

Nanosecond pulsed laser induced shocks at the microsecond time scale: VISAR measurements and simulations

**F. DELLORO^a, D. ZAGOURI^b, M. JEANDIN^a, M. BOUSTIE^{b,c},
S.A.E. BOYER^d, M. BERINGHIER^c**

a. Centre des Matériaux (MAT) – MINES ParisTech - PSL Research University - CNRS UMR 7633 – France. email: francesco.delloro@mines-paristech.fr

b. SimChoc – 64 Rue Gallieni, 92240 Malakoff, France. email: didier.zagouri@simchoc.com

c. Institut Pprime (PPRIME) – Université de Poitiers: ENSMA - CNRS UPR3346 – France. email: marianne.beringhier@ensma.fr

d. Centre de Mise en Forme des Matériaux (CEMEF) – MINES ParisTech - PSL Research University - CNRS UMR 7635 – France. email: severine.boyer@mines-paristech.fr

Résumé

Lorsqu'une impulsion laser d'une durée de l'ordre de la nanoseconde frappe une cible en aluminium de 250 μm d'épaisseur en présence d'un milieu de confinement, l'expansion du plasma génère une onde de choc mécanique qui se déplace ensuite à travers le solide en rebondissant plusieurs fois entre les surfaces libres de l'échantillon. L'intervalle de temps correspondant aux premières centaines de ns a fait l'objet de nombreuses études, donnant un cadre expérimental qui permet la mise en place de lois de comportement dynamiques et de critères d'endommagement des matériaux. La déformation d'échantillons minces induite par choc laser montre que cette technique est utilisable dans le cadre de la mise en forme des métaux dans des conditions dynamiques extrêmes. Cette nouvelle opportunité laisse envisager pour l'avenir des applications industrielles innovantes. Cette étude se concentre sur les effets à longs termes (c'est-à-dire quelques μs), responsables de la déformation finale observées dans les feuilles d'aluminium. Les mesures de vitesse à haute résolution ont été réalisées par VISAR (de l'anglais, Velocity Interferometer System for Any Reflector) lors d'expériences de choc laser. Leur comparaison avec des simulations numériques 1D et 2D de la propagation de l'onde de choc mécanique a montré que la charge de pression de décroissance exponentielle, classiquement utilisée pour modéliser l'interaction laser-matière dans ce domaine, n'était pas appropriée pour reproduire les données expérimentales. Il a été montré que le modèle matériau et ses paramètres peuvent en partie expliquer l'écart entre les simulations et les expériences. Inversement, les simulations ont montré que la déformation résiduelle de la cible suite à un choc laser ainsi que la mesure expérimentale de la surface libre dépendaient en partie de la modélisation de la détente du plasma représentée par la décroissance du chargement du laser. Cette étude fournit de nouvelles connaissances pour l'interprétation de l'interaction laser-matière et pour la modélisation des chocs mécaniques induits par le laser dans les solides au-dessous de leur seuil d'endommagement. Elle ouvre des applications possibles dans la mise en forme dynamique des matériaux.

Abstract

When a nanosecond laser pulse hits a 250 μm thick Al target in the presence of a confinement medium, the plasma expansion generates a mechanical shock wave, which then travels through the solid bouncing numerous times back and forth between the free surfaces of the sample. The time interval corresponding to the first few hundreds of ns has been extensively studied, providing an experimental layout for implementation of dynamic constitutive laws and damage criteria of materials. The final deformation of thin samples produced by laser shock showed the possibility of using this technique for the shaping of metals in highly dynamic conditions. This new opportunity could open in the future to innovative industrial applications. This study focused on the long-term effects (i.e. few μs), responsible for the final deformation observed in the Al sheets. High resolution velocity measurements were performed by VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector) during the laser shock experiments. Their comparison with 1D and 2D numerical simulations of the mechanical shock wave propagation showed that the classical exponential decaying pressure loading, used to model the laser-matter interaction in this domain, was not suitable to explain the experimental data. The role of the material model and its parameters was also evidenced as a moderate possible explanation of the discrepancy between simulations and experiments. Conversely, the simulations showed that the residual deformation of Al under laser shock and the overall free surface velocity experimental measurement is mostly dependent on the plasma release modeling of the loading as represented by the decay of the laser loading. This study gives new insights in the interpretation of laser-matter interaction and the modeling of laser-induced mechanical shocks in solids below their damage threshold with possible applications in dynamic forming of materials.

Mots clefs : choc laser, interaction laser matière, simulation, mise en forme des matériaux

1 Introduction

Les ondes de choc permettent de solliciter la matière à des états extrêmes en pression et en température. Nombre de façons existe pour produire un choc, de la plus grande échelle (impacts géophysiques et astrophysiques) à la plus petite (lasers à fission atomique ou femtoseconde) [1]. En se positionnant en sciences des matériaux, les types de sources de choc expérimentales qui peuvent être utilisés sont: i. barres de Hopkinson [2], ii. charges explosives [3], iii. impacts de plaques par canon à gaz [4] ; iv. sources laser à haute puissance en nanosecondes [5].

La génération des chocs par laser résulte en une irradiation pulsée qui permet de solliciter la matière dans un régime ultra-dynamique [6]. Cette méthode est utilisée dans des applications industrielles de haute technologie telles que le formage rapide, la compaction dynamique ou encore le durcissement superficiel. Nous pouvons citer par exemple le Laser Shock Peening (LSP) car probablement l'un des plus connu. Il utilise des chocs induits par laser pour créer des contraintes résiduelles entraînant le durcissement du matériau [7]. Ceci est utilisé pour augmenter la durée de vie en fatigue, en retardant la propagation de la fissure ou l'effet de la corrosion. Ce procédé est utilisé pour les disques de turbine, les centrales nucléaires ou dans des applications médicales.

A ce jour, les comparaisons entre les déformées observées sous impact de choc laser sur cibles (de type divers) et les simulations numériques ne sont pas toujours concluantes. Les simulations numériques 1D et 2D de la propagation de l'onde de choc mécanique ne reproduisent pas correctement la charge de pression de décroissance exponentielle, classiquement utilisée pour modéliser

l'interaction laser-matière [1, 7, 8]. Les explications sont liées non seulement au modèle mécanique utilisé pour représenter le comportement du matériau et donc les paramètres matériau à sélectionner, mais également au phénomène du choc et plus spécifiquement la déformation résiduelle du matériau et la détente du plasma. Le travail ici présenté s'est intéressé notamment de ces derniers aspects, qui ont une importance capitale dans l'optique d'utiliser le procédé de choc laser pour la mise en forme des matériaux. En premier lieu l'expérience permettant de générer un choc laser avec mesure *in situ* sera décrite, suivie par une partie théorique, dans laquelle seront présentées les hypothèses, relations et équations issues de la mécanique des ondes de choc et utilisées par la simulation numérique. Enfin, seront présentés les résultats des différentes simulations effectuées (en 1D et 2D) et leur comparaison avec les signaux expérimentaux.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Expérimental

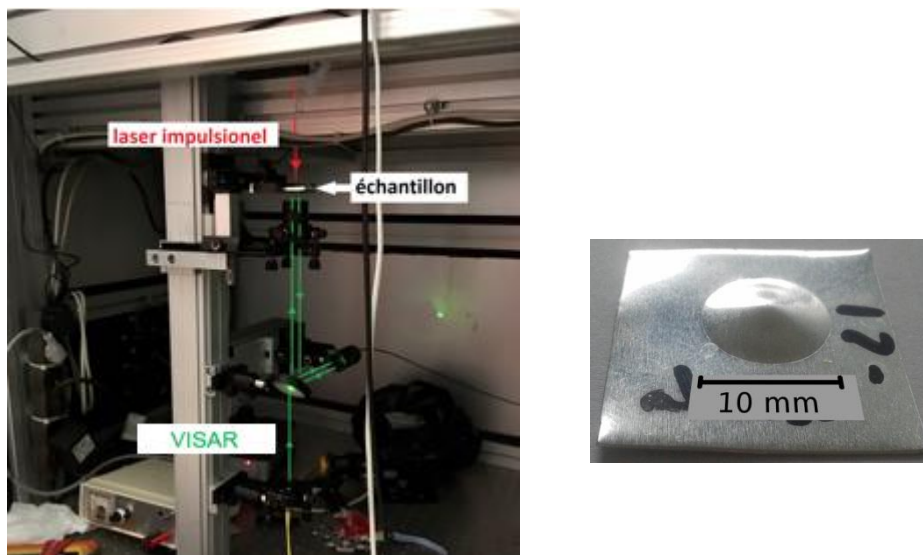


Figure 1 : dispositif expérimental de mise en forme par choc laser et photographie d'une feuille d'aluminium 250 μm déformée par choc laser.

Dans le but de solliciter le matériau à des vitesses de déformation très élevées, les expériences ont consisté à tirer sur des cibles sous forme de feuillards, pour différentes valeurs de flux laser. La « face avant » est celle illuminée par le laser de puissance, l'autre étant nommée « face arrière ». Pour chaque tir, la vitesse de déplacement de la face arrière a été enregistrée par une technique d'interférométrie laser fondée sur l'effet doppler. Pour augmenter la pression exercée sur la cible par l'expansion du plasma, de l'eau a été utilisée comme milieu de confinement.

Les cibles utilisées étaient des feuillards d'aluminium d'épaisseur 250 μm , produits par Goodfellow. La source laser utilisée pour cette étude était une Thales Saga 330, capable de délivrer des impulsions d'énergie 2 J et de durée (largeur à mi-hauteur) 5,2 ns à une longueur d'onde de 532 nm. Le faisceau laser était focalisé sur la cible par une lentille de distance focale 200 mm. Le diamètre de la tache focale était réglable en modifiant la distance entre la lentille et la cible. Les mesures de vitesse ont été effectuées par un système VISAR (de l'anglais, *Velocity Interferometer System for Any Reflector*) de Valyn International alimenté par un laser continu (Torus de Laser Quantum, puissance max 0,5 W, longueur d'onde de 532 nm) et connecté à un oscilloscope digital (2GHz – 20 GS/s). Les figures

d'interférence enregistrées sur l'oscilloscope ont été traitées pour reconstruire la vitesse en fonction du temps. Le dispositif expérimental est montré à la figure 1.

Des nombreux tirs ont été effectués sur le même type de cible avec des flux laser différents et variables dans une plage de 2 à 7 GW·cm⁻². Pour chaque valeur du flux, la répétabilité de la mesure a été validée par deux ou trois répétitions de l'expérience (les mesures retenues pour la suite de cette étude sont présentées en figure 2). Tous les signaux VISAR ont été enregistrés et analysés. Le reste de l'article se focalise sur une seule valeur du flux, le but étant d'appréhender la prise en compte des phénomènes mis en jeu sur une échelle temporelle au-delà de la simple interaction laser-matière, permettant une restitution de la déformée finale du matériau sous choc laser. L'étude paramétrique de cette déformation selon les conditions de tir pourra faire l'objet d'études ultérieures.

L'expansion du plasma génère une onde de choc qui se propage dans le solide et qui est réfléchiée à chaque fois qu'elle rencontre une surface libre. Ainsi, s'établit un mécanisme périodique d'aller-retours dans la cible, reflétés sur la mesure de vitesse de face arrière par des oscillations périodiques toutes les 100 ns. Sous l'effet de l'impulsion principale, une mise en vitesse croissante globale de la cible est d'abord observée, suivie par une décroissance de la vitesse à partir de 2 μs, suite à la dissipation de l'énergie transférée et aux effets de bord.

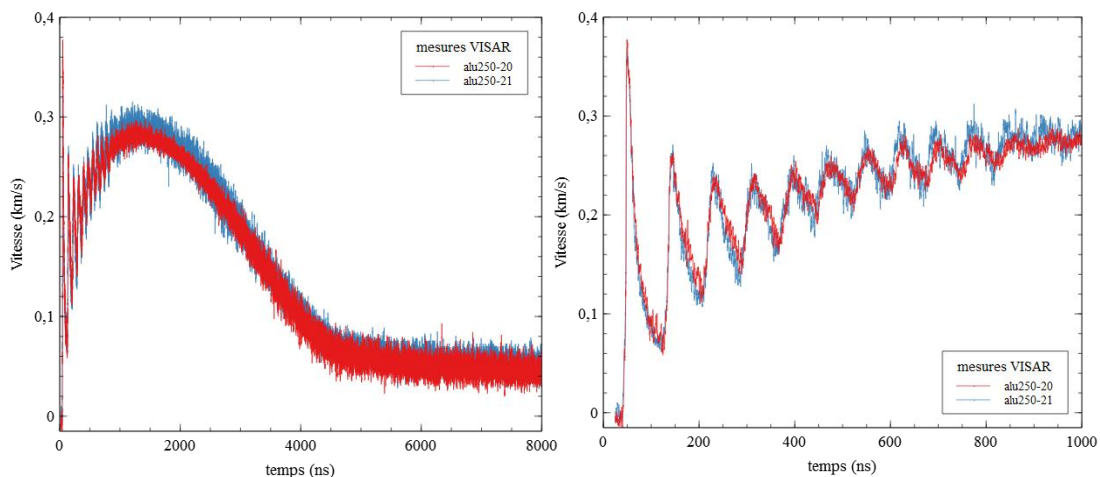


Figure 2 : mesures de vitesse de la face arrière d'une cible d'aluminium 250 μm pour un flux laser de 6 GW cm⁻².

2.2 Modélisation

La modélisation adoptée considère donc la création et la propagation de l'onde de choc, ainsi que la déformation mécanique que la cible subit. Des simulations ont été effectuées par la technique des éléments finis avec le logiciel RADIOSS commercialisé par Altair (Troy, Michigan, EUA). Le domaine de simulation était constitué par un rectangle, représentant en symétrie axiale de révolution un disque d'épaisseur 250 μm et rayon 6 mm. L'expansion du plasma, à l'origine de l'onde de choc, a été modélisée par l'application d'un chargement en pression sur la face avant du feuillard, sur un rayon équivalent à celui de la tache focale du laser [9, 10]. Ce chargement a été déterminé précédemment pour restituer les mesures de vitesses sur une durée inférieure à quelques centaines de nanosecondes réalisés sur un aluminium de référence soumis à une gamme de flux laser d'intensité variable. Selon le flux laser appliqué, en mode confiné eau, l'amplitude de pression maximale à appliquer à ce profil normalisé a été déterminée sur les abaques de références établies pour le type de laser utilisé [11].

Ainsi, pour le flux de $6 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$, une amplitude de 3.8 GPa a été appliquée au chargement. Ces abaques ont pu être renforcés par les études récentes corroborant ces niveaux de chargements équivalents [8,12]. La figure 3 illustre le cas du chargement temporel normalisé, utilisé pour les premières simulations [11].

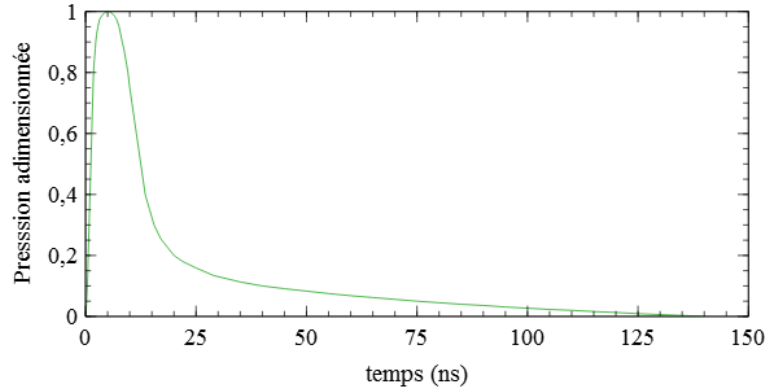


Figure 3 : pression en fonction du temps, imposée comme condition aux limites dans les simulations, pour la surface représentative de la zone de focalisation du laser.

Le matériau cible aluminium est décrit par un modèle visco-plastique de Johnson-Cook [13].

$$\sigma = (A + B \varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_{p,0}} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right)$$

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
E	70,4 [GPa]	$\dot{\varepsilon}_{p,0}$	$10^{-3} [\text{s}^{-1}]$
ν	0,33	m	1
A	0,2 [GPa]	T_{melt}	775 [K]
B	0,426 [GPa]	T_0	300 [K]
n	0,34	c_p	897 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
C	0,015		

Tableau 1 : paramètres de la loi de comportement de Johnson-Cook pour l'aluminium, tirés de [13].

La partie hydrodynamique de la contrainte est déterminée par les équations de Rankine –Hugoniot et l'équation d'état de Mie-Grüneisen :

$$P - P_{ref}(\rho) = \Gamma_o \rho_o \left(E - E_{ref}(\rho) \right)$$

référéncée par la courbe de Hugoniot du matériau :

$$P_h - P_o = \frac{\rho_o C_o^2 \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho} \right)}{\left(1 - S \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho} \right) \right)^2}$$

Paramètre	Valeur
ρ_0	2700 [Kg m ⁻³]
c_0	5386 [m s ⁻¹]
S	1,339
Γ_0	2,09
C_0	0

Tableau 2 : paramètres de l'équation d'état de Mie-Grünëisen pour l'aluminium.

3 Résultats et discussion

Pour les premières simulations effectuées, le profil temporel de chargement appliqué en face avant a été tiré d'études précédentes [11]. Ces profils n'étaient pas obtenus de mesures expérimentales directes, mais par ajustement des paramètres de simulations aux mesures VISAR (méthode inverse) sur une durée inférieure à quelques centaines de nanosecondes. Ils présentaient un pic autour des 5 ns, suivi par une décroissance exponentielle, jusqu'à atteindre zéro vers les 150 ns (cf. figure 3). Ils avaient été optimisés pour reconstruire dans la simulation les trois premiers aller-retours de l'onde de choc, le but de l'étude étant la prédiction de la traction maximale qui se produit généralement dans cet intervalle de temps. La figure 4 présente la comparaison de la vitesse mesurée avec deux simulations obtenues par un chargement classique, 1D en noir et 2D en vert. Même en effectuant des variations sur les paramètres matériaux, il est impossible de faire rapprocher les courbes expérimentales et numériques. En fait, c'est à partir de 200 ns environ que les vitesses simulées deviennent plus faibles et le décalage ne fait qu'augmenter. Il est évident que, à la différence des simulations, dans l'expérience la cible continue à accélérer bien après les 150 ns.

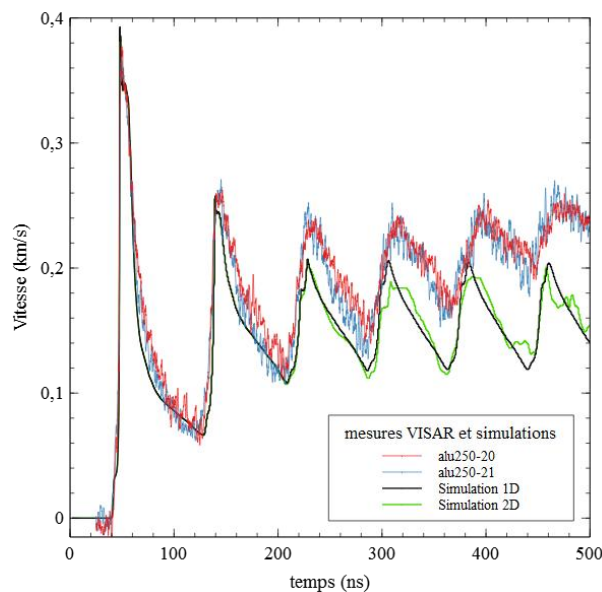


Figure 4 : comparaison des mesures de vitesse avec les résultats des simulations 1D et 2D axisymétrique.

Le problème a pu être résolu en modifiant le profil temporel de chargement. Notamment, considérant que la détente du plasma confiné se prolonge très vraisemblablement au-delà de quelques centaines de

nanosecondes [14], une queue de pression, faible par rapport au pic mais étendue dans le temps, a été ajoutée et optimisée pour restituer une évolution de la vitesse proche des mesures. Des travaux récents de simulation de l'interaction laser-matière en régime confiné [8] indiquent également la présence d'une queue de pression jusqu'à environ 1 μ s. Les profils temporels de chargement initial et optimisé sont illustrés à la figure 5. La comparaison des résultats de simulation et les mesures s'en est trouvée bien améliorée, comme montré à la figure 6. L'accélération de la cible était très bien restituée, jusqu'à atteindre une valeur asymptotique vers 1 μ s.

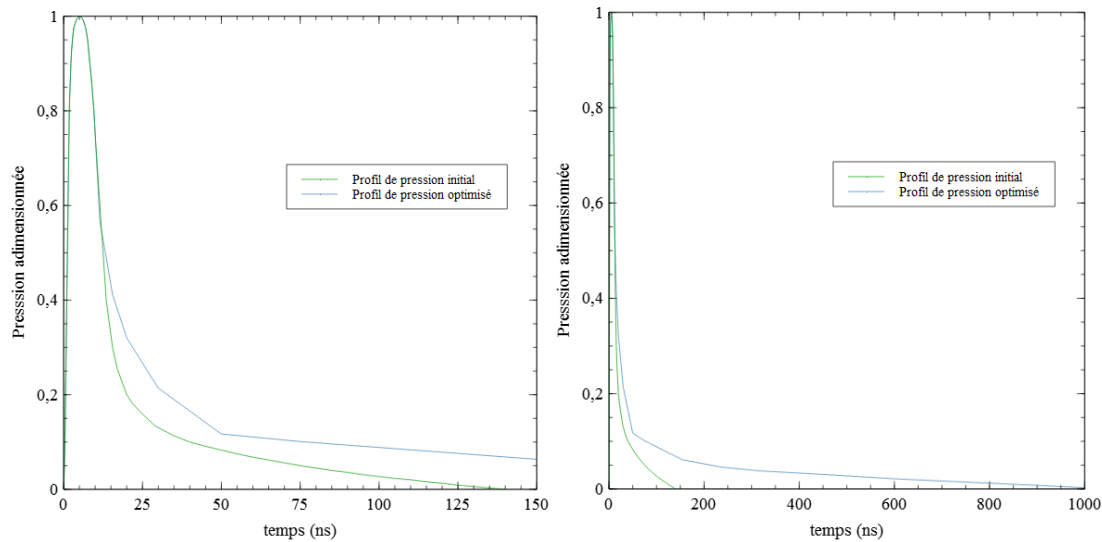


Figure 5 : comparaison du profil de pression initial avec le profil optimisé. A gauche, sur les temps courts (0-150 ns), à droite sur les temps longs (0-1 μ s).

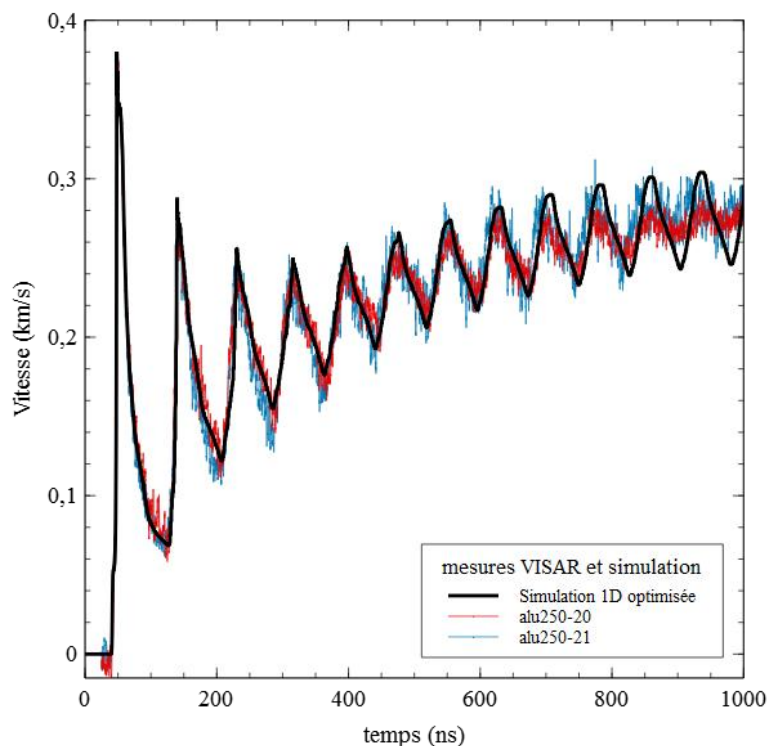


Figure 6 : comparaison de la vitesse de face arrière d'une cible Al 250 μ m irradiée à 6 GW cm^{-2} et de la simulation numérique 1D, avec le profil de chargement optimisé, tel que sur la fig. 5.

En comparant ce résultat avec la mesure expérimentale sur une durée de 5 μ s, comme montré sur la figure 7, la diminution de vitesse observée expérimentalement à partir de 2 μ s environ n'a pas pu être restituée par une approche 1D. En effet, il a fallu passer à une approche 2D axisymétrique pour pouvoir inclure les effets de bord, responsables de la diminution de vitesse. La simulation 2D a été effectuée avec les mêmes réglages que ceux opérés en 1D et a conduit d'emblée à une bien meilleure restitution de la forme globale de la vitesse mesurée. Plusieurs orientations sont possibles en vue d'obtenir un ajustement total : un paramétrage plus fin de la queue de pression, l'optimisation des paramètres de la loi de comportement du matériau, et, éventuellement, le choix d'une loi de comportement du matériau plus adaptée.

Afin d'analyser aussi la précision de la mesure expérimentale servant de validation à la recherche du chargement appliqué, l'examen de la vitesse en un point décalé de l'axe du laser de 0,5 mm a montré une différence, sans que celle-ci ne soit majeure du fait que le pointé de mesure doit être inférieur à 200 μ m.

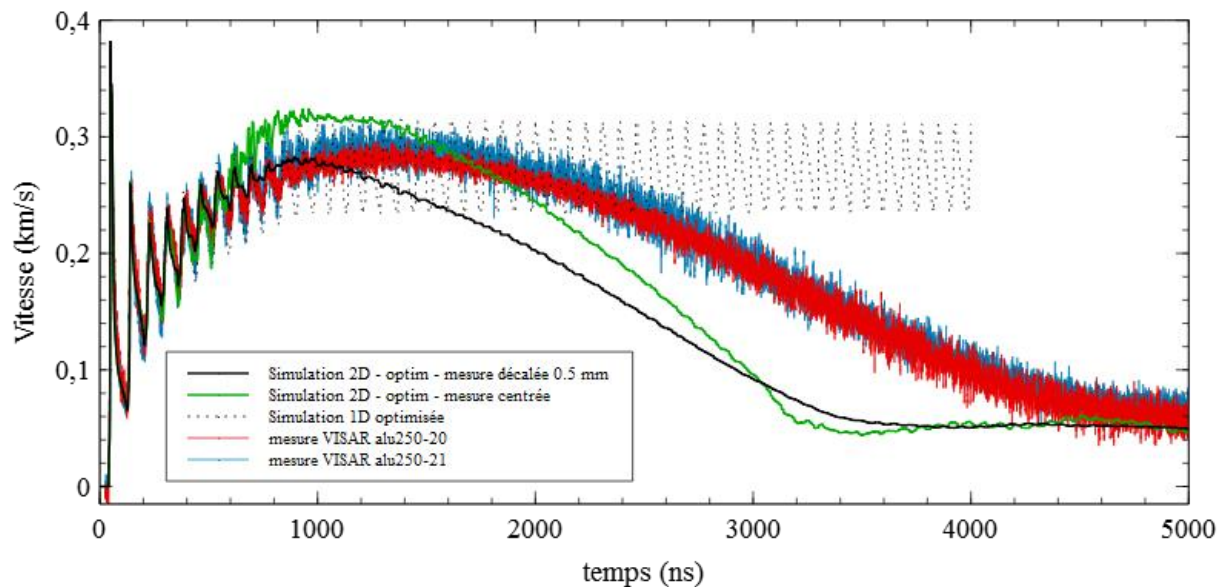


Figure 7 : comparaison de la vitesse de face arrière d'une cible Al 250 μ m irradiée à 6 GW cm^{-2} utilisant le profil de chargement optimisé, avec différentes variantes de simulation numérique : simulation 1D, simulation 2D et simulation 2D décalée (vitesse relevée à 0,5 mm de l'axe du chargement laser).

4 Conclusions

S'intéressant à la mise en forme des matériaux sous sollicitation dynamique, cette étude montre l'intérêt de prolonger les démarches de caractérisation et d'analyse de la réponse d'un matériau sous choc laser, en prenant en compte les phénomènes associés à l'interaction laser matière sur des temps caractéristiques bien plus longs que ceux considérés jusqu'à présent dans le domaine. Ceci est d'autant plus important qu'on va s'intéresser à des phénomènes comme la déformée résiduelle du matériau. La démarche présentée ici nécessite d'être complétée par une identification optimisée du profil de chargement, une évaluation parallèle (à défaut de pouvoir être couplée) de ce que la modélisation de l'interaction laser-matière pourrait fournir, une étude de l'influence des paramètres représentatifs du

comportement du matériau en dynamique rapide associé, éventuellement, à un changement de sa loi de comportement. En l'occurrence, partant d'un matériau bien référencé comme l'aluminium, cet aspect a pu être réduit dans le cadre de cette étude.

Références

- [1] J-P. Cuq-Lelandais, Etude du comportement dynamique de matériaux sous choc laser sub-picoseconde. Thèse de l'ENSMA, 2010
- [2] B.A. Gama, S.L. Lopatnikov, J.W. Gillespie, Hopkinson bar experimental technique: A critical review, *Appl. Mech. Rev.*, 57 (4) 223, 2004
- [3] P.S. Bulson, Explosive loading of engineering structures, Edited by E&FN Spon – London, ISBN 0-419-16930-X, 1997
- [4] R. Kinslow, High Velocity Impact Phenomena, Etided by New-York/ London: Acamdemic Press, ISBN 0-12408-950-X, 1971
- [5] L.R. Veesser, J.C. Solem, Studies of Laser-Driven Shock Waves in Aluminum, *Phys. Rev. Lett*, 40 1391, 1978
- [6] R. Ecault, L. Berthe, M. Boustie, F. Touchard, E. Lescoute, A. Sollier, P. Mercier, J. Benier, Observation of the shock wave propagation induced by a high-power laser irradiation into an epoxy material. *J. Phys. D: Applied Physics*, 46(23):235501, 2014
- [7] R. Ecault, Etude expérimentale et numérique du comportement dynamique de composites aéronautiques sous choc laser. Optimisation du test d'adhérence par ondes de choc sur les assemblages composites collés. Thèse de l'ENSMA, 2015
- [8] S. Bardy. Contrôle et optimisation du test d'adhérence par choc laser sur assemblages collés. Thèse de l'ENSAM, 2017
- [9] R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont, Physical study of laser produced plasma in confined geometry, *Journal of Applied Physics*, Vol. 68, n°2,775-784 (1990).
- [10] L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre, L. Tollier, E. Bartnicki, Shock waves from a water confined laser generated plasma, *Journal of Applied Physics*, Vol. 82, n°6, 2826-2832, 1997
- [11] Fabre G., Influence des propriétés optiques et de l'endommagement de barrières thermiques EB-PVD pour la mesure d'adhérence par choc laser LASAT-2D, thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013
- [12] D. Courapied. Etude de l'interaction laser matière en régime de confinement par eau avec deux impulsions laser. Application au test d'adhérence par choc laser. Thèse ENSAM, 2016
- [13] G.R. Johnson and W.H. Cook. A constitutive model and data for metals subjected to large strains high strain rates. In *Seventh International Symposium on Ballistics*, pages 541–547, The Hague, The Netherlands, April 19-21 1983.
- [14] Couturier S, Etude de nouveaux capteurs piézoélectriques à base de PVDF - application à la caractérisation de chocs brefs et intenses induits par impulsion laser, Thèse de l'Université de Poitiers, 1996