SIMULATION DES EFFETS DES IMPACTS À HYPERVITESSE

J. Leyrat, E. Charvet, M. Lacomme, P. Massard, H. Pujols

► To cite this version:

J. Leyrat, E. Charvet, M. Lacomme, P. Massard, H. Pujols. SIMULATION DES EFFETS DES IMPACTS À HYPERVITESSE. Journal de Physique IV Proceedings, 1991, 01 (C3), pp.C3-155-C3-162. 10.1051/jp4:1991320 . jpa-00250462

HAL Id: jpa-00250462

<https://hal.science/jpa-00250462>

Submitted on 1 Jan 1991

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.

SIMULATION DES EFFETS DES IMPACTS À HYPERVITESSE

J.P. LEYRAT*, E. CHARVET*, M. LACOMME*, P. MASSARD** et
H.C. PUJOLS**

* Centre d'Etudes de Limeil-Valenton, F-94195

Villeneuve-Saint-Georges cedex, France

** CEA-CESTA, F-94195 Villeneuve-Saint-Georges cedex, France

Résumé - Pour étudier les effets des impacts à hypervitesse, nous avons mis au point un propulseur qui utilise l'onde de détonation engendrée dans un cylindre d'explosif pour projeter des masses compactes de l'ordre du gramme à des vitesses allant de 5 à 10 km/s. Les cibles testées sont des disques en alliage d'aluminium ou de titane, dont l'épaisseur varie de 15 à 50 mm. Les simulations numériques ont été effectuées avec le code 2D aux différences finies CEL ; ce code permet d'utiliser diverses équations d'état (équations SESAME, équations WILKINS...), ainsi qu'une loi de comportement dynamique (modèle de STEINBERG-COCHRAN-GUINAN). La comparaison expériences-calculs est très bonne en ce qui concerne les dimensions du cratère formé, l'épaisseur critique de cible pour laquelle on observe un début d'écaillage, ainsi que l'épaisseur de l'écaille.

Abstract - An experimental study of hypervelocity impact was performed with a propeller using the detonation wave of an explosive cylinder to project compact masses of about 1 gram at 5 to 10 km/s. The targets were large disks of aluminum or titanium alloys of different thicknesses (15 to 50 mm). For the numerical correlation, we used the 2D finite differences code CEL, with accurate equations of state (either SESAME or WILKINS E.O.S.) and a dynamic behaviour law (the STEINBERG-COCHRAN-GUINAN model). Under these conditions, the code correlates well the depth and diameter of the crater, the critical dimensions of the target for which spalling is observed, and the thickness of the spall.

Introduction

Les effets des impacts sur des cibles de différentes natures (métalliques, composites à structure tissée, multicouches...) dépendent beaucoup de la vitesse du projectile. Dans le domaine des impacts à hypervitesse, c'est-à-dire quand la vitesse du projectile est supérieure à la vitesse du son dans les divers matériaux (typiquement au delà de 5 km/s pour des métaux "classiques" tels l'aluminium, le titane ou le fer), les déformations sont suffisamment rapides pour que l'échauffement adiabatique fonde ou vaporise une partie, voire la totalité du projectile, ainsi que la cible aux environs du point d'impact. Dans ce cas, l'explosion de la zone vaporisée gouverne le choc qui se propage dans la cible, et, par conséquent, les endommagements qui s'ensuivent.

Rappelons que, qualitativement, les impacts à hypervitesse se caractérisent par trois types d'effets (figure 1) :

- à faible vitesse d'impact, ou pour des cibles épaisses, un cratère est formé, caractérisé par son diamètre et sa profondeur ;
- à plus grande vitesse, et/ou pour des cibles plus minces, une écaille est arrachée en face arrière du projectile; elle est définie par son diamètre et par son épaisseur, à peu près constante ;
- à très grande vitesse, et/ou pour des cibles encore plus minces, on obtient une perforation complète de la cible.

Pour étudier ces phénomènes hautement dynamiques, il est nécessaire de disposer de codes de calculs performants, munis de lois de comportement validées par de nombreuses expériences. Nous présentons dans cette étude les moyens expérimentaux et numériques actuellement à notre disposition pour traiter ce problème, ainsi que les résultats des premières comparaisons expériences-calculs.

Figure 1 - Effets des impacts à hypervitesse

Les expériences

Le dispositif expérimental

Le propulseur mis au point pour réaliser des expériences d'impact à grande vitesse comporte un générateur à explosif dont la détonation met en mouvement un ensemble composé d'un petit cylindre central (le projectile proprement dit) et d'une couronne périphérique. Le cylindre se détache progressivement de la couronne, freinée par les détentes latérales, et qui se fragmente par elongation. Un pare-éclats permet de dévier les débris hors de l'axe du montage, de manière à ce que seul le cylindre impacte la cible (figure 2 - a). Une variante du montage permet de se dispenser de la présence du pare-éclats, en utilisant une couronne "conique" (figure 2 - b). Un système de radiographie X permet de visualiser la forme du projectile juste avant l'impact, et de vérifier s'il attaque la cible perpendiculairement à son axe.

Avec ce lanceur mono-étage, il est possible de projeter des masses de quelques centaines de milligrammes à quelques grammes à des vitesses n'excédant pas 7 km/s. Pour améliorer ces performances, on peut utiliser un propulseur multi-étages (figure 3), où la détonation de l'explosif de l'étage d'ordre n est initiée par l'impact du projectile d'ordre $n-1$. A condition que la masse surfacique de chaque étage soit inférieure à celle du projectile précédent, on peut ainsi dépasser 10 km/s /1/.

Figure 2 - Principe du générateur mono-étage

Figure 3 - Principe d'un propulseur multi-étages

Les résultats expérimentaux

Les premières campagnes de tirs avaient essentiellement pour but de valider le moyen d'essai et d'explorer les possibilités des codes numériques. Trois configurations d'impact ont été étudiées :

- **Impact AU4G → AU4G à 5400 m/s** : dans ce cas, le projectile, en alliage d'aluminium AU4G, est un cylindre de diamètre 12 mm et de hauteur 6,8 mm ; sa masse est de 2,15 grammes, et son énergie cinétique au moment de l'impact est de 31,35 kJ. Les cibles, également en AU4G, sont des disques de grand diamètre (200 mm, ce qui permet de négliger les effets de bord) et d'épaisseurs comprises entre 35 et 50 mm ;
- **Impact AU4G → TA6V à 5400 m/s** : avec un projectile similaire et la même vitesse d'impact, des expériences ont été réalisées avec des cibles en alliage de titane TA6V d'épaisseur 35 et 45 mm ;
- **Impact AU4G → AU4G à 7200 m/s** : ces expériences d'impact à plus grande vitesse sur cibles d'AU4G minces (épaisseur 15 à 25 mm) ont été effectuées avec des projectiles plus petits (diamètre 6 mm, hauteur 2 mm, masse 0,16 gramme) ; l'énergie cinétique au moment de l'impact est donc plus faible (4,15 kJ).

Les principaux résultats sont rassemblés sur le tableau 1. Ils permettent, pour les trois types d'expériences, de déterminer les épaisseurs "critiques" de cibles correspondant aux seuils d'écaillage et de perforation complète.

Tableau 1 - Principaux résultats expérimentaux

type d'expérience	épaisseur de cible mm	diamètre mm	profondeur mm	épaisseur d'écaillage mm
AU4G/AU4G 2,15g 5400m/s	50	42	20,5	début d'ouverture
	45	41	17,5	3 à 4
	40	42	≈ 19	≈ 5
	35	42	Perf. complète	≈ 5
AU4G/TA6V 2,15 g 5400m/s	45	37	12	début d'ouverture
	35	37	12	2 à 4 (seuil d'arrachement)
AU4G/AU4G 0,16g 7200 m/s	25	17	10	début d'ouverture
	20	17	9	≈ 2
	15	?	Perf. complète	≈ 2

La figure 4 représente des coupes après tir de cibles d'AU4G impactées à 5400 m/s par un projectile de 2,15 g ; dans le cas d'une cible épaisse (45 mm), on peut ainsi visualiser la forme et la profondeur du cratère, l'épaisseur d'écaillage, ainsi que l'amorce de lignes de fractures qui conduisent, pour des cibles plus minces (35 mm), à la perforation.

Figure 4

Coupe de cibles en AU4G après impact par un projectile de 2,15 g à 5,4 km/s

Les simulations numériques

Le Code CEL

Pour restituer numériquement ces expériences, nous utilisons le code bidimensionnel aux différences finies CEL. Ce code couplé Euler-Lagrange possède un schéma eulérien d'ordre 2, et permet l'introduction de lignes de glissement aux interfaces Euler-Lagrange ou Lagrange-Lagrange. De plus, on peut simuler l'ouverture d'une écaille, à l'aide d'un critère de tension maximale.

Nous avons utilisé différentes équations d'état pour ces calculs. Citons en particulier les équations SESAME de Los Alamos (particulièrement intéressantes pour traiter les changements de phase), et l'équation de Wilkins à deux phases, dont la formulation est de type Mie-Grüneisen en compression et Puff en tension :

$$\begin{aligned} \rho > \rho_0 : P &= K\mu + D\mu^2 + S\mu^3 + \Gamma\rho E \\ \rho < \rho_0 : P &= \rho \left[H + (\Gamma - H) \sqrt{\eta} \right] \left\{ E - E_s \left[1 - \exp \left(-\frac{K}{\Gamma \rho E_s} \frac{1}{\eta} \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \right) \right] \right\} \end{aligned}$$

avec :

- P = pression hydrostatique ;
- ρ = densité ;
- E = énergie ;
- $\mu = \rho/\rho_0 - 1$, $\eta = \rho/\rho_0$;
- Γ = coefficient de Grüneisen ;
- K = module de compressibilité ;
- D, S : coefficients quadratique et cubique de μ dans la formulation de P ;
- $H = \gamma - 1$, avec γ = coefficient polytropique des gaz ;
- E_s = enthalpie de vaporisation.

Cette équation d'état est complétée par une loi de comportement élastoplastique. En effet, il n'est pas possible de simuler correctement les effets dans la cible en supposant qu'elle a un comportement purement hydrodynamique. L'apparition d'un échauffement intense au voisinage de l'impact, ainsi que la diminution rapide au cours du temps de la vitesse du projectile nous conduisent à adopter pour la cible une loi de comportement dépendant de la température et de la vitesse de déformation. Il s'agit du modèle de STEINBERG-COCHRAN-GUINAN (ou modèle SCG) /2/. Rappelons que ce modèle, mis au point pour des métaux, permet de tenir compte des variations du module de cisaillement G et de la contrainte d'écoulement Y du matériau avec la température T, la pression hydrostatique P, et la déformation plastique équivalente ϵ_p . Il est décrit par :

$$\begin{aligned} G &= G_{PE} \left(\frac{P}{\eta^{1/3}} \right) + G_0 [G_{PE}(T - 300) + 1] \\ Y &= (\beta_1 + \beta \epsilon_p)^{\gamma} \left[Y_0 (1 + G_{PTE}(T - 300)) + Y_{PE} \left(\frac{P}{\eta^{1/3}} \right) \right] \end{aligned}$$

avec :

$$(\beta_1 + \beta \epsilon_p) \leq Y_{\max}$$

Ce modèle reste valable jusqu'à la température de fusion "vraie" T_{fm} définie par une loi de type Lindemann :

$$T_{fm} = T_{fu} \eta^{2(\gamma_0 - a - 1/3)} \exp \left[2a \left(1 - \frac{1}{\eta} \right) \right]$$

où T_{fu} est la température de fusion à la pression ambiante (lorsque $\rho = \rho_0$). Pour des températures supérieures, le calcul se fait en hydrodynamique.

Au total, le traitement d'un matériau à l'aide du modèle SCG nécessite 11 paramètres en plus de la température de fusion. Certains d'entre eux ont une signification physique évidente ; ainsi, G_0 et Y_0 peuvent être assimilés (en première approximation) au module de cisaillement et à la limite élastique en régime statique et à température ordinaire. La plupart des autres paramètres sont semi-empiriques, et, pour l'AU4G et le TA6V, ont été "calés" à partir d'expériences de type Taylor /3-4-5/.

A titre d'exemple, la figure 5 met en évidence l'influence de la loi de comportement dans le cas de l'impact à 5400m/s d'un

projectile de 2,15 g sur une cible d'AU4G de 50 mm d'épaisseur. On constate que l'application du modèle SCG à la cible permet de retrouver la profondeur du cratère "expérimental" (20,5 mm), alors qu'un calcul purement hydrodynamique la surévalue nettement ; avec un modèle élastique-parfaitement plastique indépendant de la température et de la vitesse de déformation, la profondeur calculée est au contraire trop faible.

Figure 5 - Profondeur de pénétration en fonction du temps - Cible en AU4G ($e=50$ mm) - Projectile de 2,15g - $v \approx 5400$ m/s

Résultats des calculs et conclusion

Pour visualiser la cinématique du phénomène, nous avons simulé par un calcul purement eulérien l'impact à 5400 m/s d'un projectile de 2,15g sur une cible d'AU4G de 50 mm d'épaisseur. Le maillage comporte 8000 cellules ; le calcul, poursuivi jusqu'à 20 μ s (soit un temps supérieur à un aller-retour d'onde dans l'épaisseur de la cible), dure 53 minutes sur CRAY XMP.

Sur la figure 6, on a représenté la carte de pression hydrostatique dans la cible à différents instants. L'onde de compression initialement sphérique s'amortit rapidement : de l'ordre du mégabar avant 1 μ s, elle ne vaut plus que 40 kilobars vers 7 μ s. Elle est suivie de compressions secondaires, plus faibles, et qui correspondent aux aller-retours d'ondes dans le projectile.

A partir de 8 μ s, l'onde, qui continue à se propager en quasi-sphérique vers la périphérie de la plaque, se réfléchit en tension sur l'axe. Ces tensions atteignent un niveau important au voisinage de la surface libre : ainsi, à 9 μ s, elles sont d'environ 19 kilobars à 3 mm de cette surface ; cette valeur est légèrement supérieure à la tension critique d'écailage de l'AU4G mesurée en monodimensionnel grâce à des expériences de projection de plaques ($= 18$ kbars) [7]. Ceci est cohérent avec les observations expérimentales (ouverture d'une écaille sans arrachement).

Si nous poursuivons le calcul sans écailage, on constate un amortissement progressif de l'onde de tension au fur et à mesure de sa progression vers la face impactée, où elle se réfléchit vers 14 μ s, tandis que l'onde de compression "primaire" atteint les bords latéraux de la cible. Les niveaux de contraintes sont alors beaucoup plus faibles (moins de 10 kilobars) et s'amortissent de plus en plus ; à 20 μ s, la vitesse de l'interface projectile-cible est pratiquement nulle, et on peut considérer que le phénomène est terminé. La forme du cratère à cet instant est très comparable à celle observée dans l'expérience : même profondeur de pénétration (20,4 mm), diamètre de cratère peu différent (40 mm au lieu de 42), forme similaire des lèvres du cratère.

Nous avons effectué un second calcul de simulation en maillant la moitié de la cible, du côté non agressé, en coordonnées de Lagrange, les mailles ayant les mêmes dimensions que les cellules eulériennes utilisées précédemment dans cette zone. Ceci présente un double intérêt :

- d'une part, le temps de calcul diminue notablement (35 minutes CRAY au lieu de 53 pour atteindre 20 μ s) ;

- d'autre part, nous pouvons introduire un critère de tension limite pour traiter l'ouverture de l'écaille. En prenant comme "seuil critique" la valeur expérimentale de 18 kilobars mentionnée ci-dessus, on constate (figure 7) que l'épaisseur de l'écaille formée ($3 + 0,5$ mm) est comparable à celle mesurée après tir (3 à 4 mm).

Figure 6

Pression hydrostatique dans une cible en AU4G ($e=50$ mm) - Projectile de 2.15g - $v = 5400$ m/s
(les pressions sont en kilobars - les temps sont comptés à partir de l'instant d'impact)

Figure 7 - Traitement de l'écaillage - aspect de la cible à 9.6 μ s
Cible en AU4G (e=50 mm) - Projectile de 2.15g - v = 5400m/s - calcul couplé Euler-Lagrange

Le tableau 2 rassemble les principaux points de comparaison expériences-calculs. Dans le cas où les effets sur la cible sont limités à la cratérisation et à l'ouverture d'une écaille, les calculs permettent de bien restituer les dimensions du cratère et de l'écaille ; de plus, l'épaisseur critique de cible pour laquelle apparaît une écaille est convenablement estimée à l'aide d'un critère de tension limite, aussi bien pour l'AU4G (seuil : 18 kilobars), que pour le TA6V (seuil : 45 kilobars).

Par contre, le code CEL ne possédant pas à ce jour de critère de fracturation, il ne peut pas simuler l'arrachement de l'écaille et, en particulier la diminution de profondeur du cratère lorsque l'énergie cinétique du projectile est suffisante pour provoquer l'arrachement de l'écaille (phénomène classique déjà observé par divers expérimentateurs /6/) ; la comparaison expériences-calculs est alors moins favorable (l'écart étant de 20 à 30 %). A fortiori, la perforation complète des cibles minces ne peut être traitée.

Pour améliorer la restitution numérique des effets de l'impact, un modèle de fracture et d'endommagement bidimensionnel est actuellement en cours d'introduction dans CEL ; il comprend /8/ :

- un critère de rupture ductile, qui consiste à calculer à chaque instant le rapport P/Y de la pression hydrostatique à la contrainte d'écoulement effective et à comparer cette valeur à une "courbe critique de fracturation" fonction de la température et de la déformation plastique équivalente ;
- une loi de comportement de matériau fracturé basée, comme pour la plupart des modèles d'endommagement monodimensionnels, sur un traitement poreux : on définit une porosité $\alpha = (\rho_f - \rho)/\rho_f$, ρ_f désignant la valeur de la densité atteinte à l'instant où le critère P/Y est violé ; le comportement ultérieur du matériau est décrit à l'aide :
 - d'un "module équivalent" $E_{eq} = E_0 g(\alpha)$;
 - d'une "courbe de traction plastique équivalente" $\sigma_{eq} = \sigma_0(\epsilon, \epsilon, T) g(\alpha)$, où E_0 est le module d'Young initial, et $\sigma_0(\epsilon, \epsilon, T)$ la loi de comportement du matériau "vierge" (non endommagé).

Avec des modèles de ce type, on peut simuler aussi bien les fracturations au voisinage du cratère (sans doute dues à des cisaillements) que la formation et l'arrachement de l'écaille (pour lesquels le critère de rupture est plutôt du type "contrainte principale maximale"), ce qui permet en particulier d'évaluer des seuils de perforation.

Tableau 2 - Comparaison expériences-calculs

Epaisseur de cible (mm)	Cratère diamètre (mm)		Cratère profondeur (mm)		Epaisseur d'écaillage (mm)		Tension max. dans la cible (kbar)
	exp.	calc.	exp.	calc.	exp.	calc.	calc.
Projectile 2,15g - $v = 5400$ m/s - Cible en AU4G							Tens. lim.=18kbars
50	42	40	20,5	20,4	seuil écaillage	3,5	19
45	41	40	17,5	20,7	3 à 4	3,5	23
40	42	40	~19	21,5	~5	4	23,5
35	42	40	Perfo.	22,4	-	4	25
Projectile 2,15g - $v = 5400$ m/s - Cible en TA6V							Tens. lim.=45kbars
45	37	38	12	10,1	seuil écaillage	-	42
35	37	38	12	10,4	2 à 4	2	55
Projectile 0,16g - $v = 7200$ m/s - Cible en AU4G							Tens. lim.=18kbars
25	17	17	9 à 10	9,8	seuil écaillage	2	20
20	17	19	9	11	~2	2	50
15	?	17,7	Perfo.	10,4	~2	2	100

Références

- 11/ H.C. PUJOLS - Lanceur hypervitesse à explosif - Communication pour la 40ème rencontre de l'Aeroballistic Range Association - (Paris - 25-28 Septembre 1989).
- 12/ D.J. STEINBERG - S.G. COCHRAN - M.W. GUINAN - A constitutive model applicable at high strain rate- Journal of applied physics - 51 (3) - Mars 1980.
- 13/ G.I. TAYLOR - The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress - Proc. R. Soc A194 - pages 289-299 - 1948.
- 14/ M.L. WILKINS - M.W. GUINAN - Impact of cylinders on a rigid boundary - Journal of applied physics - 44 - pages 1200-1206 - 1973.
- 15/ W.H. GUST - High impact deformation of metal cylinders at elevated temperatures - Journal of applied physics - 53 (5) - pages 3566-3575 - 1982.
- 16/ A.E. WILLIAMS - M.A. PERSECHINO - The effect of projectile properties on target cratering - Int. Journal of impact engineering - Vol. 5 - pages 709-728 - 1987.
- 17/ M. LACOMME - A. FROGER - J.P. ANSART - R. DORMEVAL - Endommagement sous choc d'un alliage d'aluminium AU4G - Communication présentée au DYMAT 88 - Journal de Physique C3 - 49 (9) - Septembre 1988.
- 18/ M.A. NASH - I.G. CULLIS - Numerical modelling of fracture - a model for ductile fracture in triaxial states of stress - Proc. 3rd conf. on the mechanical properties at high rates of strain (Oxford, 9-12 Avril 1984) - pages 307-314 - 1984.