantissant l'absence de perforation par un projectile lancé à 300 m/s. Les épaisseurs de chaque plaque peuvent être modifiées indépendamment, et l'épaisseur de la lame d'air est fixe.

La Figure 6 montre les itérations de l'algorithme d'optimisation dans le cas où le projectile est bloqué par le système de protection. 70 itérations, correspondant à environ 70 heures sur 24 cœurs de PANDO, sont nécessaires pour converger vers les épaisseurs normalisées finales : 1,00 pour la plaque avant et 1,23 pour la plaque arrière (masse surfacique normalisée : 1,00). En comparaison, un modèle numérique similaire montre qu'un système de protection monolithique nécessite une épaisseur normalisée de 3,34 (masse surfacique normalisée : 1,49). Le Tableau 3 résume ces résultats.

Ces différences sont liées au mode de ruine en jeu. Dans la protection tricouche, la propagation du poinçonnage est perturbée par la lame d'air, et la présence de la pastille en alliage d'aluminium rend plus difficile le poinçonnage de la plaque arrière. Dans le cas monolithique, le poinçonnage se propage dans toute l'épaisseur de la plaque.

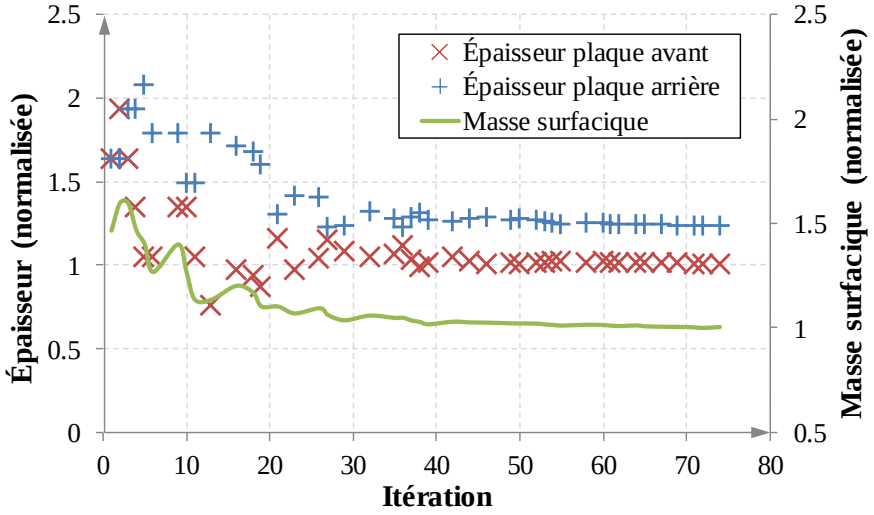

Figure 6. Itérations pour l'optimisation d'un système de protection multicouche impacté par un projectile à bout plat à 300 m/s. Valeurs normalisées.

Tableau 3. Résultats des optimisations (valeurs normalisées)

	Épaisseur plaque avant	**Épaisseur plaque arrière**	**Masse surfacique**
Système tricouche optimisé	1,00	1,23	1,00
Système monolithique optimisé	3,34	-	1,49

4 Conclusion

Un modèle numérique a été construit pour reproduire des essais d'impact de projectiles en acier à haute résistance et à bout plat sur des systèmes de protection balistique constitués de plaques en alliage d'aluminium. Une première étape de calibration a été effectuée en se basant sur une corrélation entre vitesses résiduelles expérimentales et numériques. Ensuite, ce modèle a été testé dans le cas d'un impact sur un système multicouche, et les résultats numériques sont en accord avec les résultats expérimentaux. Enfin, ce système multicouche a été optimisé numériquement pour minimiser sa masse tout en conservant son rôle protecteur. Le processus d'optimisation a montré que, dans le cas étudié, un système multicouche est plus efficace qu'un système monolithique.

Les auteurs remercient l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) pour son soutien financier et CALMIP pour la mise à disposition de moyens de calcul haute performance.

Références

[1] I. G. Crouch, The Science of Armour Materials, Woodhead Publishing, 2017
[2] A. L. Florence, Interaction of Projectiles and Composite Armor. Part II. Stanford Research Inst. Menlo park CA, 1969
[3] M. Park, J. Yoo, D.T. Chung, An optimization of a multi-layered plate under ballistic impact, Int. J. Solids Struct. 42, 2005, pp. 123-137
[4] 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, 2019, pp. 185-208

[5] G.R. Johnson, W.H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, heigh strain rates and high temperatures, in Proceedings of the 7th Inf. Sympo. Ballistics, 1983
[6] E. Grüneisen, Theorie des festen Zustandes einatomiger Elemente, Ann. Phys., 1912
[7] G.R. Johnson, W.H. Cook, Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures, Eng. Fract. Mech. 21, 1985, pp. 31-48
[8] 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, 1976, pp. 773-781