Simulation laser d'impacts de particules de très grande vitesse

J.-P. Bibring, F. Cottet, M. Hallouin, Y. Langevin, J.-P. Romain

▶ **To cite this version:**

J.-P. Bibring, F. Cottet, M. Hallouin, Y. Langevin, J.-P. Romain. Simulation laser d'impacts de particules de très grande vitesse. Journal de Physique Lettres, 1983, 44 (5), pp.189-194. 10.1051/jphyslet:01983004405018900 . jpa-00232179

HAL Id: jpa-00232179
https://hal.science/jpa-00232179

Submitted on 4 Feb 2008

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.

Classification
Physics Abstracts
52.40H — 62.50

Simulation laser d'impacts de particules de très grande vitesse

J.-P. Bibring, F. Cottet (*), M. Hallouin (*), Y. Langevin et J.-P. Romain (*)

Laboratoire René-Bernas, 91406 Orsay, France

(*) E.N.S.M.A., 86034 Poitiers et GRECO I.L.M., Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France

(*Reçu le 10 décembre 1982, accepté le 17 janvier 1983*)

Résumé. — Le laser au néodyme du GRECO I.L.M. délivrant des impulsions de l'ordre de 100 J en quelques ns, nous a permis de simuler des impacts de micrométéorites silicatées de quelques dixièmes de μg, de vitesse comprise entre 5 et 45 km/s, sur une cible d'aluminium. Les cratères produits dans la cible sont hémisphériques, et le rapport K_m, de la masse éjectée sur la masse de la particule incidente simulée, varie avec la vitesse d'impact V_p selon la loi $K_m = 1{,}17\ V_p^{1{,}52}$.

Abstract. — Silicated micrometeorites (mass : 1/10 μg) impacting aluminium target are simulated with a neodyme pulsed laser, producing a maximum laser pulse energy of 100 in a few ns. The simulated micrometeorites velocities are in the range of 5 km/s-45 km/s ; the mass loss ratio, K_m, is related to particle velocity V_p by $K_m = 1.17\ V_p^{1.52}$.

1. **Introduction.** — Les véhicules spatiaux subissent des impacts de micrométéorites dont la vitesse peut atteindre 80 km/s et dont la masse se trouve essentiellement dans le domaine 10^{-5} à 10^{-10} g [1, 2]. C'est en particulier le cas des futures sondes qui vont réaliser un survol à moins de 20 000 km de la comète de Halley, lors de son prochain passage au périhélie en 1986. Qu'il s'agisse de se protéger contre ces impacts ou de les utiliser pour en déduire certaines propriétés des grains cométaires, des simulations en laboratoire sont nécessaires. Les dispositifs expérimentaux actuels ne permettent pas d'atteindre des vitesses aussi grandes. Les grains de quelques micromètres sont accélérés au plus à une vingtaine de km/s. L'utilisation d'un laser pulsé de haute puissance pour simuler les impacts de grains, proposée par Pirri [3] et Nebolsine [4], pourrait permettre d'explorer le domaine des vitesses supérieures à 30 km/s. Nous avons effectué des tirs laser sur des cibles d'aluminium, à l'aide du laser à néodyme de haute énergie du GRECO I.L.M. à Palaiseau, afin de simuler l'impact d'une micrométéorite silicatée sur un blindage d'aluminium. Le domaine d'énergie accessible et la focalisation de ce laser nous ont permis d'atteindre des vitesses simulées de 5 à 45 km/s pour des particules d'une masse de l'ordre du dixième de μg.

2. **Modèle de simulation par laser pulsé d'un impact de particule de grande vitesse.** — Un impact laser, tout comme un impact de particule de grande vitesse, délivre à la surface de la cible une

Article published online by EDP Sciences and available at http://dx.doi.org/10.1051/jphyslet:01983004405018900

grande quantité de mouvement et une grande quantité d'énergie en un temps extrêmement court. Une onde de choc de grande amplitude (entre quelques centaines de kb et plusieurs Mb) se propage alors dans la cible et s'y amortit progressivement. Selon la pression maximale atteinte localement, le matériau se volatilise, fond ou se fracture, ce qui provoque la formation d'un cratère autour du point d'impact.

Le principe de la simulation consiste à définir les caractéristiques d'une impulsion laser (durée t de l'impulsion à mi-hauteur, énergie totale E, diamètre D de la tache focale) induisant dans la cible une onde de choc similaire à celle produite par un projectile de diamètre D_p, de longueur L_p (dans le cas d'un projectile cylindrique), de masse M_p et de vitesse V_p données. Si les deux processus créent des champs d'écoulement et de pression identiques, les déformations résultantes de la cible, et en particulier les dimensions du cratère, seront elles aussi identiques [5]. Les trois conditions à satisfaire sont les suivantes :

1) la pression initiale P induite par l'impulsion laser doit être égale à celle engendrée par l'impact du projectile,

2) le diamètre D de la tache focale doit être égal au diamètre D_p du projectile,

3) la durée t de l'impulsion doit être telle que la quantité de mouvement transférée par l'impact laser à la cible soit égale à la quantité de mouvement du projectile :

$$Pt = \rho_0 L_p V_p , \tag{1}$$

où ρ_0 est la densité initiale du projectile.

Pour une vitesse V_p donnée, la pression de choc P induite à la surface de la cible se déduit des courbes de Hugoniot des matériaux constitutifs de la cible et du projectile. Dans le cas où ces matériaux sont identiques, le choc étant supposé monodimensionnel plan, la pression P s'obtient à partir de la relation :

$$P = \rho_0(a + bV_p/2)\, V_p/2 , \tag{2}$$

où a et b sont les coefficients de la relation linéaire entre vitesse de choc u et vitesse matérielle u_m :

$$u = a + bu_m . \tag{3}$$

Dans le cas de l'aluminium, cette linéarité persiste jusqu'à des pressions très élevées [6], les coefficients a et b ayant pour valeur 5,386 $km.s^{-1}$ et 1,339 respectivement. Nous considérerons que l'impact d'une micrométéorite silicatée sur une cible d'aluminium peut être assimilé à celui d'un projectile d'aluminium, les densités étant comparables, et les courbes de Hugoniot étant voisines à haute pression.

Dans le cas des tirs laser que nous avons effectués, une épaisseur de matière de l'ordre du μm est transformée en un plasma dense. La plus grande partie de l'énergie laser est transformée en énergie thermique du plasma. Celui-ci entre en expansion à grande vitesse, et soumet la cible à une pression P approximativement constante pendant la durée de l'impulsion, et liée au flux incident du laser, I. Cette pression peut être déduite par une relation théorique $P(I)$, qui donne de bons résultats pour les flux compris entre 10^{12} et 10^{15} W/cm^2 [7] :

$$P = 5{,}5 \times 10^{-9} (\alpha I)^{2/3} . \tag{4}$$

P étant exprimé en Mb, et I en W/cm^2, et α représentant le taux d'absorption, qui dépend lui-même de I [8] : il varie de $\sim$ 80 % pour $I = 10^{12}$ $W.cm^{-2}$ à $\sim$ 50 % pour $I = 10^{14}$ $W.cm^{-2}$. Cette relation constitue vraisemblablement une limite supérieure, car elle ne tient pas compte des effets bidimensionnels, importants dans le cas d'impulsions « longues » (quelques ns) et très focalisées (< 100 μm).

Sur la base de ce modèle, les caractéristiques (D_p, L_p, V_p) du projectile dont l'impact est simulé

par un tir laser de durée t, d'énergie totale E, et dont la tache focale a un diamètre D sont évaluées de la manière suivante :

— le diamètre D_p du projectile est assimilé à D,

— pour déterminer la vitesse V_p, nous calculons tout d'abord la pression P à l'aide de la relation (4), le flux I étant égal à $4E/(\pi t D^2)$. On peut alors déduire V_p à partir de la relation (2),

— L_p s'obtient alors aisément à partir de la relation (1).

$$L_p = 100 \frac{P \times \tau}{\rho_0 V_p}, \tag{5}$$

L_p étant exprimée en micromètres.

La figure 1 donne le flux incident I et la durée de l'impulsion laser t en fonction de la vitesse V_p de la particule que l'on désire simuler, celle-ci ayant un diamètre D_p de 90 μm et une longueur L_p de 90 μm ou de 45 μm.

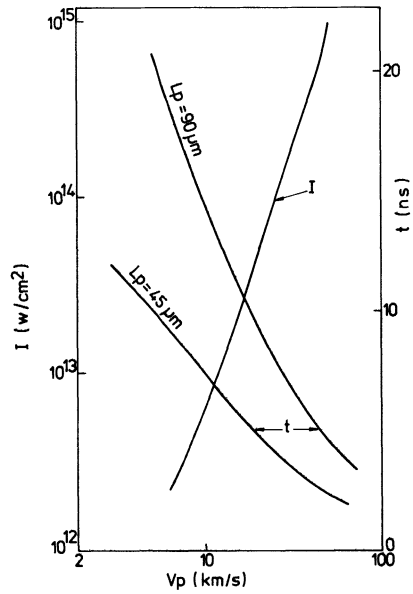

Fig. 1. — Flux incident I et durée t à mi-hauteur de l'impulsion laser en fonction de la vitesse V_p de la particule simulée, celle-ci ayant un diamètre de 90 μm et une longueur de 90 μm ou 45 μm.

[Laser requirements for hypervelocity impact simulation with a 90 μm laser beam diameter.]

3. **Résultats expérimentaux.** — Le laser utilisé est le laser I.L.M. de l'école polytechnique. Il s'agit d'un laser au néodyme capable de délivrer des impulsions de plus de 100 J à une longueur d'onde de 1,06 μm. Le diamètre de la tache focale est déterminé en interposant une série de filtres de densité optique croissante, ce qui permet d'établir la répartition de l'énergie déposée dans le plan focal. La précision sur la mesure de D est de 10 %. Ce diamètre était de 90 μm pour une série de tirs d'énergie 60 J pendant 2,5 ns, alors qu'il atteignait 110 μm pour une série de tirs d'énergie 15 J pendant 4 ns. Nous avons donc adopté ces deux valeurs de D, qui correspondent à la focalisation maximale, pour les tirs à « haute » et « basse » énergie respectivement. Nous avons également effectué quelques tirs défocalisés, le diamètre de la tache focale étant alors de 175 μm.

Tableau I. — *Résultats expérimentaux sur une cible épaisse en aluminium.*

[Experimental results on thick aluminium target.]

Energie J	Durée t ns	D µm	P_c µm	D_c µm	Flux I 10^{14} W/cm^2	P Mb	V_p km/s	L_p µm	M_p µg	K_m
90	2,3	90	350	775	6,137	22,08	45,43	41	0,711	420,2
69	3,06	90	370	710	3,544	16,36	38,59	47	0,825	321,3
64	2,5	90	340	660	4,024	17,59	40,16	40	0,697	302,2
63	2,5	90	350	650	3,961	17,44	39,96	40	0,694	302,9
61	3,06	90	360	670	3,134	15,22	37,09	46	0,799	287,7
55	3,06	90	330	680	2,825	14,31	35,86	45	0,777	279,3
47	3,06	90	330	625	2,414	13,01	34,02	43	0,744	246,2
40	3,06	90	320	610	2,055	11,78	32,21	41	0,712	237,7
87	2,3	175	427	745	1,573	9,97	29,34	29	1,879	179,3
29	3,06	110	275	585	0,997	7,46	24,91	34	0,871	153,6
29	4,13	110	310	605	0,739	6,62	23,27	43	1,117	144,4
20	4,13	110	300	550	0,510	5,51	20,93	40	1,034	124,8
16	4,13	110	280	500	0,408	4,88	19,49	38	0,982	101,3
11	4,13	110	235	475	0,280	3,92	17,14	35	0,898	83,9
28	21,8	175	390	720	0,054	1,43	9,15	125	8,193	35,1
5	25	175	210	456	0,008	0,43	3,95	100	6,553	9,5

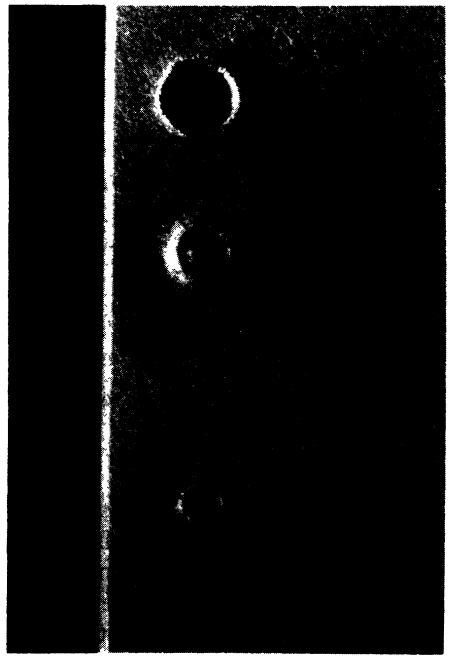

Fig. 2. — Microphotographies de cratères formés par des impacts laser d'énergie croissante dans une feuille d'aluminium de 1 mm d'épaisseur.

[Microphotography of craters produced by increasing power laser on an aluminium target (thickness 1 mm).]

Les cibles étaient constituées d'une feuille d'aluminium d'une épaisseur de 1 mm.

Pour chaque impact laser, nous avons mesuré par microscopie optique le diamètre D_c et la profondeur P_c du cratère formé, ce qui nous a permis d'évaluer la masse M_c expulsée du cratère. Pour chaque tir, nous avons déterminé les caractéristiques D_p, L_p, et donc la masse M_p du projectile simulé (supposé de densité 2,7) ainsi que sa vitesse V_p.

L'ensemble des données obtenues est présenté sur le tableau I. On constate tout d'abord que les cratères formés sont quasi hémisphériques, dans tout le domaine d'énergie exploré. Cette forme correspond bien à celle prévue si l'onde de choc formée se dissipe dans un milieu homogène. En second lieu, ces cratères présentent le plus souvent des collerettes qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de μm de haut (voir Fig. 2). La profondeur des cratères a été mesurée à partir du niveau de référence constitué par la face avant de la cible à l'extérieur de cette collerette.

Si l'on admet la validité du modèle que nous avons utilisé, ces tirs nous ont ainsi permis de simuler des impacts de particules d'une taille de $\sim$ 100 μm, jusqu'à des vitesses de 45 km/s. Ces caractéristiques sont très supérieures aux possibilités des meilleurs canons à particules actuels, et d'un ordre de grandeur proche des vitesses d'impact sur les engins spatiaux (jusqu'à 80 km/s dans le cas de la sonde VEGA).

4. **Discussion.** — On admet en général qu'il y a invariance d'échelle dans le processus de formation d'un cratère dans un matériau homogène, c'est-à-dire qu'un projectile de même vitesse, et de dimensions doubles d'un autre projectile, produira un cratère dont les dimensions sont elles aussi doublées. Nous avons donc calculé le rapport $K_m = M_c/M_p$, qui ne devrait dépendre que de la vitesse d'impact V_p. La variation de K_m avec la vitesse simulée V_p est représentée sur la figure 3. Une approximation linéaire dans les coordonnées ($\log(K_m)$, $\log(V_p)$) permet d'obtenir la relation :

$$K_m = 1{,}17\, V_p^{1{,}52} \qquad (V_p \text{ en km/s}). \tag{6}$$

On remarque que l'exposant de la vitesse est inférieur à 2 pour ces très grandes vitesses : la masse éjectée croît donc moins vite que l'énergie cinétique.

L'extrapolation à une vitesse d'impact de 80 km/s donne les résultats suivants : une masse M_p de projectile devrait éjecter une masse 910 fois plus grande ; pour une micrométéorite d'une taille de 100 μm, cela correspondrait à un cratère hémisphérique d'une profondeur de 610 μm.

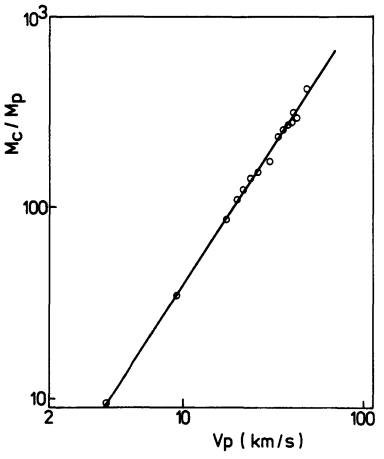

Fig. 3. — Variation de K_m, rapport de la masse éjectée du cratère à la masse du projectile simulé, en fonction de la vitesse d'impact simulée.

[Mass loss ratio, K_m, *vs.* simulated impact particle velocity.]

La correspondance entre les cratères que nous avons observés et les caractéristiques des micro-météorites qui pourraient en former de semblables doit à présent être confirmée. En effet, elle repose sur un modèle simple, qui ne rend pas totalement compte de la complexité des processus liés à l'interaction laser-matière, et aux impacts à très grande vitesse. L'étape suivante va ainsi consister à calibrer les résultats correspondant au domaine des faibles vitesses (10 à 20 km/s), accessible avec les canons à poussière existants, tel celui du Max Planck Institüt à Heidelberg. On pourrait alors préciser le coefficient constant de la relation (6) qui relie la masse éjectée à la vitesse de la particule incidente.

Remerciements. — Nous tenons à remercier E. Fabre et toute l'équipe du laser du GRECO I.L.M. qui ont rendu ces expériences possibles, ainsi que R. Pellat pour ses encouragements et ses conseils.

Bibliographie

[1] EICHELBERGER, P. J., GEHRING, J. W., *Am. Rocket Soc.* **32** (1962) 1583.
[2] BURTON, W. M., XXIV COSPAR Symposium N° 6 *Impact Processes of solid Bodies*, Ottawa (1982).
[3] PIRRI, A. N., *Phys. Fluids* **20** (1977) 221.
[4] NEBOLSINE, P. E., AIAA 14th Aerospace Sciences Meeting, Washington, D.C. (1976).
[5] RINEY, T. D., in High Velocity Impact Phenomena, R. Kinslow éditeur (Academic Press, New York) 1970, p. 157.
[6] MITCHELL, A. C. and WELLIS, W. J., *J. Appl. Phys.* **52** (1981).
[7] FABBRO, R., Thèse de l'Université Paris XI (1982).
[8] GARBAN-LABAUME, C., FABRE, E., MAX, C. E., FABBRO, R., AMIRANOFF, F., VIRMONT, J., WEINFELD, M. and MICHARD, A., *Phys. Rev. Lett.* **48** (1982) 1018.