

Caractérisation de l'équation d'état de deux matériaux composites : Essais dynamiques et validation numérique

V. JAULIN^{a,b}, J-M. CHEVALIER^a, M. ARRIGONI^b, B. BICREL^a, A. GALTIE^a

a. Commissariat à l'énergie Atomique : Centre d'Etude Scientifique et Technique d'Aquitaine (CEA-CESTA), 15 Avenue des Sablières, 33116 Le Barp.

b. Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA Bretagne), IRDL, UMR 6027 CNRS, 2 Rue François Verny, 29200 Brest.
contact : vincent.jaulin@cea.fr

Abstract :

In order to simulate composite response to hypervelocity impact, reliable numerical models are primordial to obtain predictive simulations. In particular, an accurate equation of state (EOS) is required to predict hydrodynamic behavior of the material under high stresses and strains. For the design of such EOS, several experiments covering planar plate impacts and stress wave generation by electron beam were performed on a woven composite of Basalt-fibers/RTM6-Epoxy (BFRP) and a M55J/M18 UD composite used in aerospace protective applications. Two planar plate impacts using SYLEX light gas-gun, with impactor speed of 1105 and 1169 m/s, generated plane stress wave up to 15 GPa in the sample. On the other hand, pulsed electron beam with the CESAR facilities, was used to generate quasi-plane stress wave of 1 GPa in the composite. In both experiments, laser interferometer velocimeter measured the free surface velocity of the samples. Using impedance adaptation and shock accumulation method, data about Hugoniot equation and release isentrope up to 15 GPa were obtained. Under several assumptions, two equations of state were designed and simulations using the Finite Element Code HESIONE (CEA, France) were performed. After comparison with experimental results, it appears that including compaction phenomena in the equation of state of Basalt/Epoxy composite could bring better correlation with the experimental data.

Mots clefs : Composite, Basalte, Carbone, Impact, simulation, experimental

1 Introduction

Les matériaux composites, du fait de leurs propriétés mécaniques intéressantes, sont déjà largement utilisés dans les applications aérospatiales, civiles et de protection. Ces matériaux étant fortement anisotropes, de nombreuses études tendent à modéliser la structure des composites à l'échelle mésoscopique

[1] (différenciation renfort/matrice) voire microscopique (représentation des fibres, de la porosité). Cependant, ces modèles se révèlent souvent numériquement instables et l'érosion des éléments lagrangiens est souvent obligatoire pour assurer la stabilité de la simulation. Dans le cadre des applications spatiales, entre autre les impacts de débris, l'intérêt se porte autant sur la matière éjectée au cours d'un impact de débris que sur le comportement de la structure. L'érosion des éléments en méthode lagrangienne classique va à l'encontre du principe de conservation de la masse, ce qui nous amène à nous tourner vers la méthode SPH (Smooth Particles Hydrodynamics). L'objectif est de développer un modèle à échelle macroscopique. Ce modèle orthotrope homogène doit prendre en compte :

- L'anisotropie du matériau
- La réponse au choc
- La dégradation anisotrope de sa résistance
- Le couplage de la réponse volumétrique et déviatorique
- Le délaminage

Le but de ce papier est de présenter des essais de caractérisation de deux matériaux composites considérés pour des applications spatiales. Ces essais apportent des informations supplémentaires quand à leur réponse aux chocs et impacts, leur tension de délaminage ainsi que leur limite élastique d'Hugoniot.

2 Matériaux et propriétés de base

2.1 Carbone

Les fibres de carbone sont les fibres les plus considérées pour le renforcement des composites dans le domaine aérospatiale. Elles sont d'ailleurs déjà largement utilisées dans de multiples applications et ont fait l'objet de nombreuses recherches [2][3][4]. Le composite impliqué dans cette étude, appelé CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), est un pré-imprégné carbone M55J/cyanate-esther RS3M UD d'épaisseur initiale 125 μm . Le composite inclut seize couches en orientation $[0/90]_{4S}$. Contrairement aux attentes, le matériau final a une épaisseur totale de 1.6 mm , ce qui laisse entendre une densification ou une ejection de matrice par les bords lors du compactage des pré-imprégnés sous vide. Le pré-imprégné initial s'est donc compacté lors de l'imprégnation. Sa densité est $\rho_0 = 1560 \pm 40 \text{ kg/m}^3$ pour un volume de fibre de 50 %.

2.2 Basalte

Le basalte est une roche volcanique de composition chimique très similaire au verre, à l'exception de sa concentration en oxyde de fer plus élevée [5] qui lui donne sa couleur noire. Les nombreuses similitudes entre le basalte et le verre nous amène à utiliser ce dernier comme critère de comparaison. Les fibres de basalte présentent de nombreux atouts qui les rendent intéressantes comme renforts :

- Les fibres de basalte possèdent des caractéristiques mécaniques similaires au verre S2 [6][7] déjà largement utilisé en tant que renfort ;
- Les fibres de basalte, en hybridation avec des fibres de carbone, présentent une meilleure résistance aux impacts basses vitesses [8] [9] qu'avec des fibres de carbone seule.
- Les températures limites d'usage sont bien supérieures à celle du verre E et le basalte est naturellement résistant aux ultraviolets ;
- Les fibres de basalte n'ont pas besoin d'additifs supplémentaires lors du procédé de fabrication . De par son abondance, son coût de fabrication est compris entre celui du verre E et du verre S2

pour un comportement proche du verre S2. Ces fibres sont également beaucoup moins onéreuses que les fibres de carbone ;

— Il s'agit d'un matériau respectueux de l'environnement.

Le composite étudié ici, appelé BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer), de densité $\rho_0=1830 \pm 50 \text{ kg/m}^3$, est à base de fibres de basalte tissées sergé 2x2. Le tissu de basalte, fabriqué par Basaltex[©] [10], a une maille unitaire d'environ 4,5 mm avec des mèches de 1,5 mm de large relativement aplaties et un grammage de 220 g/m². Les filaments font de 10 à 20 μm de diamètre. Le tissu est imprégné dans une résine époxy RTM6. Le matériau intègre douze couches de tissu pour une épaisseur finale de 2 mm et un volume de fibre de 50 %.

3 Etude expérimentale

3.1 Configuration expérimentale

La schématisation de l'essai est représenté en Figure 1. Une cible en aluminium 6061T6, appelée "buffer", de 3 mm d'épaisseur est bombardé par un intense faisceau d'électrons. Ce dépôt se convertit en énergie thermique et mécanique et induit une onde de choc qui se propage dans le buffer. Le faisceau est généré par le moyen d'essai CESAR, un générateur Marx and Pulse Forming Line 2 Ω qui peut délivrer jusqu' à 350 kA, 700 kV, 65 ns FWHM (durée à mi-hauteur du maximum de puissance). Le diamètre du rayon au niveau de la cible est approximativement 10 cm. Trois cibles sont collées en face arrière du buffer aluminium : un cristal de Fluorure de Lithium (LiF), composite seul, composite-LiF. Le collage entre ces éléments est réalisé sous pression d'environ 1 bar avec une résine époxy dont l'épaisseur est estimée inférieure à 30 μm ce qui limite les réflexions d'ondes parasites. Concernant les fenêtres LiF, un fin dépôt métallique par vapeur à l'interface collée se comporte comme un miroir avec les systèmes d'interférométrie Doppler et assure un bon retour signal. Par précaution, une surface réfléchissante Mylar est également apposée en face arrière des matériaux seuls. La Vélométrie Hétérodyne [11][12] (VH ou PDV), mesure la vitesse matérielle en fonction du temps. Le principe repose sur un interféromètre en déplacement qui analyse le faisceau réfléchi en face arrière d'une surface mobile illuminée par un laser. Le signal réfléchi par la cible mobile interfère avec un signal de référence. Une Transformée de Fourier glissante permet ensuite la dérivation du signal pour obtenir la vitesse matérielle en fonction du temps. Cette technique est simple d'utilisation (système fibré, pas d'ajustement optique, pas de facteur de franges), bénéficie d'une forte sensibilité, d'un large spectre dynamique, d'un faible encombrement et d'un coût modéré. La VH offre une résolution spatiale de l'ordre de 5 ns et d'une précision sur la vitesse de 1 m/s [13].

Le buffer aluminium mesure 50 mm de diamètre et les cibles composites sont des carrés de 18 mm de côté. Un diaphragme en graphite à l'avant de la cible bloque la partie extérieure du faisceau. Les dimensions des cibles nous affranchissent des effets 2D dus aux détentes radiales jusqu' à 2 μs derrière les composites seuls et jusqu' à 0.5 μs derrière les empilements avec fenêtre LiF. Ces intervalles de temps sont suffisants dans le cadre de notre étude.

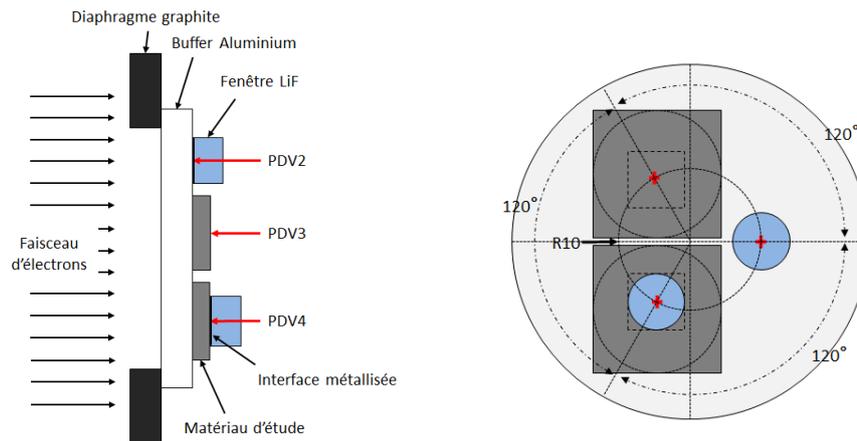


FIGURE 1 – Montage expérimental essai CESAR : a- Vue latérale ; b- Vue face arrière

Un tir préliminaire a été réalisé afin de confirmer le profil spatial de la contrainte induite par le faisceau. Des fenêtres LiF de diamètre 8 mm, épaisseur 4 mm sont collées en quatre emplacements derrière le buffer aluminium. On observe en Figure 2 les profils de vitesses mesurés respectivement au centre de la cible (PDV1) et sur le rayon 1 cm à 120° respectifs (PDV2, 3 et 4). Les trois profils mesurés à 1 cm de rayon sont similaires avec un écart maximal de l'ordre de 5% qui confirme l'uniformité du dépôt d'énergie. Le profil de vitesse au centre est légèrement plus important avec un écart maximal de 10%. Etant donné l'espacement et les dimensions des cibles, cet écart ne doit pas influencer les résultats observés sur le rayon 1 cm. On peut donc considérer le profil de sollicitation comme quasi-1D ce qui sera primordial pour l'analyse des résultats.

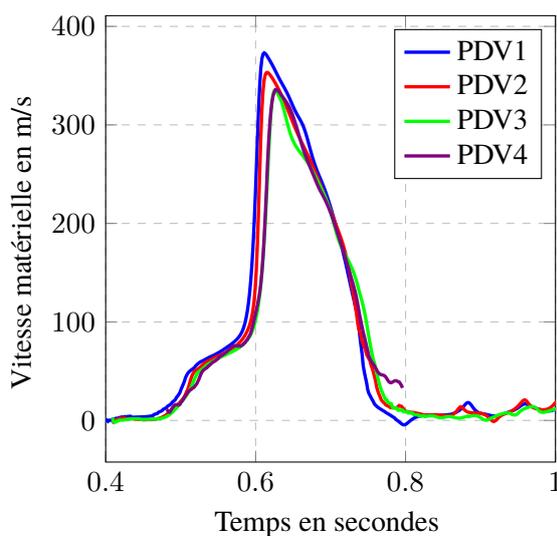


FIGURE 2 – Comparaison des profils de vitesse obtenu en différents points de la face arrière du buffer aluminium.

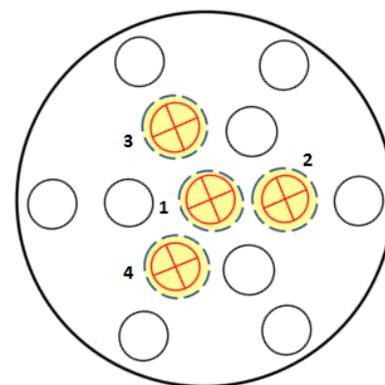


FIGURE 3 – Position des lieux de mesures par Vélocimétrie Doppler en face arrière du buffer aluminium

3.2 Résultats et discussion

On considère maintenant les résultats des tirs utilisant la configuration présentée sur la Figure 1. Les signaux VH obtenus dans le cas du composite basalte/époxy sont tracés sur la Figure 4 en fonction du temps.

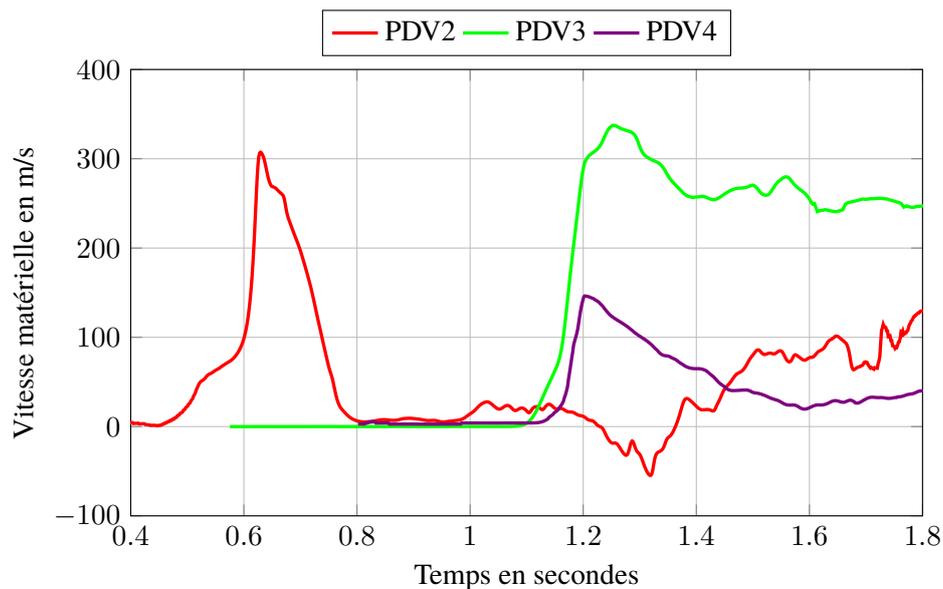


FIGURE 4 – Mesure de vitesse en face arrière pour le BFRP : PDV2=LiF; PDV3=BFRP; PDV4=BFRP+LiF

A noter que la mesure de vitesse par Interférométrie Doppler-Laser à travers une fenêtre nécessite une correction d'indice :

$$u_{corr} = \frac{u_{dopp}}{1 + k_0} \quad (1)$$

où k_0 est un coefficient de correction de l'indice de réfraction. Pour le LiF, on prend comme valeur $k_0 = 0,264[s.u]$ [14]. Cette hypothèse de correction n'est valable que pour des chargements simples. Entre autre, elle ne prend pas en compte la mise en mouvement de la face arrière de la fenêtre qui n'intervient de toute manière qu'après la période d'intérêt.

En considérant le temps d'arrivée de l'onde à l'interface Aluminium/LiF comme le temps de celui d'entrée dans le matériau d'étude, on peut alors calculer un temps de traversée de l'onde de pression dans le matériau d'étude. Les résultats, présentés dans le Tableau 1, donne des vitesse d'onde approximative de 2600 m/s dans le CFRP et 3150 m/s dans le BFRP.

TABLE 1 – Vitesse d'onde dans les deux matériaux d'étude

Empilement	Temps de traversée de l'onde [ns]	Epaisseur composite [mm]	Vitesse d'onde [km/s]
Al/CFRP	588	1.523	2590
Al/CFRP/LiF	581	1.550	2668
Al/BFRP	613	2.04	3143
Al/BFRP/LiF	654	2.06	3150

De plus, on remarque systématiquement un plateau de vitesse pour la mesure aluminium/composite (PDV3 sur Figure 4), révélateur d'un phénomène de délaminage confirmé lors de la récupération des cibles après tir (Figure 5). On estime les tensions d'écaillage par la formule :

$$\sigma_{ec} = \frac{1}{2} \rho_0 \cdot C \cdot \Delta u \quad (2)$$

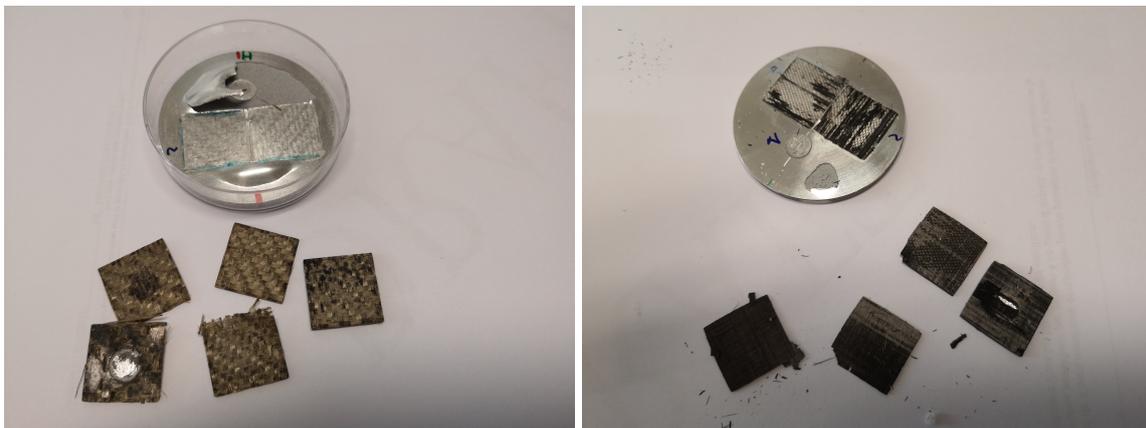


FIGURE 5 – Récupération des cibles post-mortem : a-BFRP ; b-CFRP.

où ρ_0 est la densité standard du matériau composite, C est compris entre la vitesse du son C_0 et la vitesse d'onde longitudinale C_L dans le matériau selon que l'onde est plastique ou élastique. Enfin Δu est le saut de vitesse observé avant l'écaillage. On obtient des tensions d'écaillage de 250 MPa pour le CFRP et 300 MPa pour le BFRP. A l'observation des cibles post-mortem, on remarque bien le délaminage systématique des cibles. Cependant, le délaminage dans le cas du tissu est plus "propre" dans le sens où la partie délaminée est une couche de tissu entière et peu endommagée. A l'inverse, la matière délaminée dans le cas du M55J/M18 UD est beaucoup plus fragmentée. Le tissu sergé 2/2 de basalte conserve une meilleure tenue après délaminage.

3.3 Loi de comportement des matériaux

On définit ici le modèle représentatif du comportement de nos matériaux dans leur phase solide standard. Le matériau est considéré homogène isotrope. Cette hypothèse est très forte et devra être remise en cause dans le cas d'essais de perforation. On considère cependant que sous sollicitation unidimensionnelle, l'influence de l'orthotropie est négligeable.

Dans les codes hydrodynamiques actuels, les équations d'état sont sous forme analytiques ou tabulées. Dans les travaux ci-présents,, l'équation d'état de Mie-Grüneisen est utilisée, en prenant l'Hugoniot comme référence. C'est une EOS fréquemment utilisée pour modéliser les matériaux solides. La pression y est définie comme une fonction de la densité ρ et de l'énergie e .

$$P_{EOS} = \begin{cases} \frac{\rho_0 c_0^2 \mu [1 + (1 - \frac{\Gamma}{2})\mu - \frac{\Gamma}{2}\mu^2]}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}]^2} + (1 + \mu)\Gamma e & \text{si } \mu > 0 \text{ (compression)} \\ \rho_0 c_0^2 \mu + (1 + \mu)\Gamma e & \text{si } \mu < 0 \text{ (tension)} \end{cases}$$

où e est l'énergie interne par unité de volume initial, $\mu = (\rho/\rho_0 - 1)$ est un paramètre de variation de volume, c_0 est l'ordonnée à l'origine de la courbe $U_S - u_p$ (U_S la vitesse du choc en fonction de u_p la vitesse particulaire), S_1, S_2, S_3 sont les coefficients de la pente de la courbe $U_S - u_p$, γ_0 est le coefficient de Grüneisen pour le matériau non déformé, a est le le paramètre de correction du premier ordre en volume de Γ . Les coefficients $c_0, S_1, S_2, S_3, \gamma_0, a$ sont les paramètres à fournir. Des essais d'impacts de plaques ont été réalisés sur ces matériaux [6] desquels sont déduits les paramètres de l'équation d'état, présentés dans le Tableau 2

De plus, afin d'obtenir les bonnes vitesses de débouché d'onde, on associe à cette EOS un modèle élasto-plastique dont le module de cisaillement G est estimé de Dandekar et al. [15] pour le verre S2, proche du BFRP, et de Giannaros et al. [16] pour le CFRP. Plusieurs valeurs de limite élastique Y_0 sont à chaque fois testées afin d'observer si le comportement du matériau est élastique, hydrodynamique ou élasto-plastique. Les valeurs présentées par la suite ont été sélectionnées car elles justifient potentiellement l'apparition de paliers dans les résultats en vitesse (Figure 4). On fera cependant attention à dissocier les phénomènes dûs à la LEH des matériaux et ceux dûs à la forme du chargement en pression appliqué en entrée de ces matériaux.

TABLE 2 – Paramètres loi de comportement des matériaux d'étude

Component	M55J/M18 (CFRP)	Basalte/RTM6 (BFRP)
ρ_0 [kg/m^3]	1560	1830
C_0 [m/s]	1769	3200
S_1 [–]	2.42	1.117
S_2 [–]	0	0
S_3 [–]	0	0
γ_0 [–]	0.6	1.2
G [GPa]	4.0	4.0
σ_{ec} [MPa]	250	300

3.4 Analyse des résultats

3.4.1 Détermination du chargement

Des simulations 1D en lagrangien classique ont été réalisées avec le code hydrodynamique HESIONE (CEA) pour les configurations présentées précédemment. Le modèle de Steinberg-Cochran-Guinan [17] a été utilisé pour modéliser l'aluminium et les fenêtres LiF. Dans un soucis de rapidité, aucune tentative

n'a encore été prise pour considérer le dépôt d'énergie du faisceau d'électrons dans le buffer aluminium ainsi que la formation de l'onde de choc qui s'en suit. On se sert plutôt de la mesure PDV réalisée à l'interface aluminium/LiF (PDV2). Le Fluorure de Lithium ayant une impédance de choc très proche de celle de l'aluminium, on considère que l'onde de pression est peu déformée par l'interface Aluminium/LiF. Le profil de vitesse obtenu au niveau de l'empilement aluminium/LiF (PDV2) est donc le résultat de la mise en vitesse au passage de l'onde de compression sans désadaptation d'impédance. La contrainte à cette interface, supposée positive en compression, est obtenue à partir de la relation isentropique $\sigma = \rho_0 \cdot C_l \cdot u$, où ρ_0 est la densité de référence du LiF (2638 kg/m^3), C_l sa vitesse d'onde longitudinale (6700 kg/m^3) et u la vitesse mesurée à l'interface corrigée à partir de l'équation (1).

Ce profil est ensuite appliqué en entrée des différents empilements. Il n'est cependant pas possible d'appliquer le chargement directement dans les matériaux d'étude du fait de la désadaptation d'impédance entre l'aluminium et le matériau d'étude. Une solution consiste à appliquer cette impulsion en entrée du buffer mais le signal est alors en partie amorti au cours de sa propagation dans l'épaisseur de 3 mm d'aluminium. Afin de limiter cet amortissement, on réduit l'épaisseur du buffer dans les simulations à 1 mm. Cette épaisseur permet à l'onde de pression d'atteindre l'interface aluminium/matériau sans être fortement amortie. L'onde est alors en partie transmise et en partie réfléchi [18]. On a ainsi reproduit artificiellement l'arrivée de l'onde de compression à l'interface en limitant l'amortissement. Cependant, les réflexions d'onde dans le buffer aluminium viennent rapidement parasiter le signal en sortie de matériau. Ces réflexions d'onde, du fait de notre modification d'épaisseur de buffer ne sont pas représentatives de la réalité. On observe tout de même le passage du pic de pression principal avant la dénaturation du résultat par cette réflexion d'onde. L'application de cette condition aux limites nous affranchit de tous les phénomènes physiques intervenant lors de la formation de l'onde de pression dans le buffer aluminium, incluant l'interaction du faisceau d'électron avec l'aluminium, les changements d'état et l'adoucissement thermique. Des améliorations sont toutefois possibles en modifiant le profil de pression afin de prévoir l'amortissement. Afin d'en être le plus proche possible, on considère un modèle hydrodynamique dans l'aluminium afin de nous affranchir des phénomènes d'élastoplasticité qui parasitent le signal au cours de sa propagation dans l'aluminium. On modifie également le profil de pression pour tenir compte de la zone normalement élastique et qui se déplace moins rapidement du fait du comportement hydrodynamique. On utilise juste l'aluminium pour tenir compte de la désadaptation d'impédance, le profil mesuré en PDV2 ayant déjà pris en compte la propagation de l'onde de pression dans l'aluminium. Afin de vérifier la conformité du profil de pression obtenu, on simule au préalable le passage de cette onde dans l'empilement alu(1mm)+LiF et on la compare (Figure 6) à la vitesse PDV2 corrigée par l'équation (1). Si les deux signaux concordent, le chargement, considéré conforme, est appliqué dans les empilements avec matériau d'étude.

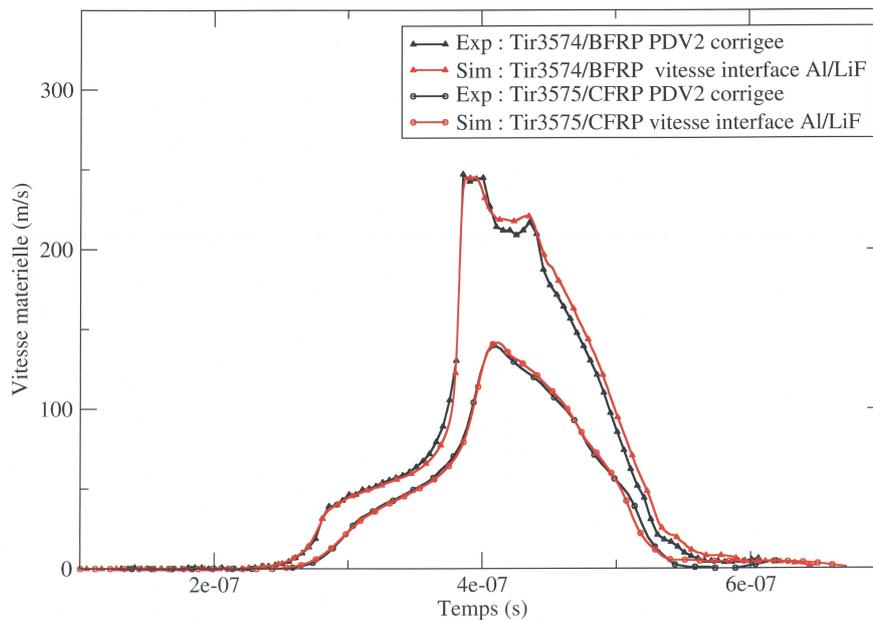


FIGURE 6 – Comparaison des profils de vitesse numériques et expérimentaux pour la validation des chargement en pression à l'entrée du buffer aluminium

3.4.2 Application aux matériaux d'étude

Une fois le chargement validé, on l'applique maintenant dans un empilement constitué du buffer d'épaisseur 1 mm suivi du matériau d'étude suivi ou non d'une fenêtre LiF. Cette configuration prend donc en compte la désadaptation d'impédance à l'interface aluminium/composite. La comparaison des résultats expérimentaux et numériques est présentée en Figure 7 et 8. Du fait de la modification artificielle d'épaisseur du buffer, on perd l'information dans les simulations sur le temps d'origine. Afin de remédier à cela, les résultats des simulations sont translatés en temps de sorte que le temps d'entrée de l'impulsion dans le matériau d'étude en simulation concorde avec la montée en vitesse à l'interface aluminium/LiF mesurée expérimentalement. Considérant l'épaisseur négligeable de la métallisation de la fenêtre et les éventuelles variations d'épaisseur du buffer, cette hypothèse semble justifiée. On ne compare pas les résultats obtenu pour les deux matériaux car un léger dysfonctionnement du moyen d'essai a entraîné une diminution de l'énergie déposée dans le cas du CFRP comme l'atteste la Figure 6. La comparaison des comportements des deux matériaux n'est donc pas probante car le chargement appliqué n'est pas le même.

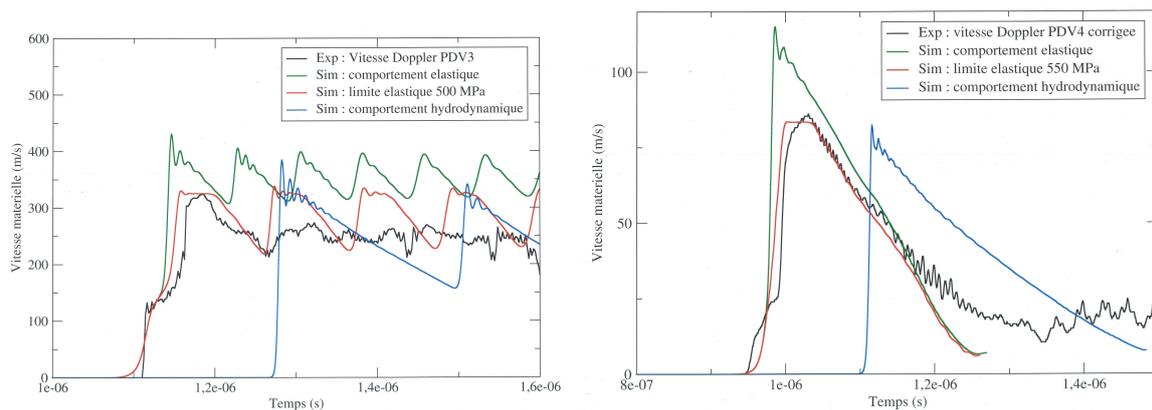


FIGURE 7 – Comparaison des profils de vitesse numériques et expérimentaux pour les empilements : a- Aluminium-CFRP ; b- Aluminium-CFRP-LiF. Plusieurs conditions d'élasto-plasticité sont considérées en faisant varier la limite d'élasticité Y_0 dans les simulations.

Dans le cas du composite M55J/M18 (Figure 7), le modèle hydrodynamique sous-estime la vitesse de l'onde. Les résultats les plus probants sont obtenus pour une limite élastique de 500 MPa et 550 MPa pour les empilements sans/avec fenêtre LiF respectivement. La tension d'écaillage calculée précédemment semble être représentative de la réalité mais il est ici difficile de juger de sa validité du fait des phénomènes d'endommagement complexes intervenant dans le composite laminé (multi-délaminage, rupture de fibre) qui viennent rapidement amortir les allers-retours d'onde dans l'écaille.

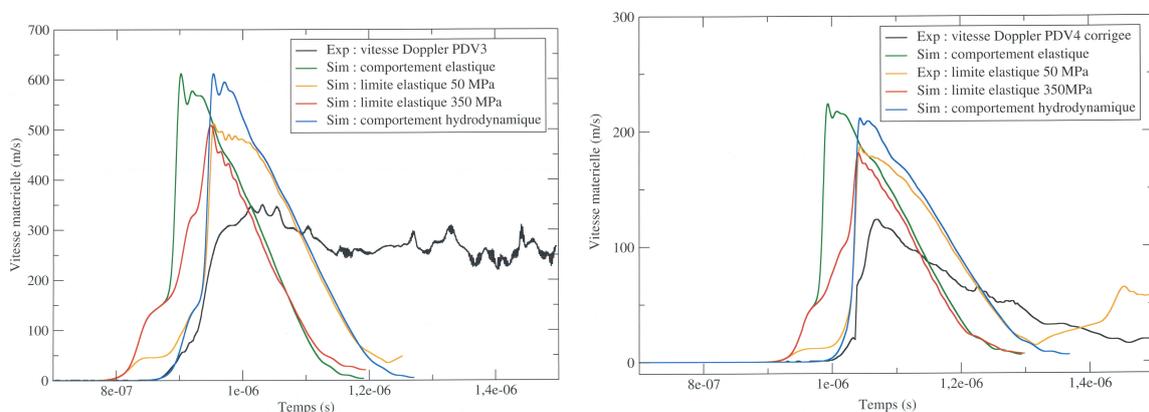


FIGURE 8 – Comparaison des profils de vitesse numériques et expérimentaux pour les empilements : a- Aluminium-BFRP ; b- Aluminium-BFRP-LiF. Plusieurs conditions d'élasto-plasticité sont considérées en faisant varier la limite d'élasticité Y_0 dans les simulations.

Dans le cas du Basalte/RTM6 (Figure 8), le temps d'arrivée des ondes laisse penser à un comportement hydrodynamique. Cependant, le niveau de vitesse dépasse largement les résultats expérimentaux. Du fait de cette surestimation, on ne considère pas le délaminage dans ces simulations car il induit un palier de vitesse trop important. Les résultats d'impact plan sur ces mêmes matériaux [6] ont montré un comportement différent en compression et en détente pour le Basalte/RTM6. Dans le cas de rechoc à des pressions de 15 GPa, l'onde de détente qui suit se déplace plus rapidement. Les phénomènes d'élas-

toplasticité étant exclus à ces pressions, l'hypothèse d'un phénomène de compactage est mise en avant. Dans le cas des essais CESAR, cette hypothèse pourrait expliquer la surestimation de vitesse car l'onde de détente rattrape alors l'onde de compression et l'amortit au cours de la progression dans le matériau, on parle d'amortissement hydrodynamique.

3.4.3 Amortissement dans le BFRP

Afin d'avoir un premier aperçu de ce phénomène, un tir supplémentaire a été réalisé sur une configuration similaire à la différence que l'on remplace l'empilement BFRP+LiF par le matériau BFRP mais d'épaisseur $600 \mu m$. L'objectif de ce nouvel essai est d'observer l'évolution de l'amortissement au cours de la propagation de l'onde. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 9. On observe en sortie du composite BFRP d'épaisseur $2 mm$ un fort amortissement du signal au niveau du pic comme au niveau de la vitesse d'éjection de la partie délaminée. En utilisant le même procédé expliqué précédemment pour la détermination du chargement et le même modèle numérique, on compare les résultats numériques et expérimentaux dans la Figure 9. On observe alors une bonne concordance des niveaux de vitesse obtenus ainsi que des temps d'arrivée des ondes pour le BFRP de faible épaisseur. Ces résultats vont dans le sens d'un fort amortissement hydrodynamique. L'évaluation de la tension de délaminage est ardue car une succession de palier est relevée. Un modèle isotrope homogène n'est de toute façon pas approprié pour rendre compte du multi-délaminage intervenant dans les tissus. Toutefois, la tension de délaminage peut être approximée à $600 MPa$ pour le BFRP d'épaisseur $600 \mu m$ et $300 MPa$ pour celui d'épaisseur $2 mm$. L'influence de la vitesse de déformation sur le seuil de délaminage est à étudier.

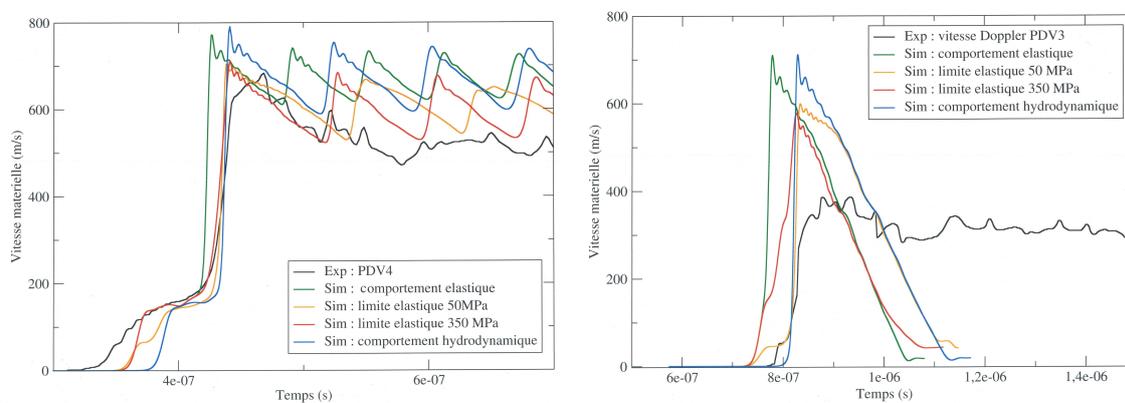


FIGURE 9 – Comparaison des profils de vitesse numériques et expérimentaux pour les empilements : a- Aluminium-BFRP(épaisseur $600 \mu m$) ; b- Aluminium-BFRP(épaisseur $2 mm$). Plusieurs conditions d'élasto-plasticité sont considérées en faisant varier la limite d'élasticité Y_0 dans les simulations. Aucune tension de delaminage n'est appliquée pour le BFRP d'épaisseur $2 mm$

3.5 Conclusion

En conclusion, de nouvelles données expérimentales ont été obtenues pour deux composites carbone/époxy et basalte/époxy sous sollicitation dynamique uni-axiale. L'essai comprend un dépôt d'énergie par canon à électron avec une mesure de la vitesse en face arrière de plusieurs empilements par Interférométrie Doppler. Une estimation du temps de traversée de l'onde dans les composites et des tensions de délaminage des deux matériaux composites est obtenue. Une loi de comportement issue de données de la

bibliographie, est ensuite proposée pour les deux matériaux. Un protocole est présenté, qui en utilisant un profil de vitesse mesuré en face arrière, permet de remonter au chargement appliqué en entrée de nos matériaux d'étude moyennant plusieurs hypothèses. Enfin, des simulations 1D avec le code Elements Finitis HESIONE ont permis de retrouver les résultats en vitesse mesurés expérimentalement pour le CFRP. Ces résultats sous-entendent un comportement principalement élastique avec une limite élastique avoisinant 550 MPa . Un tir plus puissant est nécessaire pour observer le comportement hydrodynamique. Pour sa part, le BFRP semble présenter un comportement principalement hydrodynamique avec une limite élastique inférieure à 350 MPa . La bonne restitution des niveaux de vitesses expérimentaux pour une cible mince et la surestimation des vitesses pour une cible plus épaisse laisse supposer un fort amortissement hydrodynamique lié à un phénomène de compactage. Des essais en compression statique sont programmés et permettront de valider ou non cette hypothèse.

Références

- [1] A Cherniaev and I Telichev. Meso-scale modeling of hypervelocity impact damage in composite laminates. *Composites Part B : Engineering*, 74 :95–103, 2015.
- [2] RC Tennyson and C Lamontagne. Hypervelocity impact damage to composites. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, 31(8) :785–794, 2000.
- [3] S Ryan, M Wicklein, A Mouritz, W Riedel, F Schäfer, and K Thoma. Theoretical prediction of dynamic composite material properties for hypervelocity impact simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 36(7) :899–912, 2009.
- [4] M Wicklein, S Ryan, DM White, and RA Clegg. Hypervelocity impact on cfrp : testing, material modelling, and numerical simulation. *International Journal of Impact Engineering*, 35(12) :1861–1869, 2008.
- [5] Basalt Fiber Tech. Basfiber advanced textiles plain woven fabrics. "www.basaltft.com", 2019.
- [6] V Jaulin, J-M Chevalier, and M Arrigoni. Equation d'état et lois de comportement de deux composites d'intérêt spatial : expérimentations et modélisation associée. Rapport interne CEA, non publié, 2018.
- [7] Texonic. Guide des performances des matières travaillées et les propriétés des fibres. "https://texonic.net", 2019.
- [8] FA Shishevan and H Akbulut. Low-velocity impact behavior of carbon/basalt fiber-reinforced intraply hybrid composites. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, pages 1–10, 2018.
- [9] J Tirillò, L Ferrante, F Sarasini, L Lampani, E Barbero, S Sánchez-Sáez, T Valente, and P Gaudenzi. High velocity impact behaviour of hybrid basalt-carbon/epoxy composites. *Composite Structures*, 168 :305–312, 2017.
- [10] Basaltex. Basalt basic properties. "www.basaltex.com", 2019.
- [11] P Mercier, J Benier, A Azzolina, JM Lagrange, and D Partouche. Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments. In *Journal de Physique IV (Proceedings)*, volume 134, pages 805–812. EDP sciences, 2006.
- [12] P Mercier, J Bénier, PA Frugier, G Contencin, J Veaux, S Lauriot-Basseuil, and M Debruyne. Heterodyne velocimetry and detonics experiments. In *28th International Congress on High-Speed*

- Imaging and Photonics*, volume 7126, page 71261O. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [13] L Biasiori-Poulanges, H El-Rabii, F Viro, D Hébert, J-L Rullier, and J-M Chevalier. Uncertainty analysis of photonic doppler velocimetry and dynamic pressure transducers measurements for bulk flow velocity determination. non publié, 2019.
- [14] BJ Jensen, DB Holtkamp, PA Rigg, and DH Dolan. Accuracy limits and window corrections for photon doppler velocimetry. *Journal of applied physics*, 101(1) :013523, 2007.
- [15] DP Dandekar, JM Boteler, and PA Beaulieu. Elastic constants and delamination strength of a glass-fiber-reinforced polymer composite. *Composites science and technology*, 58(9) :1397–1403, 1998.
- [16] E Giannaros, A Kotzakolios, V Kostopoulos, and G Campoli. Hypervelocity impact response of cfrp laminates using smoothed particle hydrodynamics method : Implementation and validation. *International Journal of Impact Engineering*, 123 :56–69, 2019.
- [17] DJ Steinberg, SG Cochran, and MW Guinan. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate. *Journal of Applied Physics*, 51(3) :1498–1504, 1980.
- [18] Thouvenin J. Les mécanismes élémentaires de la détonique. *Détonique*, 1997.