



**HAL**  
open science

## Vers la mise en forme des métaux sous choc laser

Marianne Beringhier, Michel Boustié, Didier Zagouri, Gautier Fourneret

► **To cite this version:**

Marianne Beringhier, Michel Boustié, Didier Zagouri, Gautier Fourneret. Vers la mise en forme des métaux sous choc laser. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. hal-03845523

**HAL Id: hal-03845523**

**<https://cnrs.hal.science/hal-03845523v1>**

Submitted on 27 Aug 2024

**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.

# Vers la mise en forme des métaux sous choc laser

M. BERINGHIER<sup>a</sup>, M. BOUSTIE<sup>a,b</sup>, D. ZAGOURI<sup>b</sup>, G. FOURNERET<sup>a</sup>

a. Institut Pprime, Université de Poitiers, ISAE-ENSMA, CNRS UPR 3346,  
michel.boustie@ensma.fr, marianne.beringhier@ensma.fr, gautier.fourneret@etu.isae-ensma.fr

b. SimChoc, didier.zagouri@simchoc.com

## Résumé

*L'irradiation de matériaux par un laser de puissance impulsif induit des sollicitations intenses et brèves. Sollicités dans des régimes à grande vitesse de déformation, il en résulte des déformations résiduelles inaccessibles dans des régimes quasi statiques. Cette technique, sans contact, présente un intérêt indéniable dans la mise en forme des matériaux. Sur la base d'une confrontation simulation-expérience d'une mesure de vitesse de surface libre reflétant la mise en forme par choc laser d'une feuille d'aluminium de 250 $\mu$ m d'épaisseur, un protocole d'optimisation par étapes du procédé de mise en forme par choc laser est proposé.*

*Un modèle numérique représentant cet essai est mis en place sous le logiciel Eléments Finis de dynamique rapide RADIOSS®. Les éléments principaux gouvernant le dialogue simulation-expérience du procédé résident dans la loi de comportement dynamique du matériau et dans la description du chargement mécanique correspondant à l'irradiation laser appliquée. Comme couramment répandu dans le domaine des chocs laser, le matériau suit une loi de comportement élastoplastique de type Johnson Cook dont les paramètres influent principalement les premiers aller-retours. Le profil de pression représentant le chargement laser influence non seulement les premiers aller-retours mais aussi la réponse du matériau sur des temps longs. Sur la base d'un socle établi d'un dialogue simulation-expérience limité à des temps inférieurs à la microseconde, la mise en forme requiert d'optimiser ce dialogue sur des échelles de temps beaucoup plus grandes d'environ une dizaine de  $\mu$ s. Un protocole d'optimisation des paramètres (loi de comportement et chargement) est ainsi proposé et mis en place via l'outil HYPERSTUDY® de la suite HYPERWORKS®. Il consiste en deux étapes : 1) simulation 1D sur les tous premiers aller-retours afin d'ajuster les paramètres matériau, ainsi que les coefficients de temps et de pression pour le chargement laser; 2) simulation 2D pour déterminer le profil de pression sur les temps longs. Ce protocole permet une restitution fidèle de la mesure de vitesse axiale reflétant la déformation de l'échantillon sous choc laser sur le cas étudié.*

## Abstract

*The irradiation of materials by a pulsed power laser induces intense and short duration stresses. Such high strain rates regimes result in materials residual deformations that are inaccessible in quasi-static regimes. This technique, without contact, is of undeniable interest in materials forming. Based on a simulation-experiment comparison of a free surface velocity measurement reflecting the laser shock forming of a 250  $\mu$ m thick aluminum sheet, a step-by-step optimization protocol for the shaping by laser shock is proposed.*

*A numerical model representing this test is set up under the Finite Elements software RADIOSS®. The main elements governing the simulation-experiment dialog of the process stands in the dynamic behavior law of the material and in the description of the mechanical loading corresponding to the applied laser irradiation. As commonly used in the field of laser shocks, the material follows an elastoplastic constitutive law of Johnson Cook type, the parameters of which mainly influence the first back and forth waves. The pressure profile representing the laser loading influences not only the back-and-forth waves but also the response of the material over long times. On the basis of an established base of a simulation-experiment dialogue limited to times of less than a microsecond, shaping requires optimizing this dialogue on much larger time scales of around ten  $\mu$ s. An optimization protocol (law of behavior and loading) is thus proposed and implemented via the HYPERSTUDY® tool of the HYPERWORKS® suite. It consists of two steps: 1) 1D simulation on the very first round trips in order to adjust the material parameters, as well as the time and pressure coefficients for the laser loading; 2) 2D simulation to determine the pressure profile over long periods. This protocol allows a faithful restitution of the axial velocity measurement reflecting the deformation of the sample under laser shock on the case studied.*

**Mots Clés** : choc laser, optimisation, mise en forme, comportement dynamique

## 1 Introduction

Depuis une trentaine d'années, un intérêt croissant dans le développement des applications potentielles du choc laser se ressent du fait des évolutions des technologies laser de puissance et de leur cadence, avec un engouement de la part des constructeurs et des intégrateurs laser seulement depuis une dizaine d'années. S'agissant de lasers impulsions brefs et intenses, l'irradiation concentrée sur quelques  $mm$  de diamètre en surface d'un matériau crée une fine couche de plasma dont l'éjection induit par réaction une impulsion mécanique se propageant dans l'édifice sollicité. Parmi les applications trouvant désormais un déploiement industriel, utilisant l'effet de compression dû à la propagation du choc s'atténuant en profondeur, on trouve le LSP (grenailage laser induisant du durcissement superficiel par contraintes résiduelles induites), la compaction superficielle [1]. Une autre application en plein essor utilise le phénomène de traction induit par les croisements d'ondes de détentes qui peuvent être avantageusement localisées pour effectuer un contrôle de qualité d'adhérence d'assemblages de différentes compositions (collages métalliques, composites, mixtes, revêtements projetés) [2]. La maîtrise de tous ces procédés passe par une bonne fiabilité dans la modélisation numérique du chargement induit par l'irradiation laser et par sa propagation dans les matériaux considérés. Ainsi, l'aluminium est très souvent utilisé comme matériau étalon et rajouté comme ablateur pour un meilleur contrôle du chargement mécanique induit. Pour les applications précitées, la validation des protocoles simulation-expériences s'arrêtent légitimement très souvent à quelques aller-retours d'onde dans l'échantillon, temps suffisant pendant lequel se produit en général l'effet observé [3, 4].

S'agissant de l'application du choc laser à la mise en forme de métaux avec l'originalité de pouvoir réaliser des motifs de petites dimensions [5, 6], des travaux ont été effectués sur la mise en forme de pièces de quelques  $mm$  de diamètre et d'épaisseur pour l'impression de motifs très fins (inférieur au  $mm$ ) sur la surface libre [7]. Ces travaux ont montré qu'il fallait augmenter l'énergie du laser afin de faire des motifs plus fins. Une vitesse de déformation élevée permet d'améliorer la formabilité du matériau, l'efficacité du procédé et permet un meilleur remplissage des cavités du moule. C'est pour cela que l'utilisation d'un laser de puissance pour le formage [8] est très intéressante au vu de la vitesse de déformation très importante qui en résulte.

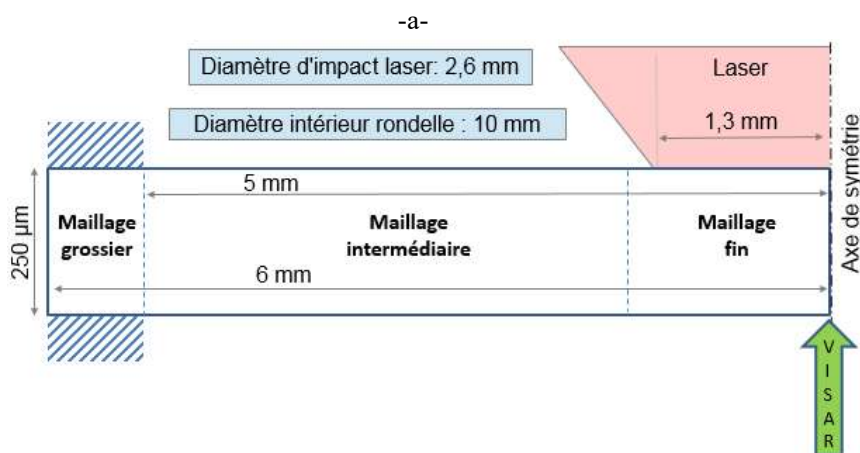
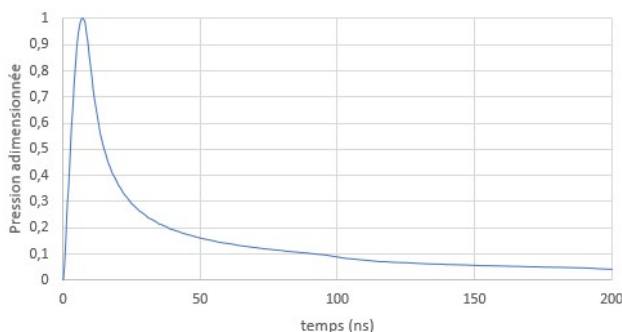
Afin de modéliser au plus près cet effet [9], il convient de s'intéresser au dialogue simulation-expériences sur des temps beaucoup plus longs (de l'ordre de la dizaine de microsecondes) que ceux

pratiqués généralement pour les applications usuelles des chocs laser (de l'ordre de quelques centaines de nanosecondes).

Sur la base d'une confrontation simulation-expérience d'une mesure de vitesse de surface libre reflétant la mise en forme par choc laser d'une feuille d'aluminium de 250 $\mu\text{m}$  d'épaisseur, un protocole d'optimisation par étapes de la simulation numérique du procédé de mise en forme par choc laser est proposé.

## 2 Mise en forme par choc laser

Afin de pouvoir prédire les déformées des pièces soumises à des chocs laser en limitant le nombre d'essais expérimentaux, la modélisation numérique fiabilisée du procédé pourrait être un atout majeur de développement. Des travaux précédents [10] ont montré (cf Figure 1-a) que la simulation numérique de mesure de vitesse de face arrière d'une cible d'aluminium de 250 $\mu\text{m}$  pouvait être restituée correctement par ajustement de la modélisation numérique mais seulement sur 1/5<sup>ème</sup> du signal complet (jusqu'à la microseconde environ), ne restituant ainsi que les premières phases de la déformation associée.



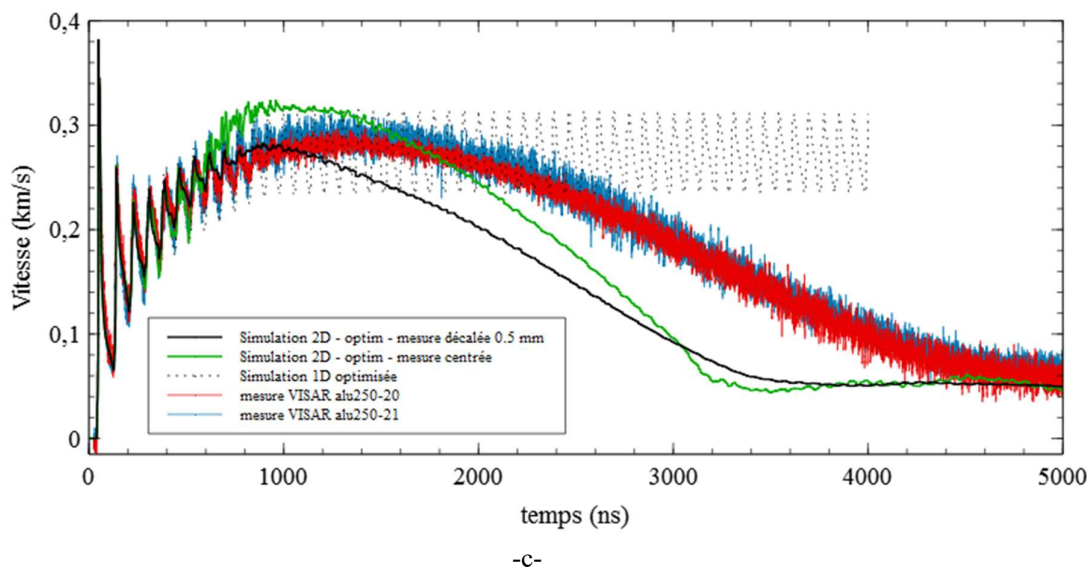


Figure 1 : a) profil de pression adimensionnée obtenu par simulation ESTHER pour une irradiation laser confinée eau d'aluminium à  $2\omega$  de durée à mi-hauteur 5.2ns b) schéma de mise en données numériques fixant les CL et CI c) comparaison de la vitesse de face arrière d'une cible de 250 $\mu$ m Al 99% irradiée à 6GW/cm<sup>2</sup> -5,2ns à  $2\omega$  sous confinement eau (laser Saga du CDM) et restitutions partielles de la mesure par simulation numérique Radioss [10]

Dans la perspective d'améliorer la restitution numérique de cette mesure de vitesse sur des temps plus longs (jusqu'à la dizaine de microsecondes) et par conséquent de la déformation correspondante, l'outil d'optimisation HYPERSTUDY® de la suite d'HYPERWORKS® (Altair Engineering) a été mis en œuvre dans cette étude. L'optimisation consiste en une minimisation au sens des moindres carrés de l'écart entre la simulation numérique et l'expérience. L'optimum est déterminé en utilisant une méthode de recherche globale, plusieurs minima globaux pouvant être présents. Les hypothèses suivantes ont été postulées :

- Les paramètres matériaux sont supposés constants au cours de l'essai.
- La courbe de pression provenant du code de calcul interaction laser/matière ESTHER [4, 11] développé au CEA peut avoir une échelle de temps ( $X_{scale}$ ) et une pression maximale différente ( $Y_{scale}$ ) car l'intégration des variations des conditions expérimentales (homogénéité du faisceau laser, « légères » variations de durée, énergie du laser) est imprécise.
- La courbe de pression du code ESTHER n'est valide que pour une centaine de nanosecondes car il s'agit d'un modèle 1D. La pression entre 100ns et 250ns pourra donc être légèrement modifiée pour que la simulation corresponde au mieux avec l'essai. Au-delà de 250ns il sera possible de se séparer du profil de pression initial.

Suite à ces hypothèses, l'optimisation est effectuée en 2 étapes :

- Etape 1 : les paramètres matériaux ainsi que l'échelle de temps et le facteur multiplicatif en utilisant le profil de pression provenant d'ESTHER sont optimisés.
- Etape 2 : une allure de la pression sur la face avant pour les temps longs est déterminée.

### 3 Optimisation des paramètres de la loi de comportement.

La loi de comportement couramment utilisée pour simuler les chocs laser est la loi de Johnson-Cook ( cf. équation 1) sans effet de température dans les domaines de flux laser pratiqués ici, comme dans des travaux similaires [12, 13].

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + c \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{fus} - T_0}\right)^m\right) \quad \text{Eq. 1}$$

La première étape de l'optimisation consiste à choisir des paramètres matériaux entre les bornes reportées tableau 1, établies selon la limite de disparités relevées pour l'aluminium dans plusieurs références du domaine. De plus, le profil de pression peut être modifié avec l'aide de plusieurs paramètres. En notant  $Padim$  et  $Tadim$  ( $ns$ ) la pression adimensionnée et le temps original du profil de pression, le logiciel HyperMesh permet d'appliquer de nouvelles échelles de pression et de temps :

$$T = Tadim * Xscale + Xoffset$$

$$P = Padim * Yscale + Yoffset$$

avec  $T$  ( $ns$ ) le nouveau temps,  $Xscale$  le coefficient multiplicatif de l'échelle de temps,  $Xoffset$  ( $ns$ ) le décalage temporel pour compenser un décalage de mesure,  $P$  ( $GPa$ ) la contrainte suivant  $Z$  appliquée sur la cible,  $Yscale$  ( $GPa$ ) le facteur multiplicatif de la pression et  $Yoffset$  ( $GPa$ ) le décalage permanent de la pression (non utilisé dans cette étude).

Ainsi les paramètres à optimiser sont :

- pour le matériau (cf. Equation Johnson Cook),  $E$  ( $GPa$ ) : le module d'Young,  $A$  ( $GPa$ ) : la limite élastique,  $B$  ( $GPa$ ) : le facteur d'écroutissage,  $n$  : l'exposant d'écroutissage,  $c$  : le coefficient de la vitesse de déformation
- pour le chargement,  $Yscale$  ( $GPa$ ) : l'amplitude en pression du signal de pression,  $Xscale$  : l'amplitude en temps du signal de pression,  $Xoffset$  ( $ns$ ) : le décalage temporel du signal de pression

HYPERSTUDY® est utilisé pour cette optimisation ; ce logiciel provient de la même suite que les logiciels HYPERMESH® ou RADIOSS® ce qui facilite l'échange entre les différents logiciels. L'optimisation requiert des bornes de variations pour les différents paramètres, le choix d'une méthode d'optimisation ainsi que des objectifs pour l'optimisation.

Plusieurs algorithmes d'optimisation sont disponibles dans HYPERSTUDY®, tous consistent en une minimisation par la méthode des moindres carrés entre le résultat et les objectifs. Au vu du grand nombre de paramètres, un algorithme de recherche global est préféré pour trouver l'optimum global et pas un optimum local. Deux algorithmes globaux sont disponibles, GRSM (Global Response Search Method) et GA (Genetic Algorithm). D'après la documentation HYPERWORKS®, l'algorithme GRSM est plus rapide et plus précis que l'algorithme génétique. Cet algorithme est donc choisi pour cette optimisation. Afin d'accélérer le processus d'optimisation, l'identification des paramètres matériaux est d'abord faite sur un modèle 1D jusqu'à 500ns. Le profil de pression utilisé est le profil provenant du code de calcul ESTHER (cf figure 1-c).

Concernant le choix des points d'optimisation, plusieurs « uplets » de points ont été testés ; l'« uplet » choisi est représenté Figure 2. Les points situés dans la première détente plastique permettent de bien caractériser les paramètres matériaux, les points suivants permettent de bien optimiser les différentes échelles sur le profil de pression. Suite aux différents tests, aucun point d'optimisation n'a été choisi sur le précurseur élastique. En effet, si ce précurseur est bien modélisé, alors le reste du signal est trop différent du signal VISAR. Le résultat de l'optimisation est représenté Figure 2 et les paramètres optimisés sont regroupés dans le Tableau 1. Les paramètres optimisés permettent une meilleure correspondance entre la mesure de VISAR et le résultat du modèle. Le temps entre chaque maximum

de vitesse correspond plutôt bien avec le signal expérimental (écart  $< 3ns$ ) et les trois premiers pics de vitesse sont très bien retranscrits par le modèle (Ecart relatif maximal de 12% dans la première détente).

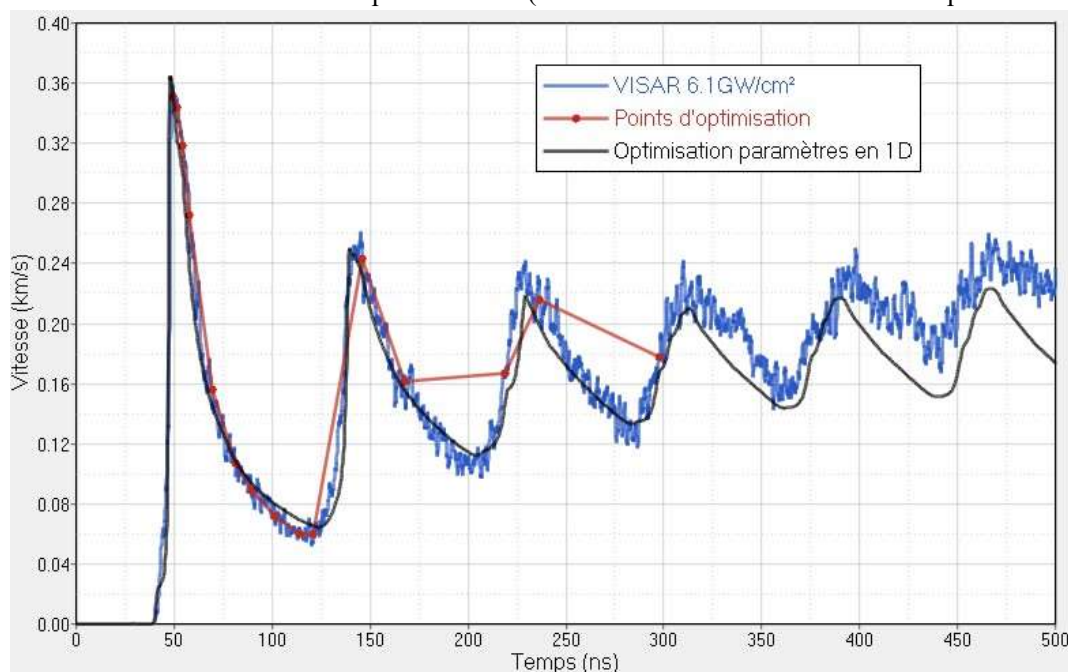


Figure 2 : Points d'optimisation choisis sur le signal VISAR et résultat de l'optimisation sur les paramètres avec le modèle 1D

Les valeurs des coefficients obtenues par l'optimisation sont cohérentes avec les résultats de la bibliographie (Tableau 1). La limite élastique  $A$  (GPa) est cependant plus faible que les différentes valeurs bibliographiques. Cependant, au vu de la dispersion des valeurs, ce résultat ne semble pas aberrant.

Le profil de pression issu d'ESTHER donne une bonne prédiction pour les trois premiers pics de vitesse. L'allure des pics suivants, provenant d'une simulation 1D, ne peut pas être discutée compte tenu de l'éloignement de l'hypothèse 1D. Cependant les valeurs restent proches de l'essai mais s'éloignent au fil du temps. Le profil ESTHER n'étant valide que durant  $100ns$ , le profil de pression est maintenant modifié pour ajuster le modèle et avoir ainsi une meilleure correspondance avec l'essai aux temps longs.

Coefficients	Valeur classique	Borne min	Borne max	Optimum
$\rho_0$ ( $pg/\mu m^3$ )	2,7	-	-	-
$E$ (GPa)	70,4	65	75	68.02
$\nu$	0,33	-	-	-
$A$ (GPa)	0,12	0,07	0,21	0.074
$B$ (GPa)	0,426	0,300	0,600	0.342
$n$	0,34	0,200	0,400	0.353
$c$	0,015	0,010	0,020	0.014
$\dot{\epsilon}_0$ ( $ns^{-1}$ )	1e-9	-	-	-
$m$	1	-	-	-
$T_{fus}$ (K)	775	-	-	-

$\rho_0 C_p$ (nJ. K <sup>-1</sup> .µm <sup>-3</sup> )	0,002422	-	-	-
$Y_{scale}$ (GPa)	4,0	3,6	4,4	4.04
$X_{scale}$	0,8	0,6	1,2	0.71
$X_{offset}$ (ns)	0,7	-2,0	2,0	0.26

Tableau 1 : Bornes des différents paramètres valeurs classiques utilisées dans l'optimisation de la simulation numérique et valeurs optimales déterminées via HYPERSTUDY®

## 4 Optimisation du chargement en pression

Les paramètres matériaux ainsi que les coefficients du profil de pression étant désormais fixés, il s'agit d'ajuster le profil de pression (étape 2 de l'optimisation).

Le logiciel HYPERSTUDY® est à nouveau utilisé pour effectuer cette optimisation sur la base d'un modèle 2D axisymétrique décrit Figure 1-b. Comme l'influence de la pression est monotone, un algorithme de recherche d'optimum local est suffisant. L'algorithme qui est retenu est l'algorithme ARSM (Adaptative Response Surface Method) ; il est très rapide avec une précision correcte. L'algorithme consiste à faire varier tous les paramètres, ensuite par régression linéaire une surface de réponse qui admet un minimum est déterminée. Le calcul numérique avec ces nouveaux paramètres est effectué afin de vérifier si ce point est bien l'optimum. Si ce n'est pas l'optimum alors une autre surface est créée en utilisant ce nouveau point. Ce processus se répète jusqu'à obtenir une variation très faible entre deux optimums (<1%).

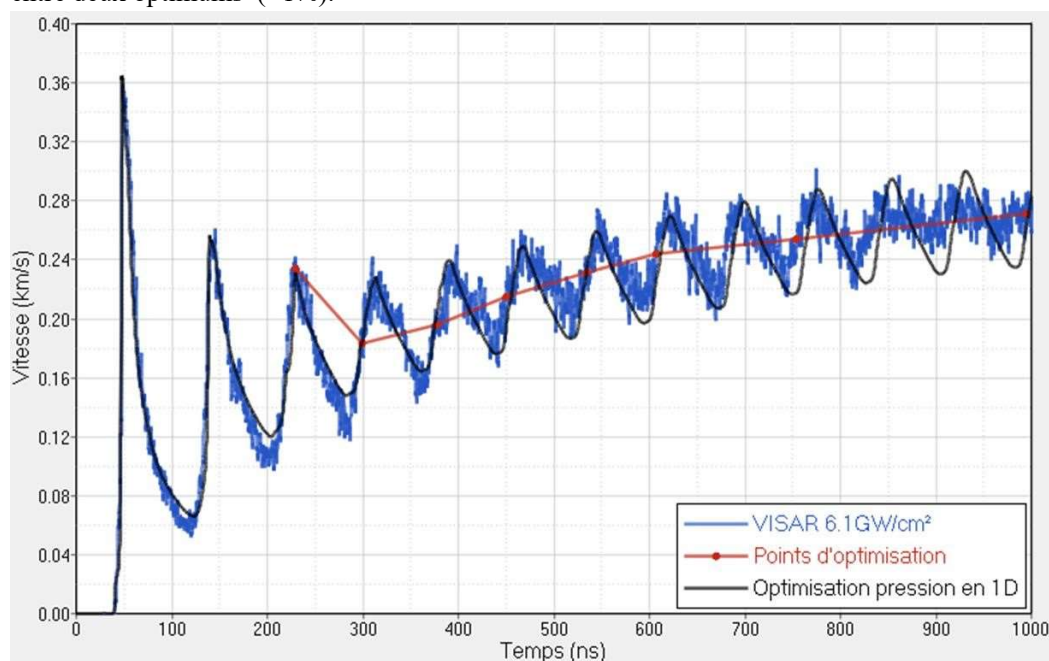


Figure 3 : Points d'optimisation choisis sur le signal VISAR et résultat de l'optimisation sur la pression avec le modèle 1D

Le profil ESTHER adimensionné peut être modifié au-delà de 100ns pour que la simulation numérique corresponde mieux à l'essai. Les points d'optimisations sont choisis cette fois au milieu des pics expérimentaux (cf. Figure 3) car le signal 1D ne correspond avec le signal 2D que pour une allure moyennée. Le résultat de cette optimisation est représenté Figure 3. L'allure du signal 1D est très proche



du signal expérimental. La modélisation 2D donnant des résultats complètement différents du 1D au-delà de 1000ns (cf *Figure 1-a*), l'optimisation sur les temps plus longs est faite avec un modèle 2D en intervenant sur la queue de détente du chargement en pression à partir d'une microseconde.

Après plusieurs itérations, le profil de pression qui est gardé est représenté *Figure 4 (a et b)*. Le résultat de cette optimisation sur le signal de vitesse dans son ensemble est représenté *Figure 4-c*. En comparaison des résultats des premières simulations *Figure 1-a*, la mise en œuvre du protocole énoncé permet d'obtenir une bien meilleure concordance entre le signal de vitesse mesuré et simulé. L'intégration de ces signaux de vitesse permet d'obtenir la flèche de la déformée avec un écart relatif entre simulation et expérience réduit à 1,4% au lieu de 12% sans mise en œuvre de ce protocole.

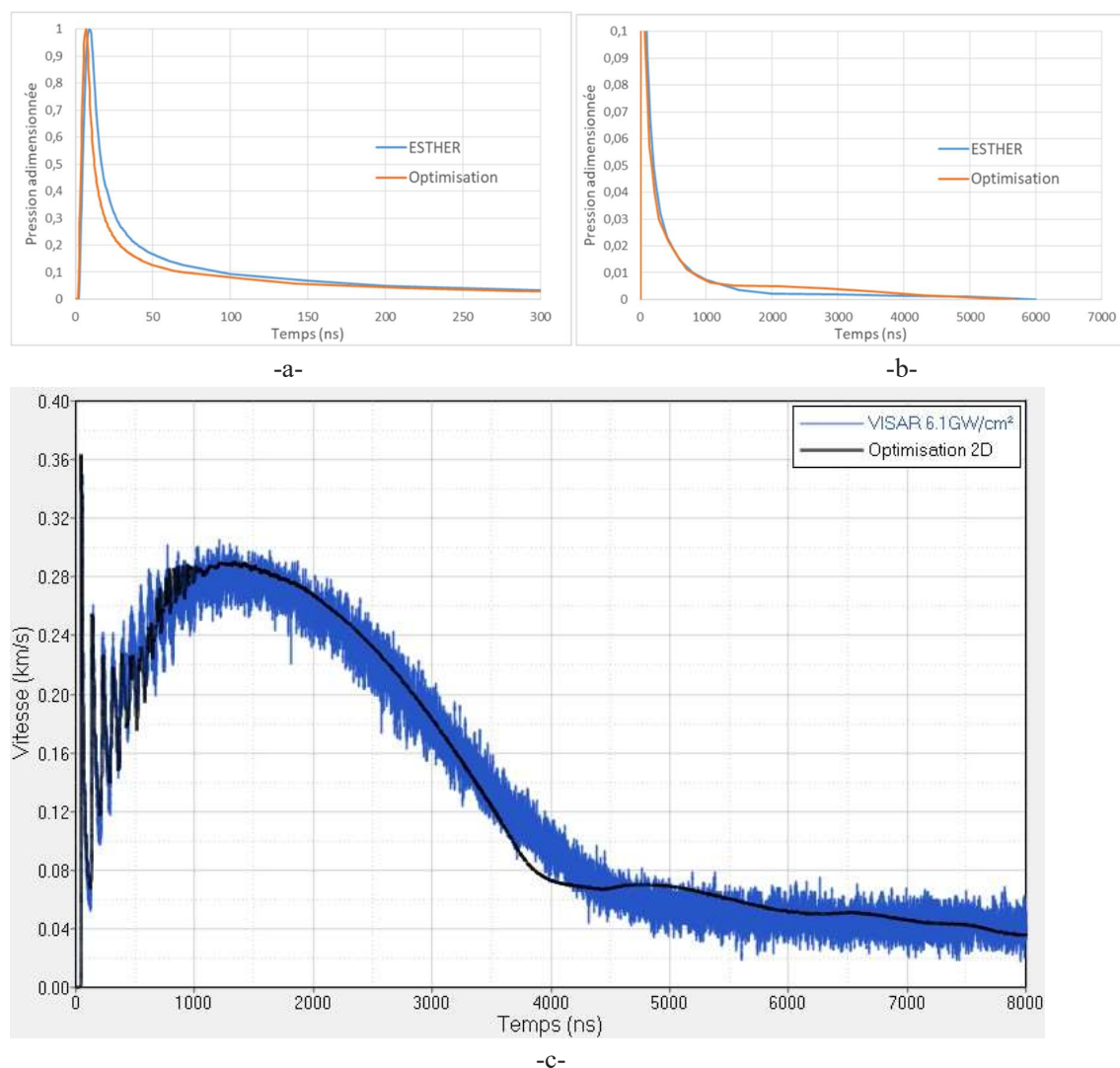


Figure 4 : Comparaison entre le profil de pression ESTHER et le profil de pression après optimisation. (a) pour les temps courts, (b) pour les temps longs et (c) comparaison du signal VISAR et de la simulation avec le profil de pression et loi de comportement optimisés

## 5 Conclusion

Sur la base d'une expérience de mise en forme de feuille métallique sous choc laser, ce travail apporte une contribution pour l'optimisation du dialogue simulation-expérience sur la base de la restitution de la mesure de vitesse axiale (flèche de la déformée) à l'opposé du chargement. Une optimisation de la simulation numérique en suivant un protocole en deux temps est proposée et mise en œuvre sur la mesure considérée. Afin de pouvoir être complètement validé, la robustesse de cette procédure nécessitera d'être éprouvée sur une base expérimentale de conditions étendues, tant au niveau du chargement laser que des caractéristiques de la cible. Une fois mise au point sur un matériau modèle comme l'aluminium, elle pourrait être étendue à d'autres matériaux. Au-delà de l'application visant la mise en forme des matériaux à petite échelle, ce principe de dialogue simulation-expérience présente un intérêt dans l'aide à la validation des modélisations de l'interaction laser matière à des temps longs, au-delà des temps caractéristiques de l'impulsion principale.

## Références

- [1] D. Sokol, A. Clauer, R. Ravindranath, J. Dulaney, D. Lahrman, David. (2006) Applications of Laser Peening to Titanium Alloys. ASME/JSME 2004 Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Diego, CA, July 25-29, 2004.
- [2] L. Berthe, M. Arrigoni, M. Boustie, J. P. Cuq-Lelandais, C. Broussillou, G. Fabre, M. Jeandin, V. Guipont & M. Nivard, State-of-the-art laser adhesion test (LASAT), *Nondestructive Testing and Evaluation*, 26:3-4, 2011, 303-317
- [3] J-P. Cuq-Lelandais, Etude du comportement dynamique de matériaux sous choc laser subpicoseconde, Thèse de l'ISAE-ENSMA, 2010
- [4] S. Bardy, B. Aubert, L. Berthe, P. Combis, D. Hébert, E. Lescoute, J.-L. Rullier, L. Videau, Numerical study of laser ablation on aluminum for shock-wave applications: development of a suitable model by comparison with recent experiments, *Opt. Eng.* 56 (1) 011014 , 2016
- [5] H. Liu, S. Xianqing, S. Zongbao, L. Cong., S. Chaofei, L. Liyin, G. Shuai., M. Youjuan, X. Wang., The size effect on deformation behavior in microscale laser shock flexible drawing, *Optics and Laser Technology*, 86, 2016, 93-102.
- [6] F. Liu, F., H. Liu, C. Jiang, Y. Ma, X. Wang, Experimental and Numerical Investigations of a Novel Laser Impact Liquid Flexible Microforming Process, *Metals*, 8, 2018, 599
- [7] K. Wang, H. Liu, Y. Ma, J. Lu, X. Wang, J. Lu, X. Gu, H. Zhang. Laser shock micro-bulk forming: numerical simulation and experimental research, *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, 2021, pp 1273-1286
- [8] X. Wang, D. Zhang, C. Gu, Z. Shen, Y. Ma, Y. Gu, T. Qiu, H. Liu, Micro scale laser shock forming of pure copper and titanium sheet with forming/blanking compound die, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 67, 2015, pp 83-93
- [9] G. Avriilaud, G. Mazars, E. Cantergiani, F. Beguet, J.P. Cuq-Lelandais, J. Deroy, Examples of How Increased Formability through High Strain Rates Can Be Used in Electro-Hydraulic Forming and Electromagnetic Forming Industrial Applications, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 5 (3), 2021, 96
- [10] F. Delloro, D. Zagouri, M. Jeandin, M. Boustie, S. Boyer, M. Beringhier., Nanosecond pulsed laser induced shocks at the microsecond time scale: VISAR measurements and simulations, *Congrès Français de Mécanique 2019*, Brest, Aout 2019
- [11] J.P. Colombier. Théorie et simulation de l'interaction des impulsions laser ultracourtes à flux modéré avec un solide métallique. Thèse de l'Université Jean Monnet de Saint Etienne, 2005.

- [12] C. Le Bras, A. Rondepierre, R. Seddik, M. Scius-Bertrand, Y. Rouchasse, L. Videau, B. Fayolle, M. Gervais, L. Morin, S. Valadon, R. Ecault, D. Furfari, L. Berthe, Laser Shock Peening: Toward the Use of Pliable Solid Polymers for Confinement, *Metals*, 9 (7), 793, 2019
- [13] P. Mylavarapu, C. Bhat, M. Kumar R. Perla, K. Banerjee, K. Gopinath, T. Jayakumar, Identification of critical material thickness for eliminating back reflected shockwaves in laser shock peening – A numerical study, *Optics & Laser Technology*, vol. 142, n°107217, 2021