HAL open science

Détermination de l'équation d'état dans la direction hors plan du Tensylon® (UHMWPE)

Michel Arrigoni, Pascal Forquin, Julien Le Clanche, Marie Zavard, C. Francois, Magali Castres, Charles Francart, Aboulghit El Malki Alaoui, David Thevenet

To cite this version:

Michel Arrigoni, Pascal Forquin, Julien Le Clanche, Marie Zavard, C. Francois, et al.. Détermination de l'équation d'état dans la direction hors plan du Tensylon® (UHMWPE). 25e Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-04280026

HAL Id: hal-04280026

https://hal.science/hal-04280026v1

Submitted on 10 Nov 2023

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.

Determination de l'équation d'état dans la direction hors plan du Tensylon® (PolyEthylène Haute Densité))

M. ARRIGONI[a], P. FORQUIN[b], J. LE CLANCHE[a], M. ZAVARD[b], C. FRANCOIS[a], M. CASTRES[a], C. FRANCART[a], A. EL MALKI ALAOUI[a], D. THEVENET[a]

a. ENSTA Bretagne, IRDL UMR 6027 CNRS, 29200 Brest, michel.arrigoni@ensta-bretagne.fr
b. UGA, 3SR UMR 5521 CNRS, 1270 Rue de la Piscine, 38610 Gières, pascal.forquin@univ-grenoble-alpes.fr

Résumé :

Le développement de nouveaux matériaux, plus légers, plus économiquement et écologiquement performant et mécaniquement supérieurs permet aux industries de relever de nouveaux défis technologiques. Les matériaux composites occupent une place devenue majeure dans la conception de structures et d'assemblages destinés à soutenir des sollicitations extrêmes, notamment dans le secteur aérospatial et de la défense. Un matériau composite d'intérêt pour ses performances mécanique et sa recyclabilité est le polyéthylène haute densité (PE-HD). Sous forme de plis composites d'orientation [0-90°], il constitue à lui seul une protection balistique contre les projectiles de petits calibres. Dans le cadre du développement de protections balistiques, il est primordial de connaître le comportement de ce matériau sous sollicitations dynamiques de type ondes de choc. Il convient donc de déterminer la loi de comportement, d'endommagement ainsi que l'équation d'état sous choc pour renseigner un outil numérique de type éléments-finis explicite (LS DYNA, RADIOSS, ABAQUS …). Le présent travail a pour objectif de déterminer les paramètres de l'équation d'état sous choc d'un PE-HD particulier, le Tensylon HSBD30 A fabriqué par DuPont®. Une brève revue de nos travaux antérieurs est donnée, puis la démarche analytique et expérimentale a permis d'obtenir les données de l'équation d'état sous choc. Enfin, étant donné que trop peu d'essais valables ont pu être obtenus, une méthode bayésienne et proposée pour discuter des incertitudes applicables à nos résultats.

Abstract :

The development of innovative, lighter, more economically and ecologically efficient and mechanically stronger materials is enabling industries to meet new technological challenges. Composite materials have become a major part of the design of structures and assemblies for withstanding intense stresses, particularly in the aerospace and defense fields. One composite material of interest for its mechanical performance and recyclability is high density polyethylene (HDPE). In the form of [0-90°] orientation composite plies, it constitutes a ballistic protection against small caliber projectiles. Within the framework of the development of ballistic protection, it is essential to know the mechanical behavior of this material under dynamic solicitations such as high velocity impacts and shockwaves. It is therefore

necessary to determine its constitutive and damage law, and its shock equation of state as input parameter of a numerical tool like explicit finite elements software (LS DYNA, RADIOSS, ABAQUS ...). The goal of the present work is to determine the parameters of the equation of state under impact of a particular HD-PE, Tensylon HSBD30 A manufactured by DuPont®. A brief review of our previous work is given, followed by the analytical and experimental approach used to obtain the shock equation of state data. Finally, since too few valid tests could be obtained, a Bayesian method is proposed to discuss the uncertainties applicable to our results.

Mots clefs : Fibre reinforced plastic, protection balistique, impact, équation d'état, vélocimétrie hétérodyne, lanceur à gaz.

1 Introduction

Les préoccupations sociétales en matière de sécurité poussent l'utilisation des protection balistiques tant dans le domaine civil que miliaire. Le développement de matériaux de protection balistique légers plus efficace reste une nécessité pour améliorer la protection des véhicules blindés et des personnes ; Il permettra d'étendre de manière non négligeable l'autonomie et la mobilité. Les matériaux composites ouvrent diverses possibilités dans le domaine du blindage balistique en raison de leur ratio résistance / légèreté. Ils ont fait l'objet d'études approfondies et ont donc été le sujet de nombreux articles et d'ouvrages [1,2]. Cette association de fibres et de matrices offre une large combinaison de propriétés physiques mais doit être choisie de manière pertinente. Cunniff a présenté une analyse comparative des propriétés mécaniques des fibres les plus utilisées dans les matériaux composites constituant de protections balistiques [3]. Parmi les matériaux composites les plus performants les PolyEthylènes Haute Densité (PE-HD), connus sous le nom de Ultra High Molecular Weignt PolyEthylene (UHMWPE) demeurent très utilisés pour la conception de gilets pare balles et protections balistiques pour les véhicules blindés. Ils possèdent en outre un ratio performance/coût intéressant. Plusieurs UHMWPE sont disponibles sur le marché (Tensylon®, Dyneema®, Spectra®, …). Le Tensylon® HSBD 30 A n'a pas fait l'objet d'études extensives dans la littérature scientifique ouverte et a donc été l'objet de nos récents travaux. Alil et al ont d'abord décrit ce matériau après l'arrêt d'une balle de 7.62 x 39 FMJ [4]. Puis une tentative de description du comportement quasi-statique du Tensylon® a été décrite dans [5]. Comme expliqué par Zhang et al [6], plus le composite est épais, plus le processus de délaminage joue un rôle majeur dans la dissipation de l'énergie cinétique apportée par le projectile. Dans ce sens, Alil et al [7] ont essayé de déterminer le seuil de contrainte de délamination à un taux de déformation très élevé proche d'un impact à grande vitesse, en utilisant une technique LASAT sans projectile. Ensuite, Alil et al [8] ont proposé une modélisation numérique basée sur la méthode des éléments-finis en schéma explicite avec le code LSDYNA. Dans leurs modèles, les auteurs décrivent l'importance de l'adhérence entre les plis mais ne discutent pas le rôle joué par l'équation d'état sous choc, ou bien l'empruntent à Lässig et al [9]. Cependant, la non considération de l'équation d'état sous choc rend impossible au code de calculer la variation de masse volumique et de la vitesse du son lors de l'impact alors que ces grandeurs ont un rôle supposé prépondérant sur le comportement mécanique d'un matériau subissant un impact à haute vitesse. C'est donc dans l'intension de déterminer l'équation d'état sous choc entre 0 et 800 m/s que nous avons effectué une campagne d'impacts de plaque au canon à gaz léger du laboratoire 3SR à l'Université Grenoble Alpes. En premier lieu le paragraphe 2 établit les hypothèses de travail à travers une présentation analytique du problème. Afin de bien comprendre les signaux mesurés, une démarche analytique monodimensionnelle simplifiée (hypothèse d'isotropie) permet de déterminer les paramètres de l'équation d'état sous choc de type « Us-

Up » implémentée dans la plupart des codes hydrodynamiques. La conception de l'édifice expérimental est décrite dans le paragraphe 3. Au cours de cette campagne, les vitesses matérielles ont été mesurées par Vélocimétrie Hétérodyne (VH) à l'aide de sondes VH [10] conçues par deux fabricants différents IDIL et (?). Les résultats sont présentés dans le paragraphe 4. Enfin, étant donné l'impossibilité d'établir une statistique car le temps nécessaire pour la réalisation d'un tir est d'environ une journée, nous proposons en guise de discussion une approche des incertitudes expérimentales par la méthode de Monte-Carlo inspirée de Weisz-Patrault et al [11] pour statuer sur l'incertitude de nos résultats.

2 Matériau

Le matériau étudié est un composite renforcé de fibres poly-éthylène à haute densité (PEHD), le Tensylon® fabriqué par la société DuPont®. C'est un polymère thermoplastique composé de longues chaînes moléculaires de poly-éthylène qui constituent des torons. Pour obtenir ce matériau, une première étape d'extrusion des fibres de PEHD est réalisée. Par la suite, ces fibres sont enrobées et noyées dans une matrices polymère, dans le cas présenté du PE. Ces fibres sont assemblées pour former un pli unidirectionnel. Ces plis sont assemblés pour former une plaque de composite stratifié [0° /90°]_20. Pour obtenir ces plaques, un cycle de cuisson est réalisé par le fabricant. Ce cycle, maitrisé par le fabricant, comprend diverses étapes avec des pressions et des températures différentes. Dans le cas présenté, les plaques sont composées de 20 plis [0°/90°] et ont une épaisseur comprise entre 2.30 et 2.40 mm. Une description plus développée est donnée dans [4]. La masse volumique a été évaluée par pesée puis divisée par le volume de l'échantillon et vaut 966 kg/m^3. La pression maximale appliquée lors du cycle de cuisson est de 60 Bar.

3 Méthode

3.1 Description analytique

La technique d'impact de plaque est utilisée depuis le milieu du vingtième siècle pour la détermination des équations d'état des matériaux sous choc, données fondamentales dans la physique des chocs par exemple pour les applications militaires stratégiques, qui ont notamment permis l'élaboration des tables SESAME [12]. Dans le domaine de la planétologie, la connaissance de l'équation d'état permet de mieux comprendre la formation des astres [13]. En physique fondamentale, l'utilisation d'impacts de plaques hypervéloces reste une option pour la production d'énergie par fusion inertielle contrôlée [14]. Plus d'information sur cette technique sont proposées par Ahrens [15]. La description analytique simplifiée au cas 1D isotrope commence par les équations de conservation de la masse, quantité de mouvement et énergie interne. Le système d'équation de Rankine-Hugoniot décrit ces conservations au travers d'une discontinuité que représente une onde de choc se propageant dans un milieu initialement au repos :

$$\rho_0.D = \rho(D-u) \qquad (1)$$
$$P-P_0 = \rho_0.D(u-u_0) \qquad (2)$$
$$E-E_0 = \tfrac{1}{2}(P_1+P_0)(v_0-v_1) \qquad (3)$$

Où ρ, D, u, P et E sont respectivement la masse volumique, la vitesse du choc, la vitesse matérielle, la pression hydrodynamique et l'énergie interne. v est le volume massique et vaut $1/\rho$. L'indice $_0$ renvoie aux valeurs à l'état initial.
Ce système de trois équations implique cinq variables dont trois thermodynamiques (P, ρ, E) et 2 cinétiques (u, D). Il est donc nécessaire d'avoir recours à deux autres équations pour déterminer un état sous choc. Pour cela, les physiciens ont proposés l'équation d'état de Mie-Grüneisen (4) reliant (P, ρ, E), même s'il en existe d'autres, elle demeure très utilisée et valable dans les phases de détente et de compression :

$$P-P_{ref} = \rho.\Gamma(E-E_{ref}) \qquad (4)$$

Où Γ est le coefficient de Grüneisen et $\rho.\Gamma = \rho_0.\Gamma_0$ est constant. L'indice « $_{ref}$ » fait référence à un état particulier de la matière, pouvant être l'état à froid (0°K) ou encore, l'état d'Hugoniot déterminé avec les relations (1) à (3).
Afin de fermer ce système comportant maintenant quatre équations, une cinquième est nécessaire mais doit demeurer linéairement indépendante des quatre autres. Il vient naturellement d'exprimer D en fonction de u, d'autant plus que cela devient expérimentalement possible avec l'avènement de la vélocimétrie laser doppler (VISAR, VH, Fabry-Perot, …) permettant la mesure de la vitesse matérielle de manière non intrusive et quasi instantanée. La technique de l'impact de plaque s'avère alors la solution. Connaissant l'épaisseur de la cible, la vitesse d'impact et l'instant précis d'impact (ce dernier point est loin d'être trivial, nous reviendrons dessus plus tard…), la vélocimétrie laser relève l'évolution temporelle de la vitesse de surface libre. Ainsi, il devient possible de déterminer l'instant du débouché du choc en face arrière et d'avoir l'amplitude de vitesse matérielle correspondante. Sans rentrer dans les détails, la relation entre la vitesse de l'onde de choc et la vitesse matérielle de son milieu de propagation peut s'écrire selon (5) :

$$D = C_0 + s.u \qquad (5)$$

Où C_0 est la vitesse hydrodynamique du son du dit milieu de propagation, le paramètre s est la pente de la droite lorsque cette relation est linéaire.
Sans encore une fois rentrer trop dans les détails, la vitesse du son C_0 est inférieure à la vitesse longitudinale C_L en mode I (vibration dans le sens de la propagation). Cela résulte en l'apparition d'un « précurseur élastique » qui débouche en face arrière avant le front de choc si sa vitesse est inférieure à C_L.
Ainsi, le problème analytique est fermé et peut fournir une solution de l'état d'un matériau sous choc si les conditions sont connues. En utilisant l'équation (5) dans (2), on obtient l'expression de la pression hydrodynamique en fonction de la vitesse matérielle. Cette relation (6) donne dans le plan (P,u) une courbe caractéristique de degré 2 que l'on appelle polaire de choc et qui passe par l'origine :

$$P - P_0 = \rho_0.C_0(u-u_0) + \rho_0.s(u-u_0)^2 \qquad (6)$$

Cette courbe trouve d'autres appellations comme adiabatique dynamique dans le plan (P, u) ou encore Hugoniot dans le plan (P, u). En effet, lorsque les ondes de choc sont brèves (temps de montée en pression significativement inférieur au temps de traversée du milieu), la vitesse de propagation de l'onde est très supérieure à celle de la chaleur et sur la durée d'observation, la transformation subie par le matériau est considérée comme adiabatique. Ainsi, si l'on traite le cas d'un impact de plaque impliquant un projectile impactant à la vitesse V_0 et une cible initialement au repos de même matériau, la polaire de choc du projectile part du point $(0, V_0)$ jusqu'au point (P_1, V_1). La polaire de choc de la cible part du

point (0, 0) jusqu'au point (P_1, V_1) qui est le point de fonctionnement du système. Le triangle (0, 1, V_0) forme un triangle isocèle d'où $V_1=V_0/2$ (figure 1). La description des états accessibles sous choc peut être suivie dans un diagramme espace-temps présenté en marge du diagramme des polaires de choc. Les numéros portés sur chaque diagramme désignent les mêmes états. A ce stade la polaire du PE-HD sur le tracé de la figure 1 n'est qu'une estimation qui a été rajouté pour des raisons de compréhension. En réalité, l'objectif de notre démarche est de la déterminer à partir de la connaissance du matériau projectile et transmetteur, de la vitesse d'impact V_0 et de la vitesse de surface libre u_3. Cela revient à déterminer l'état 2 commun au transmetteur et au PE-HD. L'état 2 satisfait donc aux relations (7-9):

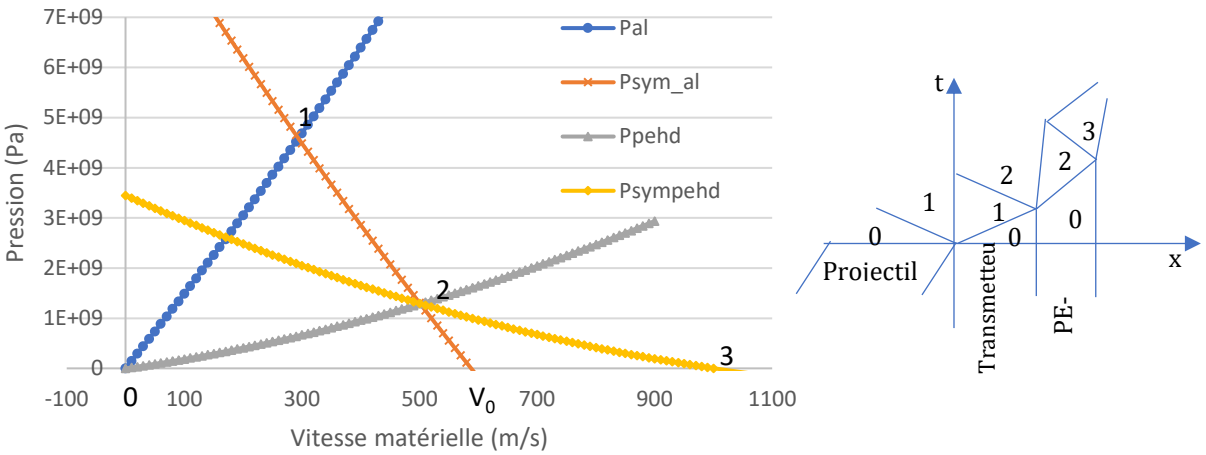

Figure 1 : Diagramme des polaires de choc dans le plan (P, u) pour un impact de plaque sur l'édifice expérimental composé d'un projectile et d'une cible transmetteur de même nature.

$$u_2 = u_3/2 \qquad (7)$$
$$P_2 = \rho_{Al}.C_{Al}(V_0-u_2) + \rho_{Al}.s_{Al}(V_0-u_2)^2 \qquad (8)$$
$$P_2 = \rho_{PEHD}.(Co_{PEHD} + s_{PEHD}.u_2).u_2 \qquad (9)$$

A ce stade, des mesures de vitesse de surface libre pour au moins deux vitesses d'impact permettraient d'établir l'état 2 pour chaque tir, c'est-à-dire que deux points expérimentaux de la polaire du PEHD seraient déterminés. En incluant l'origine du repère, il devient possible de déterminer un système de trinômes du second degré à l'aide de l'équation (9) permettant de déterminer s_{PEHD} et Co_{PEHD} par identification des coefficients, connaissant ρ_{PEHD} :

$$P_{2_tir1} = \rho_{PEHD}.(Co_{PEHD} + s_{PEHD}.u_{2_tir1}).u_{2_tir1} \qquad (10)$$
$$P_{2_tir2} = \rho_{PEHD}.(Co_{PEHD} + s_{PEHD}.u_{2_tir2}).u_{2_tir2} \qquad (11)$$

Cependant, à partir d'un seul tir, connaissant la vitesse u_3 par la mesure via la sonde VH, on en déduit u_2, ce qui permet de calculer P_2. Ainsi, on peut isoler s_{PEHD} dans (9) pour obtenir la relation (12) :

$$s_{PEHD} = \frac{P_2}{\rho_{PEHD}{u_2}^2} - \frac{Co_{PEHD}}{u_2} \qquad (12)$$

3.2 Montage expérimental

Le montage expérimental consiste en un lanceur à gaz léger (Hélium) de la plateforme expérimentale EXPERDYN du laboratoire 3SR (UMR 5521) à l'université Grenoble Alpes. Son fût de diamètre de 100 mm et de longueur 4 m débouche dans une chambre de décompression à l'intérieur de laquelle ainsi qu'à l'intérieur du fût est fait un vide poussé, de l'ordre de 10 mBar (figure 2). La cible est préalablement collée sur la face arrière du transmetteur, lui-même centré sur une couronne fixée sur le fût et disposé sur 3 goujons permettant l'ajustement de la cible afin de garantir la planéité de l'impact (figure 3). Cette planéité est vérifiée avant chaque tir en émettant un faisceau laser depuis la culasse du lanceur et en observant que la réflexion de ce faisceau par la cible reste, au pire, juxtaposée au faisceau émis.

Figure 2 : Lanceur à gaz léger (rouge) et chambre de décompression avec hublots, de la plateforme Experdyn du laboratoire 3SR.

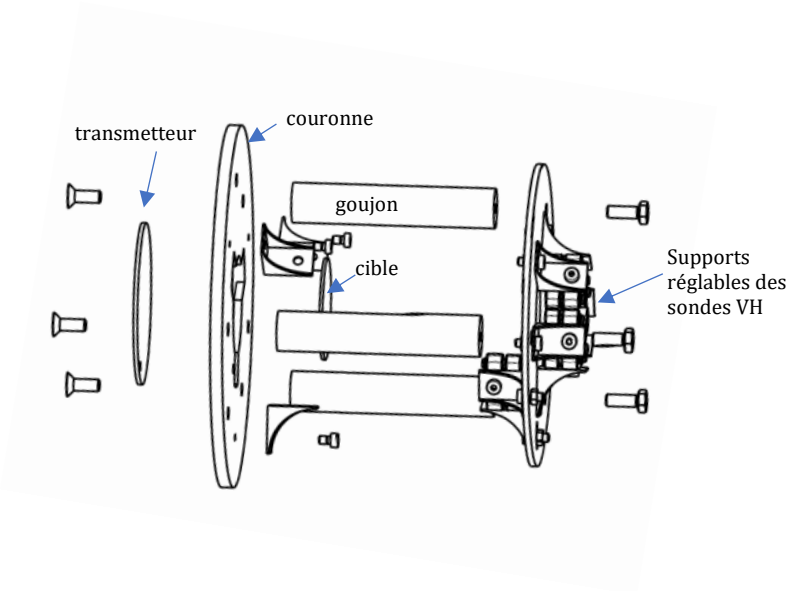

Figure 3 : porte-cible utilisé pour la campagne d'impact de plaque.

A l'arrière de la cible pointent les fibres optiques des sondes VH. Un perçage de la couronne permet à une voie VH d'enregistrer la vitesse à l'impact. Une autre fibre VH pointe sur la face arrière du

transmetteur. Les fibres des sondes IDL sont montées en tandem avec les sondes VH afin d'en comparer les mesures.
Pour la détermination de la vitesse du son dans le PEHD, l'installation Belenos de l'ENSTA Bretagne a été utilisée de la même manière que dans [16]. L'épaisseur de la cible en PEHD a été mesurée localement et vaut 2.30 mm et le temps de traversée est de 908 ns depuis le front de montée du chargement laser, ce qui donne une vitesse C=2508 m/s. A cette vitesse, on doit retrancher la vitesse matérielle induite dans le PEHD sous choc qui est de 145 m/s ce qui amène C_L=2363 m/s.

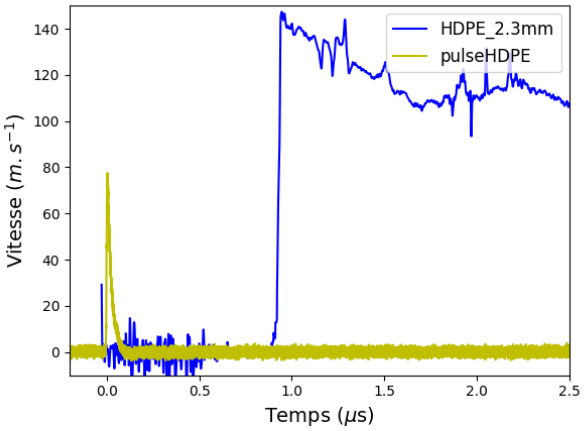

Figure 4 : Vitesses de surface libre mesurées par VH sur PEHD 2.3 mm, par choc laser.

A partir d'essais de traction réalisés à l'ENSTA Bretagne le module de cisaillement G_{12} a été estimé à 1580 MPa pour des hautes vitesses de déformation de l'ordre de $10^3 s^{-1}$ [18]. Cela permet de donner une valeur approchée de C_0, la vitesse hydrodynamique du son dans la direction hors plan pour un matériau composite par l'approximation (13) :

$$C_0 = \sqrt{C_L^2 - \frac{4}{3}C_T^2} \approx \sqrt{C_L^2 - \frac{4}{3}C_{12}^2} \quad avec\ C_{12} = \sqrt{\frac{G_{12}}{\rho_0}} \quad (13)$$

La relation (13) donne C_0=1845 m/s ce qui semble légèrement supérieur aux 1789 m/s annoncés par Lässig et al [9] pour le Dyneema (PEHD) mais du bon ordre de grandeur. Ceci peut être expliqué par les différences intrinsèques du matériau (différences de résine et de grades de fibres). Une analyse plus poussée des incertitudes est en cours…

4 Résultats

La figure 5 illustre les signaux de vitesse de surface libre obtenus sur le tir n°3. Une sonde VH pointait la surface libre du PEHD (l'autre, sur un matériau sur lequel nous ne pouvons communiquer). Une sonde IDL pointait sur la surface libre du transmetteur, plaque d'aluminium recevant le projectile et qui supporte les cibles. L'autre sur la face arrière du PEHD, en tandem avec la sonde VH. Les cibles étant collées au cyanoacrylate sur la surface libre du transmetteur, elles reçoivent l'onde de choc ayant traversée ce dernier. L'épaisseur de cyanoacrylate est estimée par mesure de l'épaisseur du transmetteur et de la cible avant collage, puis de l'assemblage transmetteur + cyanoacrylate + cible après collage. Cette épaisseur est estimée entre 5 et 10 µm. L'hypothèse raisonnable que l'impédance acoustique de la cyanoacrylate est proche de celle du PEHD sera faite.

La mesure de la vitesse d'impact est estimée via le temps écoulé entre le front de montée du transmetteur et la distance entre le transmetteur d'épaisseur 2.5 mm et la photodiode de déclenche placée à approximativement 30 mm de la cible, soit 27.5 mm de la face impactée du transmetteur.
Le front de montée du signal de vitesse de la surface libre du transmetteur apparaît à 40.6 µs. Il se compose de la première montée raide appelée précurseur élastique, c'est la partie de l'onde de compression qui se propage à la vitesse longitudinale du son dans l'aluminium d'épaisseur 2.5 mm, soit C_L = 6200 m/s dont il a mis 0.4 µs à traverser. Avant cela, le projectile a effectué une phase de vol qui a durée environ 40.2 µs pour parcourir la distance de 27.5 mm. Cela donne une première estimation de la vitesse à l'impact qui est d'environ 680 m/s. Une seconde méthode permet de déterminer la vitesse d'impact à partir des relations analytiques. Etant donné que l'impacteur et le projectile sont de même nature, la vitesse de surface libre du transmetteur est égale à la vitesse d'impact, soit 586 m/s au maximum. Il subsiste un écart de près de 100 m/s entre les deux méthodes qui tient aux incertitudes de mesure et à la maitrise du temps de déclenche.
La vitesse de surface libre est mesurée à la fois par la VH et par l'IDL. On constate un front de montée abrupte à 40.9 et à 41.6 µs respectivement pour la sonde VH et la sonde IDL. Ces deux temps de débouché n'ont pas lieu au même instant. Cela est dû aux retards optiques et électriques (distance parcourue par l'information dans les fibres optiques et les câbles électriques). Les ordres de grandeurs des vitesses atteintes et la chronologie sont plutôt bien respectés. La vitesse de surface libre maximale est de 1002 m/s.
A partir des signaux IDL, il est possible d'estimer la vitesse de l'onde de choc dans le PEHD. Le choc sort du transmetteur à t=40.649 µs et sort du PEHD à t=41.611 µs, il a donc mis 0.962 µs pour parcourir les 2.40 mm de PEHD + 20 µm de cyanoacrylate (12 ns) + 30 µm d'aluminium (5 ns), ce qui donne une vitesse de choc D = 2539 m/s.
A partir des données déterminées par la pesée, en reprenant l'équation (5) et les figures (1) et (5), il devient possible de déterminer s_{PEHD} :

$$s_{PEHD} = (D - C_0) / (u_{fs}/2) = 1.388$$

Cependant, la mesure de la distance n'est pas précise et le retard dans la chaine de déclenchement, notamment entre les deux voies n'a pas été estimé. Une autre méthode, basée sur l'analyse des signaux de vitesse de surface libre, consiste à affirmer selon la figure (1) que le point (2) appartient à la polaire du PEHD qui demeure actuellement inconnue, mais également à la polaire de l'aluminium qui elle est connue, ce qui nous mène à l'équation (12). Par cette méthode, s_{PEHD} = 1.786 et demeure proche de la valeur de 1.7 annoncée par Lässig et al sur le Dyneema® [9].

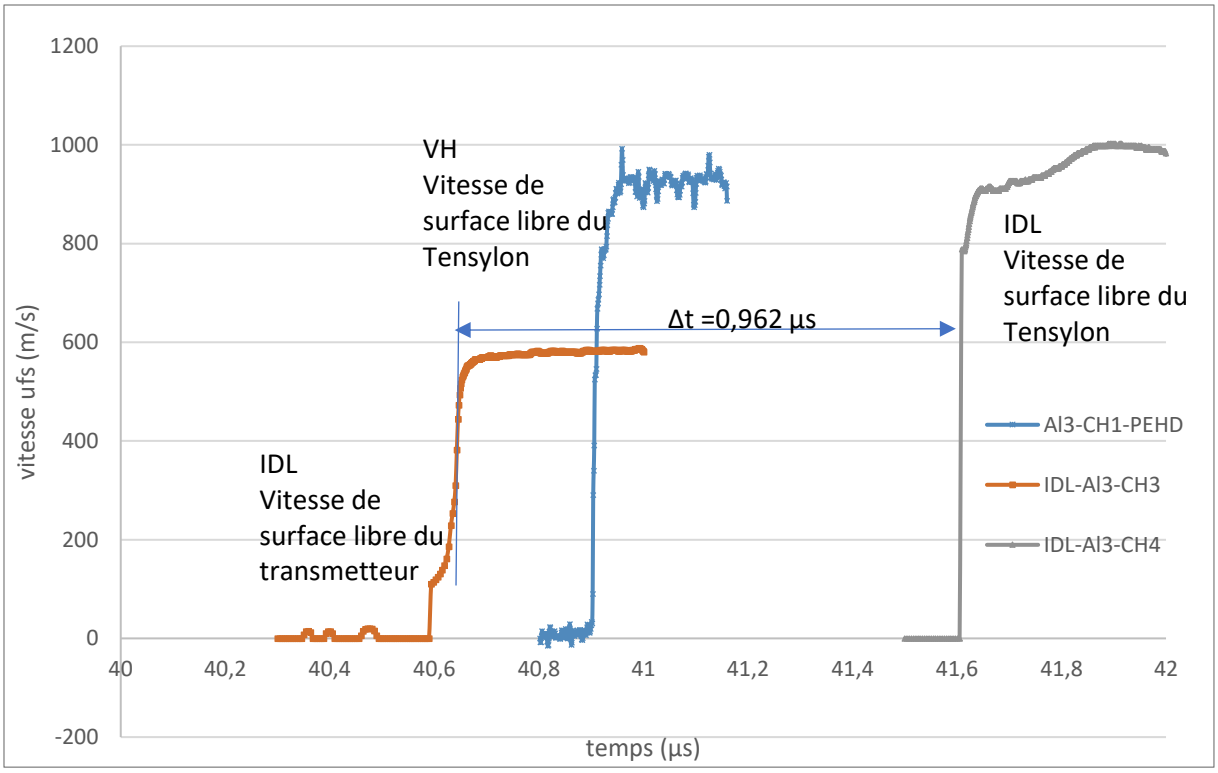

Figure 5 : Mesure de vitesse de surface libre par vélocimétrie hétérodyne sur une cible de PEHD, d'épaisseur 2.4 mm, collée sur un transmetteur d'aluminium d'épaisseur 2.5 mm, impacté par un projectile plan de 5 mm en aluminium à une vitesse de l'ordre de 600 m/s.

5 Discussions

Afin de discuter des incertitudes de mesure, une approche de calcul d'incertitudes selon la méthode de Monte-Carlo [11] est proposée avec une discrétisation sur N=1000000 jeux de valeurs aléatoires. Le tableau (1) donne les valeurs nominales des paramètres d'entrée du modèle avec les intervalles de tolérance crédibles. Les histogrammes montrant les valeurs moyennes des paramètres de sortie P_2, u_2 et s_{PEHD} sont illustrés sur la figure (6) et résumées dans le tableau (2) avec les écarts type à 67 %. Ces valeurs sont en accords avec celles déduites de l'étude analytique.

V_0 (m/s)	ρ_{0PEHD} (kg/m^3)	ρ_{0Al} (kg/m^3)	C_{0PEHD} (m/s)	C_{0Al} (m/s)	u_3 m/s	s_{Al}
588	966	2760	1845	5386	1002	1.339
±5	±5	±10	±20	±20	±5	±0.01

Tableau 1 : paramètres d'entrée de la méthode de Monte-Carlo. Les incertitudes sont données dans le système d'unité présenté dans l'entête du tableau.

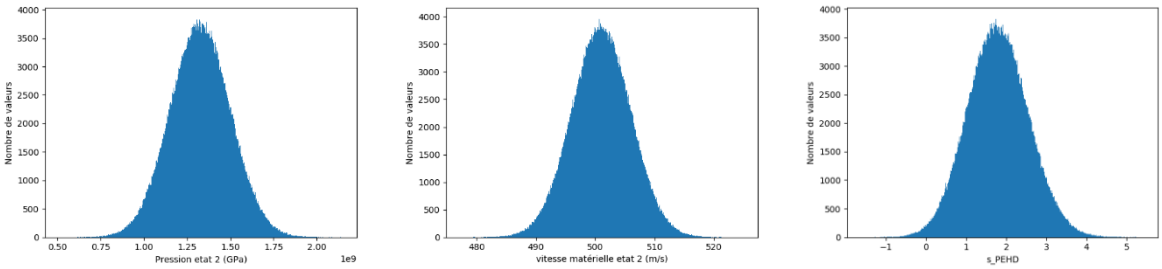

Figure 6 : Histogramme des paramètres P_2 et u_2 (respectivement pression hydrodynamique et vitesse matérielle à l'état 2) et le paramètre s_{PEHD}.

Paramètre	P_2 **(MPa)**	u_2 **(m/s)**	s_{PEHD}
Moyenne	1.326	501.0	1.796
Incertitude à 67 %	0.174	5.00	0.759
Incertitude à 95 %	-	10.00	-

Tableau 2 : Paramètres de sortie de la méthode de Monte-Carlo.

A partir de ces valeurs, la relation (5) permet le calcul de la vitesse du choc D=2759 m/s contre D=2539 m/s via la lecture des signaux expérimentaux. Cette différence reste significative mais dans le bon ordre de grandeur et devrait être fiabilisée par les calculs d'incertitude en cours.

Conclusions

L'objectif annoncé de cette étude était la détermination des paramètres de l'équation d'état sous choc du Tensylon® pressé à 60 Bar. La masse volumique de 966 kg/m3 a été mesurée, une vitesse hydrodynamique du son C_0 estimée par une méthode expérimentale a été déduite et vaut 1845 m/s. A partir de la détermination expérimentale de ces paramètres, l'application d'une méthode analytique basée sur l'utilisation des polaires de choc a permis de poser le problème à résoudre pour déterminer l'état sous choc dans le PEHD et d'en déduire le coefficient s_{PEHD} par deux méthodes différentes. L'instrumentation d'un tir d'impact de plaque a permis d'obtenir les vitesses de surface libre du PEHD sous impact. A l'occasion de ces mesures, deux interféromètres laser-doppler ont été utilisés (VH-IDIL et IDL). Les mesures obtenues sont comparables en amplitude de vitesse, un décalage temporel subsiste sur les fronts de monté, ce dernier peut être attribué à la différence de longueur de câble et fibres optiques et reste à investiguer.

La première méthode repose sur la lecture de la vitesse du choc dans le PEHD et nécessite de respecter scrupuleusement les conditions d'impact plan. Elle mène à la valeur de s_{PEHD}=1.388 et les incertitudes sont en cours d'évaluation. La deuxième méthode implique les polaires de choc et mène à un résultat légèrement différent (s_{PEHD}=1.796 ±0.759) avec une incertitude large déterminée à l'aide de la méthode de Monte-Carlo. Enfin, cette expérience suggère une troisième méthode basée sur l'ajustement d'un trinôme du 2nd degré de plusieurs points expérimentaux obtenus avec des vitesses d'impacts distinctes. Ce travail reste en perspective.

La modélisation numérique des expériences avec un code de calcul éléments-finis explicit reste également une perspective.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'AID pour son soutien aux projets COMPADD et DYNACOMPPE, le RéseauHP pour son soutien à la mobilité via son dispositif « initiatives technologiques », Pauline Respaud de la société TENCATE Advanced Armour et Hackim Hoepffner de DuPont pour la mise à disposition des échantillons de Tensylon®.

Références

[1] Chen, X. (Ed.). (2016). Advanced fibrous composite materials for ballistic protection. Woodhead Publishing.

[2] Bhatnagar, A. (Ed.). (2016). Lightweight ballistic composites: military and law enforcement applications. Woodhead Publishing.

[3] Cunniff, P. M., Auerbach, M. A., Vetter, E., & Sikkema, D. J. (2002, December). High performance "M5" fiber for ballistics/structural composites. In 23rd. Army Science Conference (p. 18).

[4] Alil, L. C., Arrigoni, M., Badea, S., Ginghină, R., Matache, L. C., & Mostovykh, P. (2018). Ballistic study of Tensylon®-based panels. Express Polymer Letters, 12(6), 491-504.

[5] Alil, L. C., Arrigoni, M., Badea, S. M., Barbu, C., Istrate, M., & Mostovykh, P. S. (2017). On the constitutive law for the mechanical quasi-static response of criss-cross composites (on the example of UHMWPE). Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 1(1), 1-12.

[6] Zhang, D., Sun, Y., Chen, L., Zhang, S., & Pan, N. (2014). Influence of fabric structure and thickness on the ballistic impact behavior of Ultrahigh molecular weight polyethylene composite laminate. Materials & Design (1980-2015), 54, 315-322.

[7] Alil, L. C., Arrigoni, M., Istrate, M., Kravcov, A., Pavic, J. L., & Tahan, G. (2020). Laser Induced Shockwave as Delaminator of Composite Material for Ballistic Protection at High Strain Rate. In Soft Target Protection (pp. 15-33). Springer, Dordrecht.

[8] Luminița Cristina, ALIL, MATACHE, L. C., & SANDU, S. M. (2018). Numerical Simulation of a Ballistic Impact on Tensylon® UHMWPE Laminates Using the Plastic Kinematic Model in LS-Dyna®. Journal of Military Technology Vol, 1(1).

[9] T. Lässig, L. Nguyen, M. May, W. Riedel, U. Heisserer, H. van der Werff, and S. Hiermaier, "A non-linear orthotropic hydrocode model for ultra-high molecular weight polyethylene in impact simulations International Journal of Impact Engineering, vol. 75, pp. 110-122, Jan. 2015, http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.07.004.

[10] Mercier, P., Benier, J., Azzolina, A., Lagrange, J. M., & Partouche, D. (2006, August). Photonic doppler velocimetry in shock physics experiments. In Journal de Physique IV (Proceedings) (Vol. 134, pp. 805-812). EDP sciences.

[11] Weisz-Patrault, D., Francart, C., & Seisson, G. (2021). Uncertainty estimation and hierarchical Bayesian analysis of mechanical dynamic tests. Journal of Dynamic Behavior of Materials, 7(3), 447-468.

[12] S. P. Lyon and J. D. Johnson, \SESAME: The Los Alamos National Laboratory equation of state database," Tech. Rep. (LANL, 1992) LA-UR-92-3407.

[13] Guarguaglini, M., Hernandez, J. A., Benuzzi-Mounaix, A., Bolis, R., Brambrink, E., Vinci, T., & Ravasio, A. (2019). Characterizing equation of state and optical properties of dynamically pre-compressed materials. Physics of Plasmas, 26(4), 042704.

[14] Holland, A. (2020). Political and commercial prospects for inertial fusion energy. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 378(2184), 20200008.

[15] Ahrens T.J. (2007) Shock Wave Experiments. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_293

[16] Alil, L. C., Arrigoni, M., Deleanu, L., & Istrate, M. (2018). Assessment of delamination in Tensylon® UHMWPE composites by laser-induced shock. MATERIALE PLASTICE, 55(3), 364.
[17] Shui, G., Kim, J. Y., Qu, J., Wang, Y. S., & Jacobs, L. J. (2008). A new technique for measuring the acoustic nonlinearity of materials using Rayleigh waves. *Ndt & E International*, *41*(5), 326-329.
[18] M. Castres, A. El Malki-Alaoui, M. Arrigoni, « Rapport sur la modélisation du comportement du Tensylon ® Projet MRIS DYNACOMPPE V2 », rapport interne AID, 2 juin 2021.