

## Proposition de thèse

**Titre : Modélisation de la performance dynamique d'un système de protection céramique-colle-composite : analyse de la fonctionnalité de la couche de colle**

### Encadrement de la thèse :

- Institut Clément ADER : Pr. Frédéric LACHAUD / Pr. Eric PAROISSIEN / Dr Camille GILLET
- Icube / ISL : Pr Nadia BALOUHLI / Dr Yaël DEMARTY

### 1) Contexte

Cette proposition de thèse s'inscrit dans un projet amont concernant l'amélioration des performances de blindages dits « bi-dureté » constitués d'une couche de céramique (en face avant) et d'une couche de composite (en face arrière dite de backing) schématisés figure 1. La fonction principale de la couche céramique est de ralentir la progression du projectile impactant en dissipant de l'énergie par fragmentation [Rahbek 2017, Shokrieh 2008, Colar 2013, Colar 2015]. La fonction principale de la couche de backing est de retenir les fragments de céramique (critère de non-perforation) et de limiter l'enfoncement de la protection (critère d'enfoncement). Pour assembler ces deux matériaux, une colle est utilisée. Actuellement cette couche de colle n'est pas explicitement fonctionnalisée pour participer aux performances du blindage. **Un des objectifs principaux de ce projet est de comprendre et modéliser la fonction de cette couche pour l'amélioration du blindage**

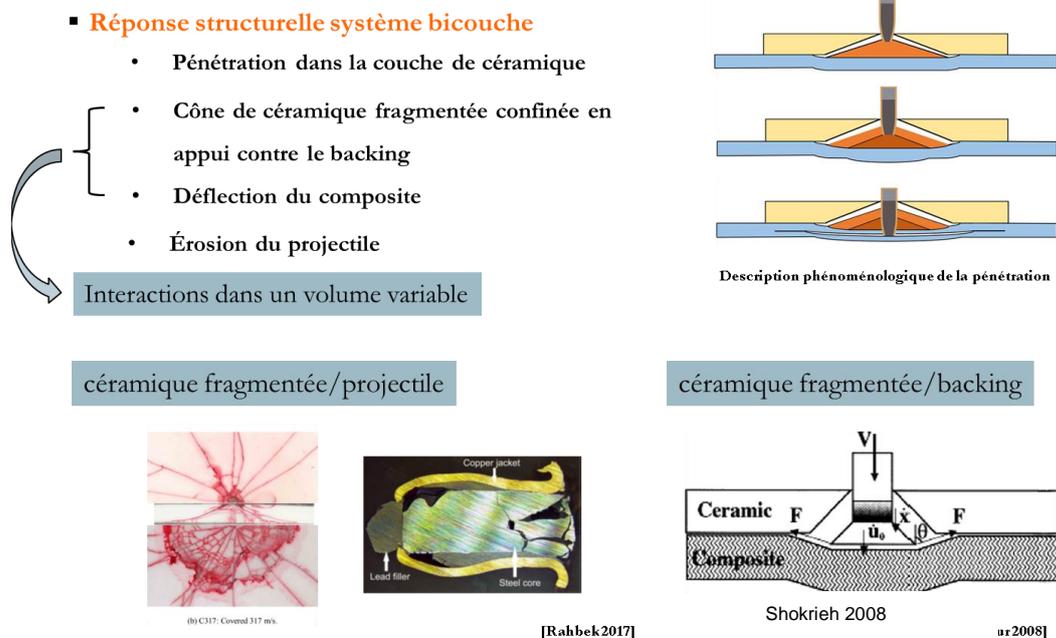


Figure 1 : principe de la protection balistique par l'assemblage de couche céramique et composite

S'il est fondamental de comprendre les modes de fragmentation de la face avant sous l'impact ainsi que les modes de rupture du backing, il s'avère nécessaire de considérer

l'influence de la résistance de la colle sur ces modes de ruptures. C'est en effet la résistance à la rupture de la colle qui permet au système d'avoir une rigidité en flexion suffisante limitant la déflexion face arrière, et permettant de prévenir la perforation de la couche de « backing » par des fragments de céramique. La colle a aussi pour rôle le maintien de la couche de « backing ». Il est aussi probable et important d'analyser par un couplage Essais-Calculs afin de comprendre si la couche de colle peut participer à l'amélioration de la fragmentation de la couche de céramique. **Un autre objectif de ce projet est donc de capitaliser les développements des modèles de comportement développés lors du précédent projet AID « tri-couches » [Essongue 2022] et de la thèse DGA/ISL de Tristan Camalet [Camalet 2020, Duplan 2020, Francart 2017] mais aussi des développements réalisés dans les laboratoires partenaires concernant le comportement des interfaces collées [Lopez-Puente 2005, Lélías 2018, Jaillon 2019a, Planas 2024],**

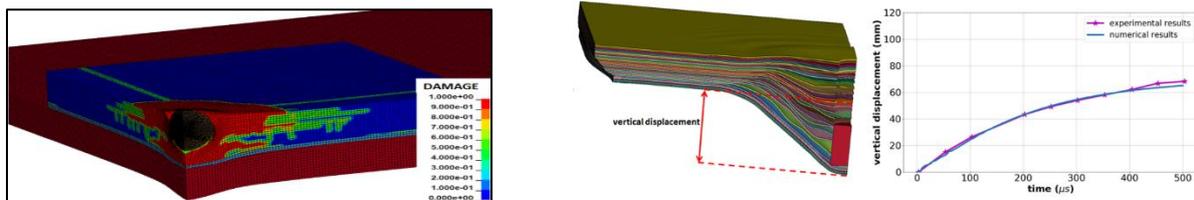


Figure 2 : Modèle numérique en dynamique rapide de la perforation d'une protection tri-couche

De plus, dans le développement de ces protections, la recherche de nouveaux matériaux et d'assemblages optimisés pour satisfaire au mieux les critères de protection (Absorption d'énergie, non perforation du backing, poinçonnement du backing, réutilisation, protection multi-impacts, recyclabilité et environnement) est nécessaire. Dans ce cadre, deux partenaires identifiés (actuellement partenaire de l'ISAE-SUPAERO) Arkema pour les colles et St Gobain pour les matériaux de protection (en face avant et pour le backing) souhaitent participer au projet par la fourniture de matériaux colles (Arkema) ou de matériaux nouveaux (Saint Gobain). **Ce dernier point constitue un objectif d'ouverture du projet concernant l'étude de nouveaux matériaux en face avant et de backing.**

Les travaux de thèse s'inscrivent donc à la suite de ces activités de recherche dans le domaine (travaux réalisés à l'ISAE-SUPAERO/ICA en collaboration avec ICUBE et l'ISL depuis 2017 (Thèse CAMALET / Post Doc ESSONGUE) et s'intéresse plus particulièrement à l'influence de la rupture ou des propriétés de tenue de la colle sur la modification de fragmentation de la céramique et la déflexion/endommagement du backing. Les travaux de thèse s'inscrivent aussi dans une thématique concernant la modélisation à grande vitesse du comportement des matériaux et des structures composites assemblés collés (et/ou boulonnés).

## 2) Plan des travaux

### Objectif global :

Il s'agit de qualifier la tenue mécanique d'un système de protection balistique par fonctionnalisation de couche de colle dans l'assemblage et d'évaluer son rôle sur la fragmentation de la céramique et la perforation du composite.

#### ➤ Bibliographie

- Endommagement et rupture des composites et céramiques, notamment ceux utilisés dans la protection
- Utilisation des modèles de comportement développés lors des deux précédentes études à savoir :
  - Modèle de fragmentation de céramique [Denoual 2000, Holmquist 2008, Camalet 2020, Duplan 2020, Forquin 2019]

- Modèle d'endommagement/rupture du backing [[Camalet 2020](#), [Ilyas 2010](#), [Cheng 2015](#), [Lachaud 2020](#), [Espinosa 2013](#)]
- Analyse des modèles numériques et quantification des points faibles et des manques dans les paramètres à identifier.
- Comportement en vitesse des interfaces collées, modèles cohésifs en vitesse, modélisation phase field
- Méthodologie d'identification du comportement en vitesse des interfaces collées

#### ➤ **Campagnes Expérimentales**

- Méthodologie d'identification du comportement en vitesse des interfaces Collées  
 Une première phase sera focalisée sur le choix de colle en fonction de leur capacité d'adhésion au matériau en présence et du rôle potentiel joué sur la tenue de l'ensemble tri-couche.  
 Les colles retenues seront alors caractérisées en statique, en dynamique dans leur configuration bulk et confinée. Pour ce faire, une campagne expérimentale sera réalisée sur les moyens d'essais des laboratoires sur différents bancs d'essais (statique, dynamique...etc). L'identification en vitesse pour certains types de sollicitation devra être développé
- Proposition d'un modèle de comportement en vitesse des colles étudiées  
 A la suite des campagnes d'essais, et sur la base de méthodes numériques développés et des modèles de comportement existants dans les laboratoires partenaires du projet, un modèle de comportement sera développé. Sa robustesse sera évaluée sur la base d'essais à différentes échelles et sur des matériaux collés de comportement simples et connus
- Campagne d'essais complémentaires sur le comportement des céramiques et des composites
  - A l'échelle des matériaux de l'assemblage collés (céramiques, composites Dyneema, Kevlar, certains paramètres des modèles développés lors des précédents travaux ont montré des limitations. Certains essais complémentaires pourront donc être réalisés pour améliorer la robustesse des modèles existants (Energie de rupture inter et intra laminaire par exemple, modèle visco-plastique à l'échelle des plis des composites, porosité importante de nouvelles céramiques...etc). Certains essais pourront être réalisés à des fins d'amélioration de ces paramètres (Essais de mécanique de la rupture, d'endommagement composites, de rupture céramique, impact sur les constituants seuls...etc)
  - A l'échelle de la protection et pour une éprouvette représentative constituée des 3 couches (céramique, colle, composite) plusieurs types d'essais seront définis :
    - Essais au canon hyper vitesse (ICA 800 m/s) seront réalisés.
    - Essais Balistique à l'ISL.

#### ➤ **Modélisation numérique**

- Les développements numériques de l'ensemble céramique-colle-composite mais aussi de chaque constituant ont déjà fait l'objet de nombreux travaux au sein des laboratoires partenaires. Cette base de modélisation sera la base des développements de ces travaux [[Camalet 2020](#), [Essongue 2022](#), [Lachaud 2020](#), [Planas 2024](#), [Schwartz 2023](#)]. Les premiers modèles permettant de comprendre la fonctionnalisation de la colle utiliseront les développements existants. Le dimensionnement des campagnes d'essais utilisera aussi certains de ces modèles.

- Implémentation des modélisations du comportement en vitesse des colles dans les modèles cohésifs [Planas 2024]
- Chaque campagne d'essais aux différentes échelles sera systématiquement comparée aux modèles numériques (EF, Particulaire, couplage modèle discret/continue...etc)]
- Utilisation de la méthode des macro-éléments pour la modélisation de l'interface collé. L'ICA a développé des méthodes utilisant la technique d'élément d'interface enrichi 1D et 2D pour application 2D et 3D [Paoissien 2000, Schwartz 2023, Orsatelli 2024]. Ces méthodes robustes et rapides pour être comparé à la méthode des éléments cohésifs pour la prévision du comportement de l'interface dans le tri-couche céramique-colle-composite.
- En lien avec les campagnes d'essais sur le comportement de nouvelles céramiques et des composites constituant le backing, des modifications des modèles de comportement existants pourront être proposées (code de calculs ABAQUS explicite) sous forme de « User Materials » [Lachaud 2020].
- Les campagnes d'essais à l'échelle de la protection tri-couche (impact bille et impact balistique) feront l'objet de comparaison essais-calculs sur la base des modèles enrichis.

Dans le cadre de ce projet, un Post-Doctorant travaillera en parallèle de la thèse à partir de la deuxième année de thèse.

Le candidat doit posséder des connaissances en matériaux et structures composites, en analyse non linéaire, en méthode numérique en dynamique rapide et avoir un goût prononcé pour des analyses couplées essais-calculs.

Mots clés : Fragmentation, endommagement, rupture, céramique, composite, collage, dynamique rapide, choc, impact, méthode numérique, banc d'essais de Hopkinson, Canon hypervitesse

### 3) Administratif

Nous recherchons un(e) étudiant(e) ayant de solides bases en mécanique du solide, science des matériaux, simulation numérique et caractérisation mécanique. Il devra être capable de :

- concevoir des nouveaux bancs d'essais dans les laboratoires de l'équipe, et assurer son développement en coordination avec les membres de l'équipe.
- réaliser des simulations et interpréter les résultats.
- présenter ses résultats et rédiger des articles.

Le ou la candidat(e) devra donc posséder :

- le goût pour le travail expérimental et numérique,
- des qualités humaines et de management qui lui permettront de bien s'intégrer dans les différentes équipes.
- des compétences rédactionnelles et de communication en anglais

Date : Début de thèse octobre/novembre 2024

Durée : 3 ans

Rémunération : 2100 net / mois (augmentation prévue en 2026 en accord avec la loi de programmation de la recherche), vacation au sein de l'ISAE SUPAERO possible (100 à 200 euros en plus par mois)

Contacts : envoyer un CV et lettre de motivation à :

[frederic.lachaud@isae-supaero.fr](mailto:frederic.lachaud@isae-supaero.fr), [Eric.Paoissien@isae-supaero.fr](mailto:Eric.Paoissien@isae-supaero.fr), [Camille.Gillet@insa-toulouse.fr](mailto:Camille.Gillet@insa-toulouse.fr), [bahlouli@unistra.fr](mailto:bahlouli@unistra.fr), [Yael.Demarty@isl.eu](mailto:Yael.Demarty@isl.eu)

Au besoin un entretien en visio peut être réalisée afin de discuter du sujet, fonction des attentes du candidat ou des différents questionnement liés à l'environnement

### Références non exhaustive:

- [Colard 2013] Colard L, Kerisit C, Rusinek A, Azari Z and Daire P. Investigations on dual-hardness lightweight armor. Congrès Français de Mécanique 2013, Bordeaux, 26-30 Août 2013.
- [Colard 2015] Colard L, "Etude du comportement sous impact balistique d'un blindage multicouche à composantes carbure de bore et aluminium », thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2015.
- [Camalet 2020] Tristan Camalet Caractérisation et modélisation du comportement dynamique des matériaux constituant une structure de protection céramique-composite Thèse de l'Université de Strasbourg, 2020.
- [Chen 2015] Chen C., Michel L., Lachaud F., Espinosa C..Simulation d'impact de composites stratifiés et effets de l'environnement. 19ème Journées Nationales sur les composites, Lyon 28-30 Juin 2015.
- [DaSilva, 2009] LFM DA SILVA, PJC DAS NEVES, RD ADAMS, and JK SPELT. Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey. Int J Adhesion Adhesives. 29, pp. 319-330. 2009
- [Denoual 2000] C. Denoual, F. Hild. damage model for the dynamic fragmentation of brittle. Solids. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 183 (2000) 247-258
- [Duplan 2020]. Duplan Yannick Caractérisation expérimentale et modélisation des propriétés de rupture et de fragmentation dynamiques d'un noyau de munition et de céramiques à blindage. These de l'Université de Grenoble-Alpes, 2020
- [Espinosa 2013] Christine Espinosa, Cheng Chen, Frédéric Lachaud, Laurent Michel, Miriam Ruiz-Ayuso. Inner damage and external dent in composite structures after impact – Part II : numerical modelling. International Conference on Fracture and Damage Mechanics, Italy 2013.
- [Essongue 2022] Simon Essongue. Influence de la tenue à rupture de la couche de colle sur la performance d'un système céramique-colle-composite. Rapport d'avancement AID Projet « Tri-Couches », ISAE-SUPAERO 2022
- [Forquin 2019] P. Forquin, M. Blasonea, D. Georges, M. Dargaud, E. Ando. Modelling of the fragmentation process in brittle solids based on x-ray micro-tomography analysis. 24ème Congrès Français de Mécanique Brest, 26 au 30 Août 2019
- [Francart 2017] Francart C., "Experimental and numerical study of the mechanical behavior of metal/polymer multilayer composite for ballistic protection", thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 2017.
- [Holmquist 2008] Holmquist, T.J. and G.R. Johnson, *Response of boron carbide subjected to high-velocity impact*. International Journal of Impact Engineering, 2008. **35**(8): p. 742-752.
- [Ingen, 1994] JW VAN INGEN, and A VLOT. Stress analysis of adhesively bonded single lap joints. (Report LR-740). Delft University of Technology. April 1993
- [Ilyas 2011] M. Ilyas, C. Espinosa, F. Lachaud, L. Michel, Michel Salaün Modelling Aeronautical Composite Laminates Behaviour under Impact using a Saturation Damage and Delamination Continuous Material Model. Advances in Fracture and Damage Mechanics IX Key Engineering Materials Vols. 452-453 (2011) pp 369-372, © (2011) Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.369.
- [Jaillon 2019a] Jaillon A., Jumel J., Paroissien E., Lachaud F., Mode I cohesive zone model parameters identification and comparison of measurement techniques for robustness to the law shape evaluation. The Journal of Adhesion, 96:1-4, 272-299, 2019.
- [Jaillon 2019b] Jaillon A., Jumel J., Lachaud F., Paroissien E. Mode I Cohesive Zone Model Parameters Identification and Comparison of Measurement Techniques based on uncertainty estimation. International Journal of Solids and Structures, 191-192, 577-587, 2019

- [Lachaud 2023] Frédéric Lachaud, Christine Espinosa, Eric Paroissien. Influence de la tenue à rupture de la couche de colle sur la performance d'un système céramique-colle-composite. Rapport final AID Projet « Tri-Couches », ISAE-SUPAERO 2023
- [Lachaud 2020] Lachaud F., Boutin M., Espinosa C., Hardy D. Failure prediction of a new sandwich panels based on flax fibers reinforced epoxy bio-composites. *Composite Structures*, 2020
- [Lachaud 2011] F. Lachaud. Contribution à l'analyse multi échelle du comportement mécanique non linéaire matériau des structures composites. Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier. 2011
- [Lelias 2018] Lelias G., Paroissien E., Lachaud F., Morlier J., On the experimental characterization of thin adhesive layers loaded in mode I, mode II and mixed-mode I/II. *International Journal of Solids and Structures*, 2018
- [Lopez-Puente 2005] J. López-Puente, A. Arias, R. Zaera, C. Navarro. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. *Int. J. Imp. Eng.* 32(1-4), pp 321-336. 2005
- [Orsatelli 2024] Orsatelli J. B., Paroissien E., Lachaud F., Schwartz S.. Influence of modelling hypotheses on strength assessment of CFRP stepped repairs. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024
- [Paroissien 2006] E. Paroissien. Contribution aux Assemblages Hybrides (Boulonnés/Collés) – Application aux Jonctions Aéronautiques. Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3 / Institut de Génie Mécanique (IGM). 2006
- [Paroissien 2013a] E. Paroissien, F. Lachaud and T. Jacobs. A simplified stress analysis of bonded joints using macro elements. In book *Advances in modeling and design of adhesively bonded systems*, Chap. 4, p.93-146. Ed. MITALL K. L.; KUMAR S. 2013
- [Paroissien 2013b] E. Paroissien, F. Gaubert, A. Da Veiga and F. Lachaud. Elasto-Plastic Analysis of Bonded Joints with Macro-Elements. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 27(13)1464-1498. 2013
- [Pawar 2016] M.J. Pawar, A. Patnaik, S.K. Biswas, U. Pandel, I.K. Bhat, S. Chatterjee, A.K. Mukhopadhyay, R. Banerjee, B.P. Babu. Comparison of ballistic performances of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN ceramics. *Int. J. Imp. Eng.* 98, pp 42-51. 2016.
- [Planas 2024] Planas M., Paroissien E., Lachaud F., Gerard P.. A finite-thickness rate-dependent cohesive zone model. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024.
- [Rahbek 2017] Rahbek Dennis B., Jeffrey W. Simons, Bernt B. Johnsen, Takao Kobayashi Donald A. Shockey. Effect of composite covering on ballistic fracture damage development in ceramic plates. *International Journal of Impact Engineering*. Volume 99, January 2017, Pages 58-68
- [Shokrieh 1982] Shokrieh M.M., Javadpour G.H. Penetration analysis of a projectile in ceramic composite armor. *Composite Structures* 82 (2008) 269–276
- [Schwartz 2023] Schwartz S., Paroissien E., Lachaud F.. An enriched finite element for the simplified stress analysis of an entire bonded overlap: continuum macro-element. [*International journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 129, February 2024.