

Optimisation du comportement mécanique de structures composites soumises à des hyper-accélération

Optimization of the mechanical behavior of composite structures subjected to hyper-accelerations

C. Avril¹, D. Perreux¹, F. Thiebaud¹, B. Reck²

1 : MAHYTEC
Centre d'activités nouvelles, 210 avenue de Verdun – F - 39100 DOLE
e-mail : contact@mahytec.com

2 : Institut de Recherches franco-allemand de Saint-Louis
5 rue du général Cassagnou – F - 68301 SAINT-LOUIS CEDEX
e-mail : reck@isl.tm.fr

Résumé

Afin de repousser les limites mécaniques des projectiles composites accélérés à l'aide du lanceur électromagnétique PEGASUS à l'Institut de Recherches franco-allemand de Saint-Louis, deux campagnes de caractérisation expérimentale ont été menées sur des matériaux verre/PEEK. L'étude de la résistance interlaminaire et du comportement en traction des matériaux sélectionnés a abouti à l'identification des proportions fibres/résine les plus adaptées, à la mise au point d'un protocole de fabrication de stratifiés épais et à la réalisation de prototypes ayant alimentés une série de six tirs avec PEGASUS. Les radiographies-éclair des stratifiés en sortie du tube de lancement ont mis en évidence la résistance mécanique remarquable des stratifiés optimisés et une vitesse de 2440 m/s a pu être atteinte.

Abstract

In the perspective of overcoming the mechanical limits of the composite projectiles that are accelerated by the electromagnetic launcher PEGASUS at the french-german Research Institute of Saint-Louis, two experimental characterization campaigns have been carried out to investigate Glass/PEEK materials. The study of the interlaminar resistance and tensile behaviour of the materials led to the identification of the most suitable fiber/resin ratio, the implementation of a fabrication process for thick laminates and the realization of several prototypes that were used for six shots with PEGASUS. The flash-radiographs which were taken at the end of the launching tube have shown the remarkable mechanical resistance of the modified laminates and a velocity of 2440 m/s has been reached.

Mots Clés : Thermoplastiques, process de fabrication, caractérisation expérimentale, stratifiés épais, accélération électromagnétique

Keywords : Thermoplastic, fabrication process, experimental characterization, thick laminates, electromagnetic acceleration

1. Introduction

Le lanceur électromagnétique PEGASUS (figure 1) conçu par l'institut de Recherches franco-allemand de St-Louis (ISL) permet d'accélérer des masses de plusieurs centaines de grammes à des vitesses supérieures à 2500 m/s [1]. La technologie d'armature électrique développée à l'ISL implique le recours à des composites hautes-performances pour la réalisation de projectiles stratifiés. En raison des sollicitations extrêmes qu'ils sont appelés à subir, les matériaux utilisés doivent notamment disposer d'une résistance interlaminaire et à la traction très élevées.

Les teneurs en fibres et matrice des stratifiés ont une incidence directe sur leur comportement mécanique durant l'accélération : une forte teneur en fibres de renfort diminuera significativement le risque de rupture en traction des projectiles, tandis qu'une teneur en résine insuffisante engendrera inévitablement des délaminages préjudiciables. Afin d'identifier les paramètres de fabrication optimaux, deux matériaux composites tissés verre E/PEEK et verre S2/PEEK ont été sélectionnés et commandés sous la forme de préimprégnés. De nombreux stratifiés ont été produits afin d'alimenter deux campagnes d'essais distinctes.

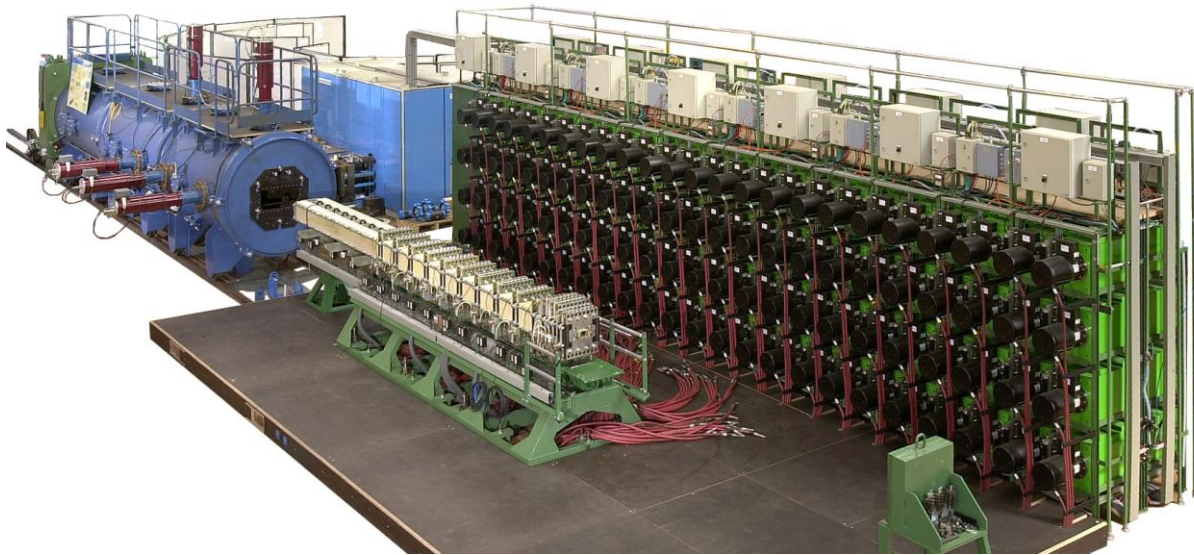


Fig. 1. Le lanceur électromagnétique PEGASUS de l'ISL et son banc d'alimentation d'une capacité de 10 MJ

La première campagne consistait d'une part à quantifier la ténacité interlaminaire des stratifiés verre/PEEK et d'autre part à déterminer l'influence de la teneur en résine sur la tenue au délaminage. La seconde campagne d'essais avait pour objectif de caractériser le comportement à la traction des stratifiés verre/PEEK et de quantifier l'apport en termes de résistance mécanique des fibres de verre S2 par rapport aux fibres de verre E.

2. Etude de la ténacité à la rupture interlaminaire en mode I

L'étude de la résistance interlaminaire des stratifiés s'est basée sur la méthode DCB (Double Cantilever Beam). Les éprouvettes verre S2/PEEK ayant servi de support à cette étude ont été fabriquées au moyen d'un système de pressage mis au point au Laboratoire de Mécanique Appliquée de Besançon à partir d'une machine de traction/compression. Quatre configurations ont été testées :

- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 6 bar
- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 10 bar
- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 20 bar
- Stratifié 26 couches Verre S2/PEEK consolidé à 30 bar

Un film de PTFE très fin placé entre la 13^{ème} et la 14^{ème} couche des stratifiés a servi d'amorce de fissure. En plus de ses propriétés non-adhésives, le film utilisé présente l'avantage de résister aux hautes températures (390-400°C) requises pour la mise en forme du PEEK. Le protocole de mise en œuvre a consisté à appliquer une force initiale de compression de 10 kN, équivalente à une pression d'environ 6 bar, et à démarrer simultanément le cycle de température. Une fois une température de 380°C atteinte, la pression de consolidation souhaitée (6, 10, 20 ou 30 bar) a été appliquée. Le four était ouvert 30 minutes plus tard, tout en maintenant la pression choisie. Afin d'obtenir un refroidissement lent, le moule était conservé à l'intérieur du four jusqu'à atteindre la température ambiante. La figure 2 présente pour chaque configuration l'évolution de l'épaisseur des empilements de couches en fonction du temps et de la température. Très logiquement, l'épaisseur des plaques Verre/PEEK obtenues décroît avec l'augmentation de la pression appliquée. Les épaisseurs par pli polymérisé sont ainsi de 0.219 mm pour une pression maximale de 6 bar, 0.204 mm pour 10 bar, 0.190 mm pour 20 bar, et 0.184 mm pour 30 bar. La quantité de fibres de verre restant inchangée dans chaque cas, seule la teneur en PEEK varie. En faisant varier la pression de consolidation de nos stratifiés, c'est bel est bien l'influence de la quantité de résine sur la tenue au délaminage que l'on souhaite étudier. Chaque essai est décomposé en deux étapes. La première étape consiste à charger l'éprouvette jusqu'à créer une pré-fissure sur quelques millimètres à partir de l'insert. L'éprouvette est alors complètement déchargée. La deuxième étape consiste à recharger l'éprouvette afin de propager le délaminage à partir de la pré-fissure sur la longueur souhaitée. Pour les deux chargements, la vitesse de déplacement de la traverse mobile a été fixée à 3 mm/min. Lors du second chargement, c'est-à-dire lors de la propagation du délaminage à partir de la pré-fissure, la position de la fissure et les valeurs de charge et de déplacement correspondantes ont été relevées tous les 5mm.

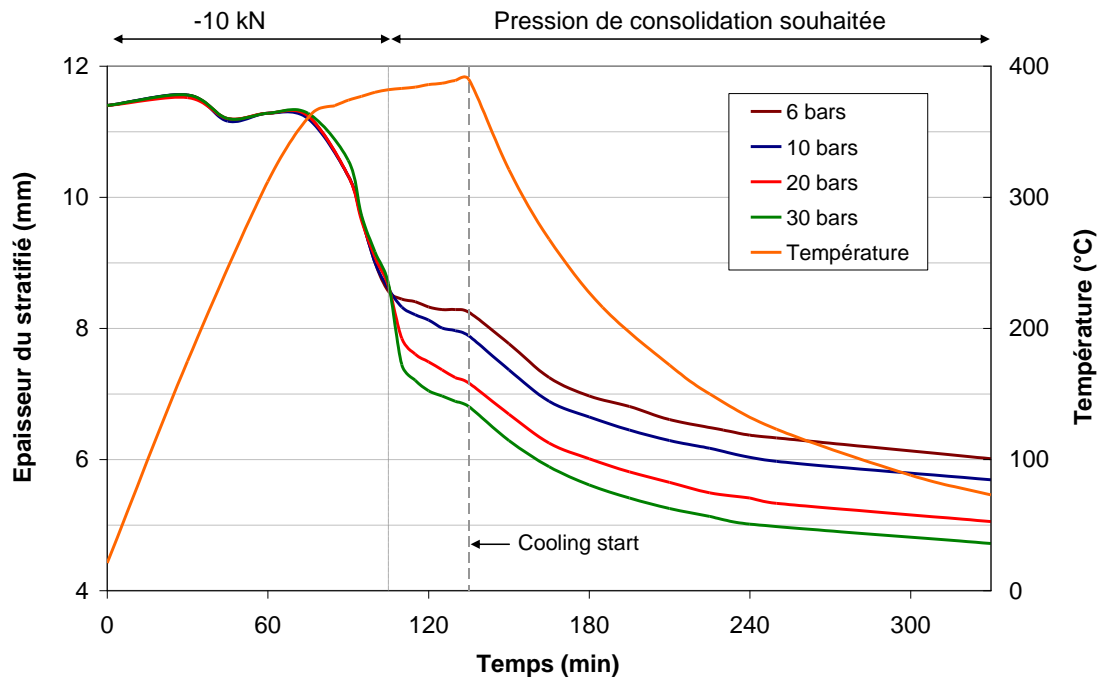


Fig. 2. Evolution de l'épaisseur des stratifiés en fonction de la température et de la pression appliquée

A partir des courbes charge-déplacement (figure 3) et du suivi de la longueur de délaminage, il est alors possible de calculer les valeurs du taux de restitution d'énergie élastique correspondant à l'initiation du délaminage (à partir de la pré-fissure) et à sa propagation. La valeur de G_{lc} correspondant à l'initiation du délaminage est déterminée graphiquement. Les valeurs de G_{lc} correspondant à la propagation du délaminage sont quant à elles déterminées à partir des relevés effectués tous les 5 mm. La détermination de G_{lc} a reposé sur le recours à quatre méthodes d'analyse différentes : la méthode SBT (Simple Beam Theory), la méthode CBT (Corrected Beam Theory), la méthode CC (Compliance Calibration) et enfin la méthode MCC (Modified Compliance Calibration).

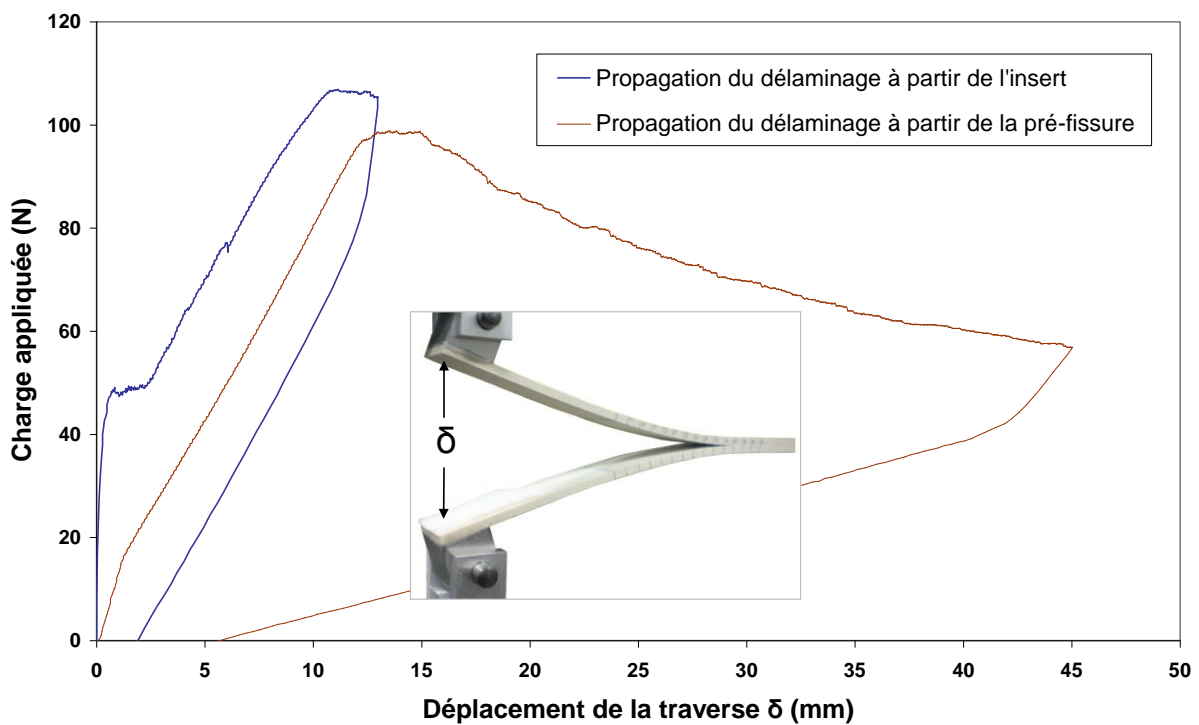


Fig. 3. Exemple de courbe charge-déplacement obtenue lors d'un essai DCB

Les valeurs de propagation de G_{lc} sont données en figure 4 :

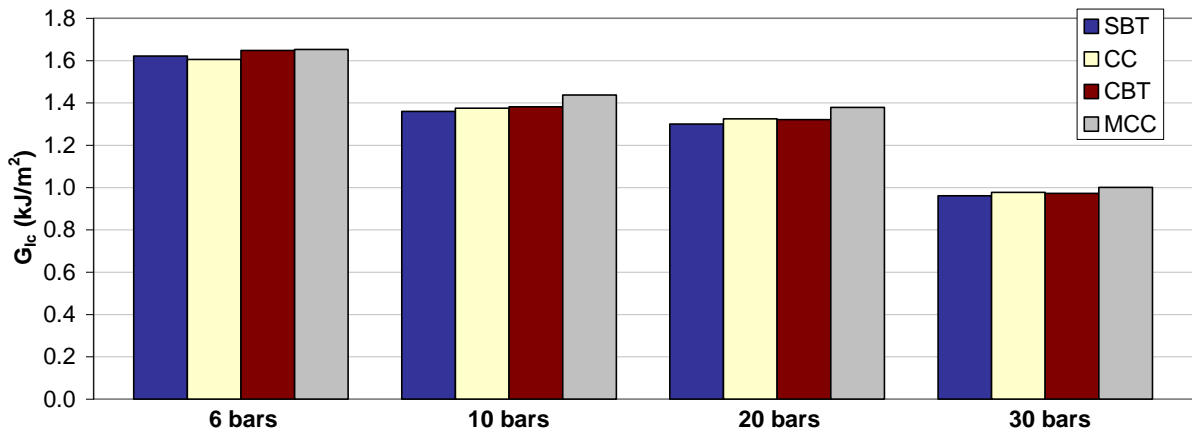


Fig. 4. Comparaison des valeurs de propagation de G_{IIc}

L'évolution générale des valeurs moyennes de propagation vis-à-vis de la pression de consolidation montre qu'une pression excessive entraîne une diminution conséquente de la ténacité à la rupture interlaminaire. Il est intéressant de constater la différence importante entre les valeurs obtenues pour les éprouvettes consolidées à 6 et 10 bar. Une augmentation de seulement 4 bar provoque une chute de G_{IIc} d'environ 15%. L'un des enjeux de l'optimisation du comportement mécanique des structures de maintien du lanceur PEGASUS consiste donc à trouver le bon compromis entre résistance à la traction et résistance au délaminage en mode I. A épaisseur de stratifié constante, une pression de consolidation accrue permet en effet d'augmenter la teneur en fibres de verre, et par conséquent la tenue à la traction. En revanche, l'allègement de la structure et l'amélioration de sa tenue à la rupture interlaminaire impose de limiter le taux de renforcement. D'un point de vue quantitatif, les valeurs élevées obtenues pour les échantillons les plus riches en résine attestent de la haute ténacité de la résine PEEK. A titre comparatif, Alif et al. dans le cadre d'une étude sur l'influence du motif de tissage sur la résistance au délaminage en mode I de composites à renforts tissés [2], ont réalisé des tests DCB sur des stratifiés Verre/Epoxy 8H-satin et obtenu une valeur de G_{IIc} égale à 775 J/m^2 . Pereira et al. ont conduit des tests DCB sur des stratifiés multidirectionnels Verre/Epoxy satin déséquilibrés (20% de fibres dans le sens trame) pour caractériser l'influence de l'orientation des plis [3]. Dans le cas des stratifiés $0/0^\circ$ et $0/90^\circ$ qui se rapprochent le plus de nos éprouvettes, les essais ont abouti respectivement à des valeurs d'environ 900 et 1000 J/m^2 . S'il reste difficile de comparer des résultats obtenus dans des conditions et avec des matériaux différents, le gain de ténacité offert par une matrice thermoplastique PEEK par rapport à une matrice thermodurcissable de type Epoxy apparaît indéniable et précieux pour l'application très particulière que représentent les lanceurs électromagnétiques. Concernant la comparaison des méthodes d'analyse, la méthode MCC conduit aux valeurs de G_{IIc} les plus élevées. Les trois autres méthodes donnent des résultats relativement proches. Cette étude s'inscrivant dans une démarche comparative plus que quantitative, il est important de noter que pour toutes les méthodes de calcul utilisées, une augmentation de la pression de consolidation entraîne systématiquement une diminution de G_{IIc} .

3. Etude de la résistance à la traction quasi-statique

En cours d'accélération, les projectiles stratifiés sont soumis à de brusques changements entre efforts de compression et efforts de traction. Le matériau à base de fibres de verre S2 a principalement été choisi dans l'optique d'accroître la résistance en traction des stratifiés. Afin d'évaluer l'apport réel de ce type de fibres par rapport aux fibres de verre E, une campagne d'essais de traction quasi-statiques a été réalisée. L'ensemble des éprouvettes a été réalisé suivant un protocole de mise en œuvre identique. Après avoir placé les couches de préimprégnés dans l'enceinte du four, une pression de 10 bar a été appliquée et le cycle de chauffe démarré. Une fois une température de 380°C atteinte, une pression de 30 bar a été appliquée. Trente minutes plus tard, le four était ouvert, et la pression maintenue jusqu'au refroidissement complet du moule. Dans l'optique d'homogénéiser les efforts de traction dans la zone utile de l'éprouvette et ainsi limiter les risques de rupture des éprouvettes au niveau des mors de la machine d'essai, des talons biseautés en aluminium ont été usinés. Une éprouvette de traction type est présentée en figure 5. Chaque éprouvette a été sollicitée en traction dans le sens chaîne par le biais d'un déplacement imposé de la traverse mobile de la machine d'essai à une vitesse de 1 mm/min . La déformation longitudinale des éprouvettes, mesurée à l'aide d'un extensomètre, ainsi que la force appliquée ont enregistré par le biais d'une acquisition continue.

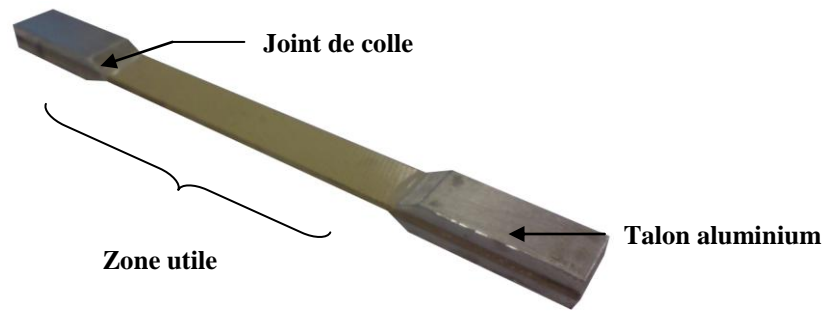


Fig. 5. Eprouvette de traction verre S2/PEEK

Les courbes contrainte-déformation obtenues à partir des éprouvettes verre E/PEEK sont présentées en figure 6. La perte de rigidité ne se manifeste progressivement, comme en témoigne la légère incurvation des courbes expérimentales. Les craquements clairs entendus quasi-continuellement lors des essais suggèrent également un endommagement progressif des stratifiés par rupture des fibres de renfort. Une contrainte à rupture moyenne de 421 MPa a été constatée, avec un écart-type relatif de 7.26 %. La déformation à rupture moyenne s'est avérée relativement faible pour ce matériau puisqu'égale à 1.68 %. Le module d'Young initial a été calculé en effectuant une régression linéaire des données mesurées sur la plage de déformation 0 - 0.15 %. Une valeur de 32.2 GPa a été obtenue. La rupture des éprouvettes s'est produite soit au centre de la zone utile, soit à l'extrémité des talons biseautés. Aucune variation significative des contraintes à rupture n'a cependant été relevée dans le second cas. L'hypothèse d'une rupture prématurée de certaines éprouvettes consécutive à une forte concentration de contraintes peut ainsi être écartée.

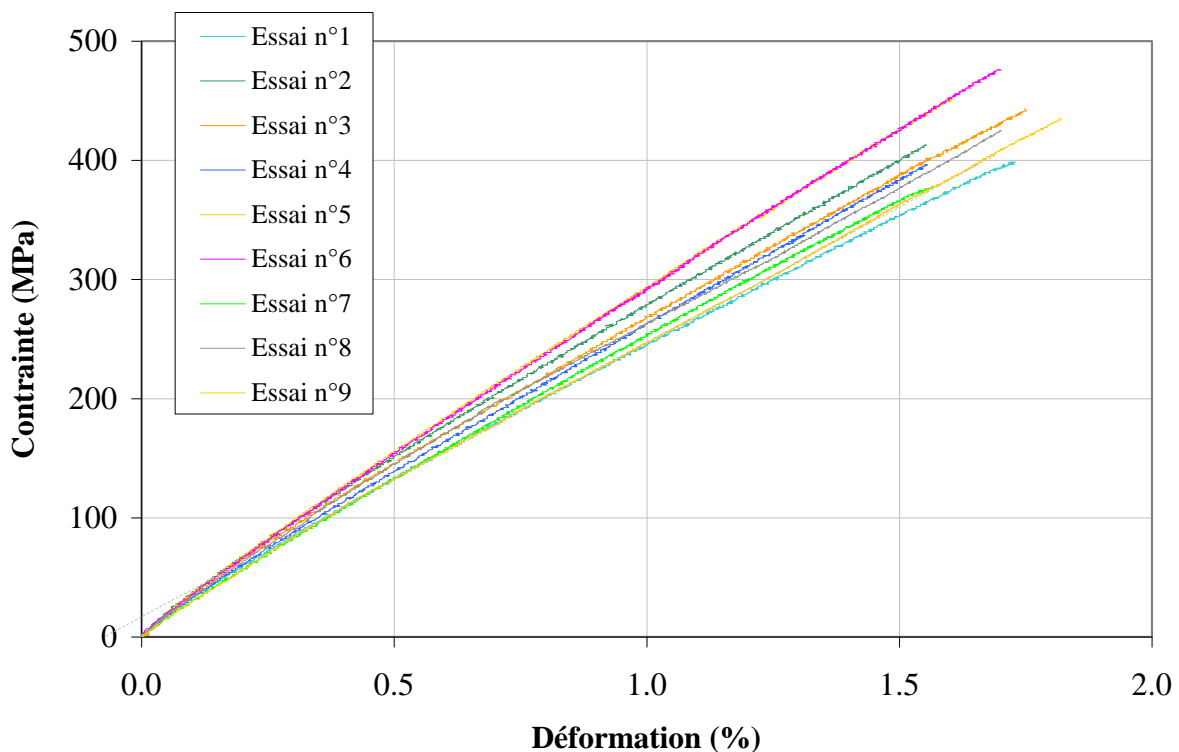


Fig. 6. Courbes contrainte-déformation des éprouvettes verre E/PEEK sollicitées en traction

Les courbes contrainte-déformation obtenues à partir des éprouvettes verre S2/PEEK sont présentées en figure 7. Le profil légèrement incurvé des courbes est similaire à celui observé pour le matériau verre E/PEEK et suggère là encore un endommagement progressif des éprouvettes par ruptures consécutives de fibres. Les contraintes à rupture relevées mettent en évidence l'apport significatif des fibres de verre de type S2, puisqu'une valeur moyenne de 636 MPa a été calculée, avec un écart-type relatif approchant les 9 %. En termes de résistance à la traction quasi-statique et en comparaison du matériau verre E/PEEK, cette valeur représente un gain de performance supérieur à 50 %. La déformation à rupture moyenne est égale à 2.32 %. Le module d'Young initial, calculé de la même manière que précédemment, s'élève à 33.1 GPa, soit une valeur légèrement supérieure à celle du composite verre E/PEEK.

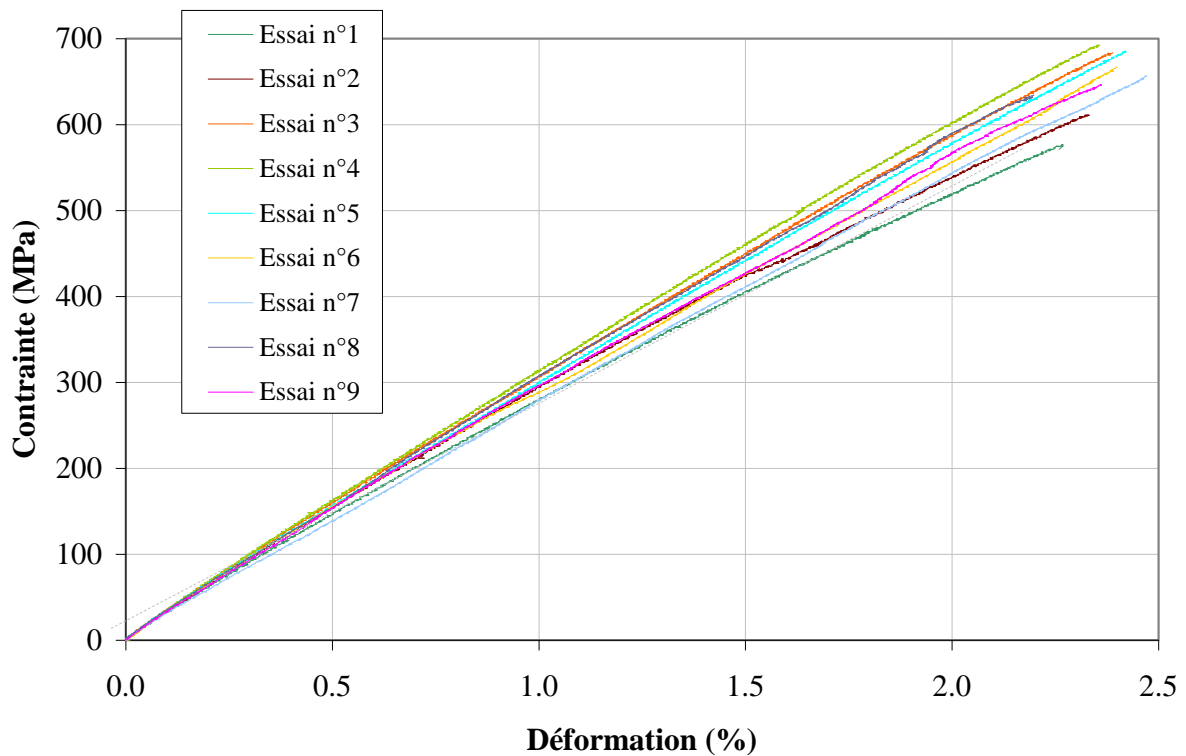


Fig. 7. Courbes contrainte-déformation des éprouvettes verre S2/PEEK sollicitées en traction

4. Réalisation et tirs de projectiles verre S2/PEEK

Les essais de traction quasi-statique ont mis en évidence l'apport significatif des fibres de verre S2 en termes de résistance mécanique. Les essais de rupture interlaminaire en mode I ont en outre révélé des valeurs de ténacité intéressantes pour le matériau verre S2/PEEK. Afin d'évaluer si ces résultats prometteurs obtenus à partir d'une fabrication en interne des éprouvettes peuvent se traduire par une résistance accrue des sabots aux hyper-accélérations, des stratifiés épais ont été réalisés puis accélérés par le lanceur PEGASUS. L'épaisseur des structures de maintien de l'armature des projectiles est naturellement dépendante du calibre du lanceur. Celui de PEGASUS étant de 40 mm, l'épaisseur des sabots doit idéalement être comprise entre 39 et 39.5 mm. Une telle épaisseur nécessite l'empilement de 210 couches de préimprégné. Au vu de la profondeur du moule utilisé, une consolidation de la totalité des couches en une seule et unique étape s'est avérée irréalisable. Les résines thermoplastiques pouvant être remises en forme après polymérisation, le protocole de fabrication des stratifiés s'est donc déroulé en trois étapes :

- Première étape : consolidation d'un premier stratifié de 100 couches
- Deuxième étape : consolidation d'un second stratifié identique au premier
- Troisième étape : consolidation des deux stratifiés obtenus précédemment avec répartition des 10 couches restantes au dessus, sous et entre les deux blocs

Une pression de consolidation de 30 bar a été utilisée. Ce choix est motivé par la volonté d'augmenter sensiblement la proportion de fibres de renfort des stratifiés et par conséquent leur résistance à la traction. Comme l'a montré la campagne d'essais DCB, le risque est de diminuer en même temps la ténacité à la rupture interlaminaire de façon préjudiciable. Une fois démoulés, les stratifiés épais sont tout d'abord détournés sur 10 mm afin d'éliminer les hétérogénéités. Trois sabots sont alors usinés par bloc de composite. La figure 8 présente l'un des projectiles (structure de maintien et armature) accéléré par PEGASUS. La masse moyenne du sabot composite étant de 195 g et celle des brosses de cuivre de 125 g, la masse moyenne totale des projectiles est de 320 g. L'épaisseur totale s'est avérée légèrement inférieure aux prévisions puisqu'avoisinant 38 mm. L'accélération de structures composites fabriquées totalement en interne n'ayant jamais été expérimentée auparavant, la démarche adoptée a consisté à débiter la campagne de tirs avec une énergie relativement faible, puis à augmenter progressivement la tension de charge des condensateurs. Le tableau 1 présente les caractéristiques électriques de chacun des six tirs :

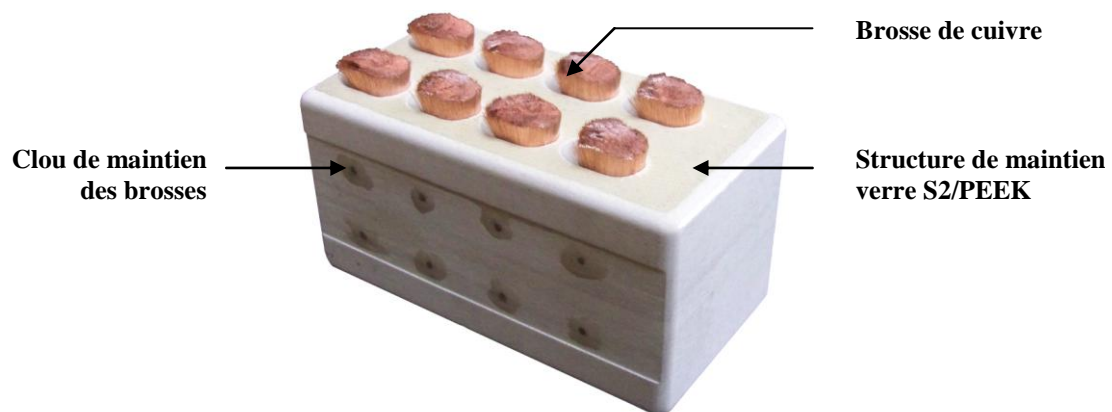


Fig. 8. Structure de maintien verre S2/PEEK accélérée par PEGASUS

N° tir	Tension de charge des condensateurs (kV)	Énergie électrique totale (MJ)	Courant maximal (mA)	Force accélératrice maximale (kN)	Accélération maximale (G)
1	5.5	2.57	0.926	171.5	54630
2	5.75	2.81	0.970	188.2	59945
3	6.0	3.06	1.054	222.2	70777
4	6.25	3.59	1.081	233.7	74450
5	6.5	3.87	1.110	246.4	78498
6	6.75	4.16	1.166	271.9	86618

Tableau 1. Paramètres électriques des tirs PEGASUS

Des radiographies-éclair des projectiles sont prises en trois points différents après accélération : directement en sortie du tube de lancement, puis à $1,50\text{ m}$ et $2,735\text{ m}$ de la bouche du lanceur. La méthode de calcul de la vitesse des projectiles la plus précise consiste à replacer les clichés développés dans leur position initiale et à mesurer les distances séparant les photographies du projectile entre chaque point de capture. Connaissant les temps de déclenchement précis des trois tubes à rayons X, il est alors possible de déterminer la vitesse avec une erreur inférieure au pourcent. Le tableau 2 présente les vitesses obtenues pour chaque tir et les dommages occasionnés sur la cible, une plaque d'acier d'épaisseur 50 mm . Le rendement, calculé comme le rapport de l'énergie cinétique du projectile sur l'énergie électrique stockée est également précisé :

N° tir	Vitesse du projectile (m/s)	Rendement (%)	Impact
1	1930	22.8	Profondeur 45 mm
2	2070	23.9	Plaque perforée
3	2170	24.1	Plaque perforée
4	2270	25.0	Plaque perforée
5	2360	24.9	Plaque perforée
6	2440	24.7	Plaque perforée

Tableau 2. Vitesse du projectile, rendement et dommage sur la cible des 6 tirs effectués

Un exemple de cible perforée représentatif de l'ensemble des impacts observés est présentée figure 9 :

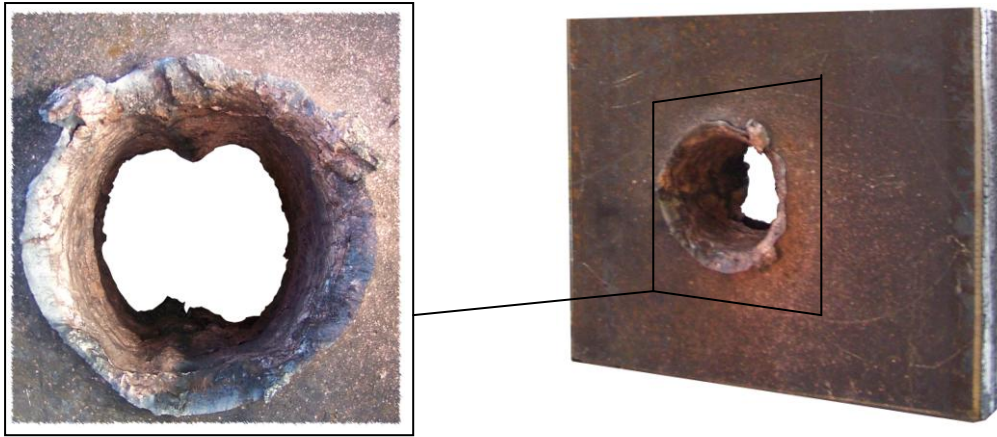


Fig. 9. Cible perforée après impact

Dans tous les cas, un seul impact a été relevé sur la cible, ce qui signifie que le stratifié composite ne s'est pas rompu en cours d'accélération. La forme du trou elle-même est riche d'enseignements : il apparaît clairement que les deux rangées de brosses de cuivre qui ont perforé la plaque ont été maintenues droites et parallèles. La quantité importante de cuivre retrouvée autour du trou atteste également du bon maintien des ponts de courant. Le rôle premier du sabot composite est d'assurer le maintien de l'armature afin que le contact électrique avec les rails, et par suite la transmission des forces accélératrices à la partie perforante du projectile, soit optimal tout au long de l'accélération. La tension entre les rails au niveau de la bouche du lanceur est un indicateur précieux de la qualité du contact électrique entre les rails et l'armature du projectile. Plus la tension de bouche est faible, meilleur est le contact. La figure 10 donne un exemple de l'évolution de la tension de bouche durant l'accélération du projectile :

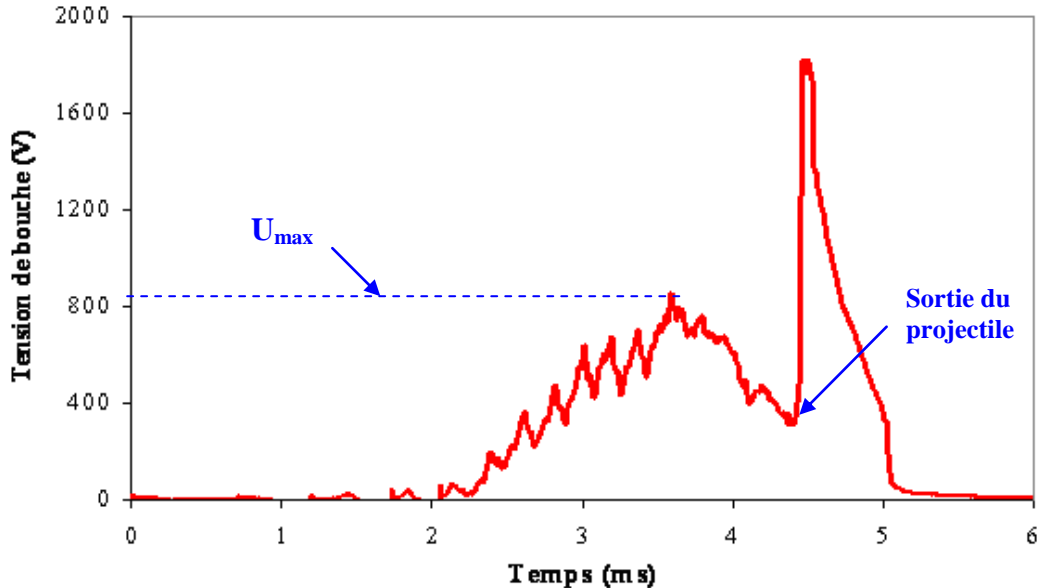


Fig. 10. Evolution de la tension de bouche en cours d'accélération

Pour l'ensemble des tirs effectués, le profil obtenu est similaire à celui de la figure 126. Un très bon contact électrique est constaté jusqu'à la sixième injection, à partir de laquelle le contact se dégrade progressivement. Le grand pic correspond à la sortie du projectile du tube de lancement. Les valeurs maximales de la tension de bouche ainsi que le temps de sortie du projectile pour chacun des six tirs sont répertoriés dans le tableau 3. Les valeurs maximales des tensions de bouche relevées sont toutes inférieures au kilovolt. Les structures de maintien composites ont donc tenu leur rôle puisque la qualité du contact électrique entre rails et brosses de cuivre peut être considérée comme très satisfaisante.

N° tir	1	2	3	4	5	6
U_{\max} (V)	552.4	683.6	682.6	855.8	966.7	797.4
Temps de sortie (ms)	5.15	4.77	4.58	4.42	4.31	4.14

Tableau 3. Tension de bouche maximale et temps de sortie des projectiles pour les 6 tirs effectués

Les indications positives données par l'observation du contact électrique et des impacts sur la cible sont confirmées par les radiographies-éclair prises en sortie du tube de lancement :

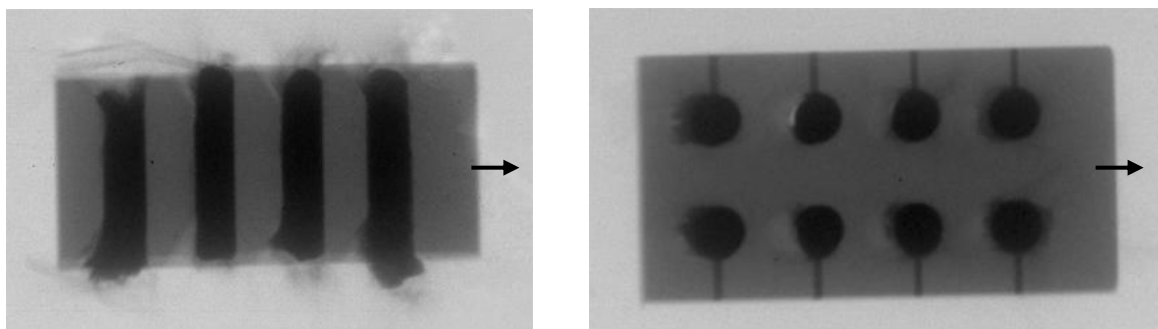


Fig. 11. Radiographies-éclair du projectile à la bouche du lanceur (tir n°1)

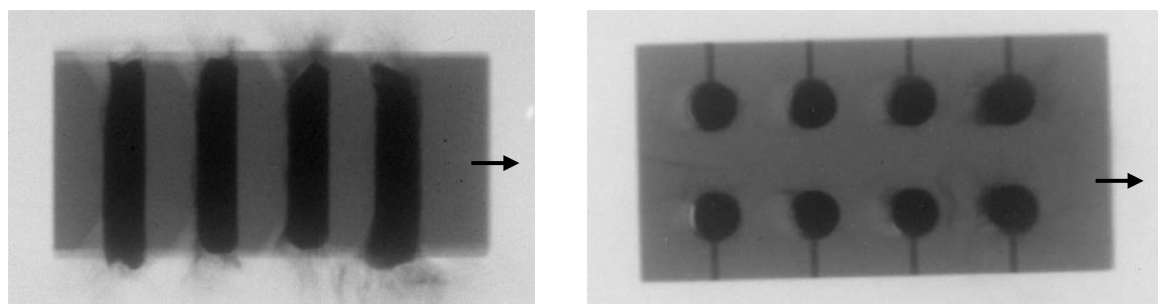


Fig. 12. Radiographies-éclair du projectile à la bouche du lanceur (tir n°2)

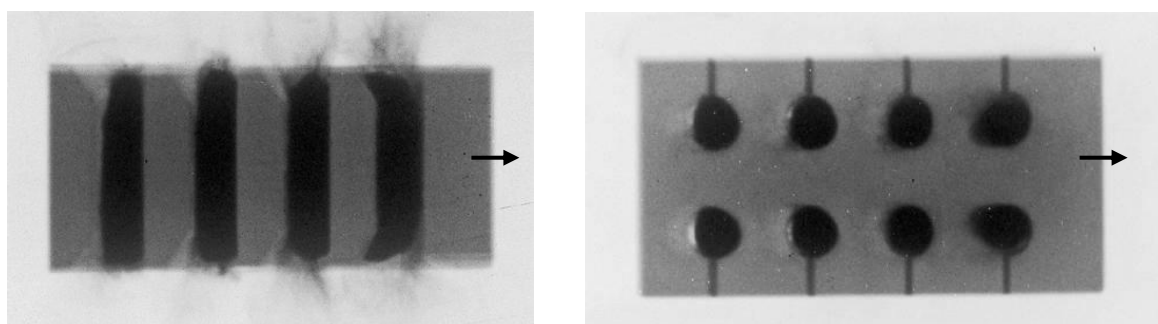


Fig. 13. Radiographies-éclair du projectile à la bouche du lanceur (tir n°3)

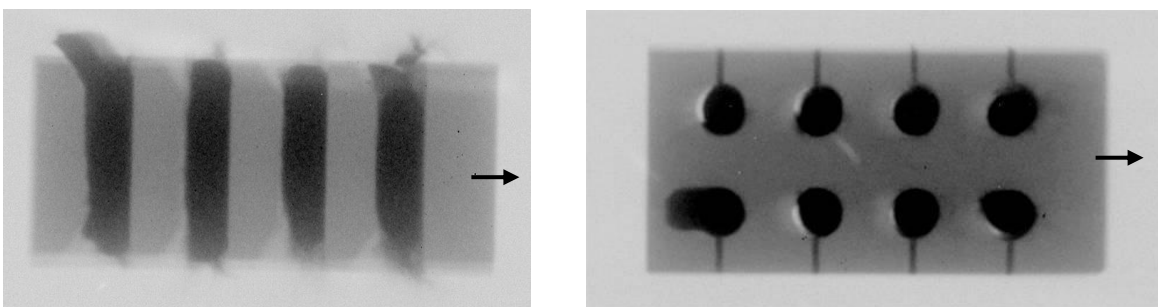


Fig. 14. Radiographies-éclair du projectile à la bouche du lanceur (tir n°4)

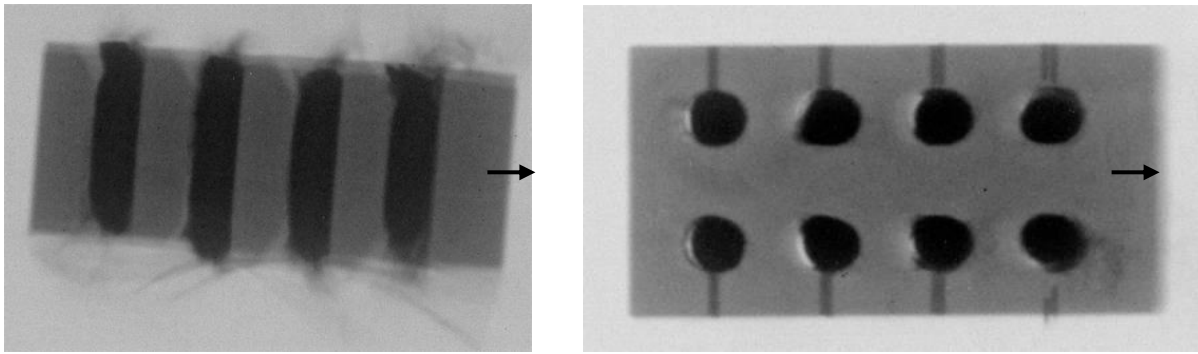


Fig. 15. Radiographies-éclair du projectile à la bouche du lanceur (tir n°5)

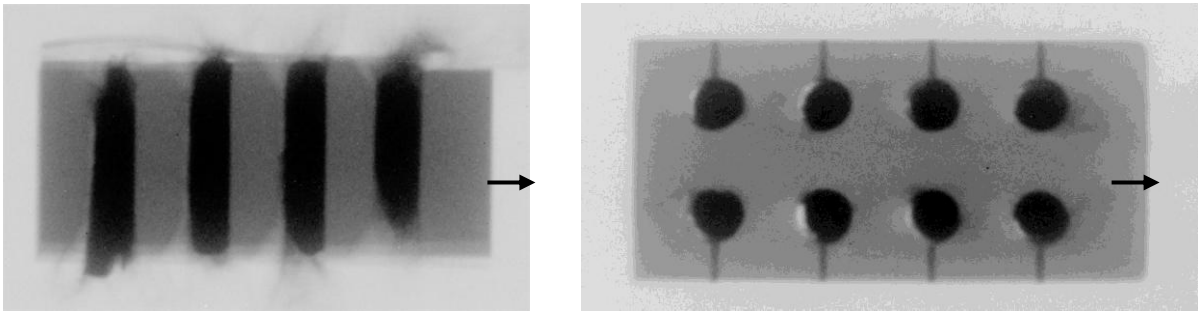


Fig. 16. Radiographies-éclair du projectile à la bouche du lanceur (tir n°6)

Dans le cas du premier tir, seul un délaminage superficiel est observé à l'arrière du stratifié (figure 11). Il est possible que l'épaisseur légèrement trop faible du stratifié autorise un battement du sabot en cours d'accélération et par conséquent des chocs entre les rails et ses extrémités. La tenue globale de la structure de maintien est néanmoins très satisfaisante. Comme en attestent les figure 12, 13 et 14, les stratifiés des trois tirs suivants résistent parfaitement aux accélérations et ressortent intacts du tube de lancement. Aucun endommagement n'est observable sur les radiographies-éclair. Dans le cas des projectiles des tirs n°5 et n°6, accélérés respectivement à l'aide d'une énergie électrique de 3.59 MJ et 3.87 MJ, un délaminage superficiel des couches inférieures ou supérieures est observé (figure 15 et 16). Comme dans le cas du premier tir, il apparaît que le délaminage s'initie aux extrémités des stratifiés, puisque les couches délaminées restent solidaires du sabot au niveau de la zone centrale. D'une manière globale, les deux sabots montrent une résistance mécanique remarquable compte-tenu des forces accélératrices mises en jeu. Le fait que le stratifié ait résisté à une accélération impliquant une énergie électrique totale de 3.87 MJ constitue à ce jour une première.

5. Conclusion

L'étude expérimentale de deux matériaux Verre/PEEK a abouti à la fabrication de stratifiés épais verre S2/PEEK et de prototypes de projectiles. Six tirs impliquant une énergie électrique croissante comprise entre 2.57 MJ et 3.87 MJ ont été effectués à l'aide du lanceur électromagnétique PEGASUS. La résistance mécanique des stratifiés produits en interne s'est avérée remarquable puisque seuls quelques délaminages superficiels ont été observés sur les radiographies-éclair. Le bon maintien des brosses de cuivre a ainsi permis d'atteindre une vitesse maximale de 2440 m/s. Si le travail réalisé a d'ores et déjà permis de repousser les limites mécaniques du sabot composite, il apparaît à la vue des radiographies-éclair que des tirs mettant en jeu des énergies encore plus importantes peuvent être raisonnablement envisagés.

Références

- [1] B. Reck, « Étude numérique du délaminage d'un composite stratifié à renfort tissu de verre/tissu de carbone ». *Comptes-rendus des 15^e Journées Nationales sur les Composites (JNC15)*, Publiés par C. Hochard & J. Lamon, pp. 649-657, Marseille, 6-8 Juin 2007. ISBN 978-2-87717-090-1.
- [2] N. Alif, L.A. Carlsson, L. Boogh, « The effect of weave pattern and crack propagation direction on mode I delamination resistance of woven glass and carbon composites », *Composites: Part B*, 29, pp. 603-611, 1998.
- [3] A.B. Pereira, A.B. De Morais, M.F.S.F. De Moura, A.G. Magalhaes, « Mode I interlaminar fracture of woven glass/epoxy multidirectional laminates », *Composites: Part A*, 36, pp. 1119-1127, 2005.