ÉTUDE DE L'ÉCAILLAGE DANS DES MATÉRIAUX DUCTILES ET FRAGILES SOUS L'ACTION D'UNE ONDE DE CHOC DE DURÉE TRÈS FAIBLE INDUITE PAR UNE IMPULSION LASER

F. COTTET, M. BOUSTIE et T. de RESSEGUIER

*Laboratoire d'Énergétique et de Détonique, E.N.S.M.A, rue
Guillaume VII, F-86034 Poitiers Cedex, France*

Résumé - L'utilisation des ondes de choc générées par irradiation laser permet d'étendre l'étude de l'endommagement dynamique à des amplitudes de choc élevées (jusqu'à quelques centaines de GPa) et des durées de maintien très courtes (quelques nanosecondes). Ce travail, consacré aux matériaux de type fragile en comparaison avec les matériaux de type ductile, présente une étude analytique et numérique des effets des différents paramètres (durée de l'impulsion, pression induite, épaisseur de la cible, ...) et une étude expérimentale de l'écaillage de cibles de verre irradiées par impulsion laser.

Abstract - Laser induced shock wave technique provides a useful means for studying the dynamic fracture in an unusual range of stress and loading duration : respectively up to few hundreds of GPa and less than 10 ns. This paper presents the results of an experimental and numerical study of laser-shock spallation in brittle materials with the comparison with ductile material behaviour. The present investigation has two objectives: first, to study the effect of various parameters (pulse duration, induced pressure, target thickness, ...) and, second, to show preliminary experimental results on glass targets irradiated by laser pulses.

1.- Introduction

L'étude du phénomène d'écaillage induit par des ondes de choc générées par irradiation laser diffère de celle réalisée à l'aide de chocs conventionnels (explosif ou impact de projectile) par les caractéristiques du chargement : amplitudes de choc élevées (jusqu'à quelques centaines de GPa) et des durées de maintien très courtes (quelques nanosecondes). Ce domaine spécifique d'étude permet ainsi d'acquérir des données nouvelles et de valider les modèles de rupture dynamique dans ces conditions.

Le terme de rupture dynamique correspond au stade ultime de l'endommagement caractérisé par la séparation du matériau. La mise en tension d'une zone interne du matériau, qui peut conduire à cette rupture, est le résultat de la rencontre de deux ondes de détente : l'une provenant de la réflexion de l'onde de choc sur la face arrière libre et l'autre induite dans la cible lors de l'arrêt du chargement en pression sur la face avant. On distingue principalement deux modes de rupture : ductile ou fragile. Bien que certains matériaux (fer, alliage de titane, ...) répondent à ces deux modes du fait de leurs caractéristiques intrinsèques ou suivant la vitesse de déformation appliquée, cette distinction permet de séparer en deux classes les matériaux suivant leur comportement : les matériaux de type ductile (aluminium, cuivre, ...) et les matériaux de type fragile (verre, céramique, ...). Ces deux modes de rupture correspondent à des faciès très différents de la surface de séparation de l'écaillage : "arrachement" pour le type ductile et "clivage" pour le type fragile (voir figure 1). La rupture est liée à l'évolution dynamique de vides ou trous pour les matériaux ductiles et de microfissures pour les matériaux de type fragile. Dans les deux cas, ce processus de ruine du matériau s'effectue en trois étapes successives : nucléation, croissance et coalescence. Le phénomène d'écaillage par chocs conventionnels a été largement étudié sous différentes conditions de chargement et avec de nombreux matériaux de type ductile /1 à 3/ ou fragile /4, 5/. Par contre, l'étude de l'écaillage par choc laser dans les matériaux de type ductile est plus récente /6 à 9/.

(a)

(b)

Fig. 1- Observations au microscope électronique à balayage de la face arrière d'une cible d'aluminium (a) et d'une cible de verre (b) ayant subi un écaillage engendré par un choc généré par irradiation laser.

2.- Etude de la propagation d'une onde de choc induite par laser dans un milieu de type verre

La propagation des ondes de compression dans les matériaux de type "verre" s'écarte sensiblement du comportement classique des matériaux métalliques (Al, Cu...). Ce comportement, dû à la concavité négative de la courbe de Hugoniot dans la zone des basses pressions, est bien connu dans le cas des chocs conventionnels /5/ et a été aussi observé dans le cas de cibles de silice fondue irradiées par laser /10/. On se propose de préciser l'évolution d'un profil de pression au cours de sa propagation dans une cible de verre Pyrex, caractérisé par sa courbe de Hugoniot /11/ (voir figure 2).

Les simulations numériques ont été effectuées à l'aide du code de calcul monodimensionnel hydrodynamique lagrangien SHYLAC /7/. L'adaptation de ce code au verre a nécessité l'introduction d'une viscosité artificielle en détente, qui permet de réduire les phénomènes d'oscillations numériques parasites. Ce code ne comporte pas de modélisation du phénomène de compactage. Les conditions initiales, reproduisant l'irradiation laser, sont données par un profil carré de pression d'amplitude maximale P_m et de durée τ , appliquée sur la face avant d'une cible supposée d'épaisseur infinie.

Fig. 2.- Courbe de Hugoniot du verre Pyrex.

Trois cas peuvent se présenter, selon la position de l'état choqué P_m par rapport aux points particuliers (I) et (B) de la courbe de Hugoniot :

- Pour une pression P_m comprise entre 0 et 120 kbar, la concavité localement négative de la courbe de Hugoniot entraîne que le front de compression s'étale au cours de sa propagation dans la cible pour former un faisceau de compression, alors que l'onde de détente se raidit pour constituer un choc de détente (voir figure 3).

- Pour une pression initiale P_m comprise entre 120 et 300 kbar, compression et détente se font en deux étapes. L'échelon de compression se scinde en un faisceau qui s'étale au cours de sa propagation selon l'évolution décrite précédemment, suivi d'un front de choc correspondant à une concavité localement positive de la courbe de Hugoniot. L'onde de détente marquant la fin du chargement évolue de façon analogue : étalement puis raidissement (voir figure 4).

- Pour une pression P_m supérieure à 300 kbar, la courbe de Hugoniot présente une concavité globalement positive. Il en résulte une évolution classique: un front de choc raide, suivi d'un faisceau de détente qui s'étale au cours de sa propagation dans la cible. Etant donné que la tête de ce faisceau rattrape le choc, la pression maximale P_m diminue par amortissement hydrodynamique. Et, par conséquence, on retrouve successivement les deux phases décrites précédemment (voir figure 5).

Fig. 3.- Propagation d'un choc laser, modélisé par un créneau de pression d'amplitude 100 kbar et de durée 3 ns, dans une cible de verre.

Fig. 4.- Propagation d'un choc laser, modélisé par un créneau de pression d'amplitude 200 kbar et de durée 3 ns, dans une cible de verre.

Fig. 5.- Propagation d'un choc laser, modélisé par un créneau de pression d'amplitude 500 kbar et de durée 12 ns, dans une cible de verre.

3.- Etude analytique de la rupture fragile d'un matériau de type "verre" par choc-laser

Les paramètres déterminants lors de la rupture dynamique par choc d'une cible solide sont l'épaisseur de la cible E_c , la pression initiale induite P_m , et le temps de maintien du choc τ . Afin de dégager les influences de ces différents paramètres sur l'épaisseur E_e de l'écaille obtenue, on réalise une étude qualitative basée sur le plus simple des modèles de rupture : le modèle de type 'cut-off'. Ce modèle suppose que la rupture a lieu dès que la contrainte de traction induite dans la cible atteint une certaine valeur σ_r , caractéristique du matériau considéré. Il ne tient donc pas compte de la durée d'application de cette contrainte.

En modélisant la pression appliquée par un créneau rectangulaire d'amplitude P_m et de durée τ , l'étude de la propagation d'un tel profil de pression dans un matériau de type verre conduit à une forme, approximativement triangulaire, du profil de pression débouchant sur la surface libre de la cible (voir figure 3). La réflexion de ce profil entraîne l'apparition d'une zone de pressions négatives, qui traduisent un état de tension du matériau. L'écaillage a lieu lorsque la contrainte correspondante atteint la tension limite de rupture σ_r .

A partir de cette modélisation simple, il est possible d'obtenir les effets des différents paramètres (P_m , τ , E_c , σ_r) sur l'épaisseur de l'écaille E_e et de comparer ces évolutions à celles obtenues dans le cas des matériaux ductiles (voir figure 6).

4.- Etude expérimentale du phénomène d'écaillage par choc-laser dans des cibles de verre

On se propose d'étudier l'écaillage sous choc laser en réalisant dans des matériaux de type verre "Float" des expériences comparables à celles effectuées dans des matériaux métalliques [9]. Les expériences ont été réalisées au Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses de l'Ecole Polytechnique. Les cibles de verre, d'épaisseurs variant entre 0,6 et 4 mm, sont recouvertes d'un mince dépôt métallique qui constitue le matériau d'ablation, évitant ainsi au rayonnement laser de pénétrer dans la cible. Le rayonnement laser est caractérisé par une longueur d'onde de 1,06 μm , et une énergie variant de 30 J à 90 J. Il se traduit par l'application sur la face irradiée de la cible d'une impulsion de pression de forme gaussienne, d'amplitude comprise entre 0 et 800 kbar, et de durée à mi-hauteur 0,6 ns, 2,4 ns, ou 30 ns.

Fig. 6.- Influences des divers paramètres sur l'épaisseur de l'écaille dans un matériau de type verre : (a) : influence de E_c , (b) : influence de P_m , (c) : influence de τ , (d) influence de σ_r .

L'observation 'post-mortem' des échantillons permet d'évaluer la position du plan d'écaillage dans la cible, en fonction des différents paramètres du choc (voir figure 7). Les résultats expérimentaux, obtenus pour une durée d'impulsion laser d'environ 2,4 ns, sont reportés dans le diagramme donnant l'épaisseur d'écaillage en fonction de l'épaisseur de cible de la figure 8. Ces résultats sont cohérents avec l'évolution déterminée par l'étude analytique simple préalablement faite, c'est-à-dire croissance puis décroissance de E_c en fonction de E_c (zone grisée sur la figure). Le paramètre pression maximale P_m , comme dans le cas des matériaux ductiles, semble avoir une influence faible sur l'épaisseur de l'écaillage. En effet un facteur 7 sur la pression maximale induite conduit à 25 % de différence sur les épaisseurs d'écaillage. Cette propriété provient du processus d'amortissement hydrodynamique très important dans le cas des chocs induits par laser qui conduit à des pressions relativement proches après de grandes épaisseurs de cible.

5.- Conclusion

Grâce à l'utilisation des laser de forte puissance, le domaine d'expérimentation de la physique des ondes de choc s'étend à des conditions de chargement très spécifiques : amplitudes de forte puissance et/ou durées de maintien faibles. Dans le cadre de l'endommagement dynamique des matériaux, les ondes de choc générées par laser trouvent une place importante, car elles offrent d'une part, étant donnée la faible quantité de mouvement transmise à la cible, la possibilité de récupération et d'analyse des échantillons post-mortem, en particulier pour les matériaux de type fragile, et d'autre part, le paramètre temps étant extrêmement important dans le processus de rupture dynamique, la possibilité d'étendre les études faites en chocs conventionnels à des temps très courts.

Le travail expérimental et numérique, réalisé dans le cadre de cette étude, permet de comparer l'effet des différents paramètres (pression maximale induite, durée de l'impulsion laser, épaisseur de cible) sur l'endommagement dynamique dans des matériaux ductiles et des matériaux fragiles. Les résultats expérimentaux préliminaires, obtenus avec des cibles de verre, sont en bon accord avec les évolutions déterminées. Comme cela a été fait pour les matériaux ductiles soumis à des chargements de type choc-laser, cette étude permettra ensuite d'établir et de valider un modèle de rupture dynamique appliqué aux matériaux fragiles.

Fig. 7.- Microscopie optique d'une coupe d'un échantillon de verre d'épaisseur de 1,6 mm, soumis à un choc laser caractérisé par une pression maximale de 680 kbar et une durée de 0,6 ns.

Fig. 8.- Résultats expérimentaux pour des cibles de verre "Float" soumises à des impulsions laser de durée 2,4 ns générant des pressions de 100 kbar à 700 kbar.

Références :

- /1/ MC QUEEN R.G., MARSH S.P., J. Appl. Phys.33, 654 (1962).
- /2/ SKIDMORE I.C., Appl. Mater. Res. 4, 131 (1965).
- /3/ BREED B.R., MADER C.L., VENABLE D., Appl. Phys. Lett. 22,594 (1973).
- /4/ LAWN B.R., WILSHAW, in Fracture of Brittle Solids ed. by CAHN R.W. et al. (Cambridge University Press : Cambridge) 19 (1975).
- /5/ CAGNOUX J. AIP Conference Proceedings ed. NELLIS W.J. et al. (American Institute of Physics : New York) 78, 392 (1982).
- /6/ FOX J.A., BARR D.N., Appl. Phys. Lett. 22, 594 (1973).
- /7/ COTTET, NG A., DA SILVA L., MARTY L. Journ. de Physique Coll. C3, 49, 419 (1988) et COTTET F., BOUSTIE, J. Appl. Phys. 66(9), 4067 (1989).
- /8/ GILATH I., ELIEZER S., DARIEL M.P., KORNBLIT L., BAR-NOY T., Journ. de Physique Coll. C3, 49,191 (1988)
- /9/ BOUSTIE M., F. COTTET, J. Appl. Phys. 69(11), 1 June (1991).
- /10/ NG A., CELLIERS P., PARFENIUK D., Phys. Rev. Lett. 58(3), 214 (1987).
- /11/ LASL Shock Hugoniot Data ed. MARSH S.P. (Univ. of California Press, Berkeley) 1980.