Etude de l'écaillage du tantale aux très grandes vitesses de déformation

P. Priou, M. Dommanget, R. Clerc

► To cite this version:

P. Priou, M. Dommanget, R. Clerc. Etude de l'écaillage du tantale aux très grandes vitesses de déformation. Journal de Physique IV Proceedings, 1994, 04 (C8), pp.C8-295-C8-300. 10.1051/jp4:1994844 . jpa-00253399

HAL Id: jpa-00253399

<https://hal.science/jpa-00253399>

Submitted on 1 Jan 1994

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.

Etude de l'écaillage du tantale aux très grandes vitesses de déformation

P. Priou, M. Dommanget et R. Clerc

Aérospatiale Espace et Défense, 66 Route de Verneuil, bp.2, 78133 Les Mureaux cedex, France

Résumé : Cette étude consiste à simuler, à l'aide des codes AUTODYN et DYNA-2D, deux essais d'écaillage réalisés sur du tantale au moyen d'un canon à gaz et d'un canon à électrons. Pour chaque essai, la tension d'écaillage est calculée par la formule empirique de TAYLOR, à partir d'un paramètre mesuré directement sur le diagramme de vitesse de face arrière de l'écaille. On cherche alors, d'une part à restituer le profil temporel de cette vitesse et l'épaisseur de l'écaille et d'autre part à déterminer la vitesse de déformation du matériau à l'endroit et au moment de l'écaillage.

Abstract : Simulations of two spall tests, performed on tantalum with a light gas gun and an electron beam, have been carried out, using the AUTODYN-2D and DYNA-2D codes. For each test, the spall stress is calculated from the TAYLOR empirical formula, using a measured free surface velocity history parameter. The first objective is to reproduce the free surface velocity history and the spall layer thickness, the second one to determine at spall time, and in the spall plane, the material strain rate.

1. INTRODUCTION

Le canon à gaz léger et le canon à électrons sont deux moyens d'essais de dynamique rapide qui, associés à une chaîne de mesures par Interférométrie DOPPLER Laser (IDL), permettent de déterminer la tension d'écaillage des matériaux à partir du diagramme temporel de vitesse de surface libre des échantillons testés.

Cette étude se base sur les résultats de deux expérimentations effectuées pour nos besoins sur du tantale, au moyen d'un canon à gaz léger et d'un canon à électrons. Notre objectif consiste à simuler ces deux expérimentations à l'aide de deux codes de calcul bidimensionnels explicites ayant des algorithmes de résolution différents :

- AUTODYN, aux différences finies, Lagrange-Euler couplé avec utilisation du processeur Lagrange [1],
- DYNA-2D, lagrangien aux éléments finis [2],

afin d'en extraire les vitesses de déformation auxquelles se sont produits les phénomènes d'écaillage.

En effet, la connaissance de l'évolution de la contrainte de rupture en tension des matériaux en fonction de la vitesse de déformation est indispensable pour assurer le dimensionnement de certains de nos systèmes soumis à de très fortes et brèves sollicitations dynamiques.

Deux lois de comportement sont mises en œuvre : lois élastoplastique parfaite et de Steinberg & Guinan.

2. DESCRIPTION DES ESSAIS

2.1 Essai au canon à gaz

Il s'agit d'un essai d'impact plaque sur plaque effectué sous un vide de 10^{-2} torr. L'impacteur est constitué d'un disque de tantale, de diamètre 80 mm, d'épaisseur 1,5 mm, lancé à une vitesse de 299 m/s ($\pm 1\%$). La cible est constituée d'un disque de tantale de diamètre 80 mm, d'épaisseur 4,5 mm.

Les deux éprouvettes usinées par électroérosion ont un défaut de planéité des faces inférieur à 5 µm et un défaut de parallélisme des faces inférieur à 10 µm. Le résultat de l'enregistrement VISAR est reporté sur les figures 3 et 4.

2.2 Essai au canon à électrons

La cible est constituée d'un disque de tantale de diamètre 50 mm, d'épaisseur 2 mm, encastré sur sa périphérie dans un assemblage porte-cible. Sur la face arrière de la cible, une gorge de diamètre compatible avec celui du faisceau d'électrons a été usinée afin de faciliter le départ de l'écaillage.

La visée laser est focalisée au centre de l'arrière de la cible et l'interférogramme IDL est reporté sur les figures 9 et 10.

3. MODELISATIONS

3.1 Généralités

Les modélisations introduites dans les deux codes sont semblables :

- problème axisymétrique, d'où demi-maillage par symétrie,
- à essai donné, maillage identique,
- conditions aux limites : vitesses normales au bord nulles ; pour les deux types d'essais, on se place dans l'hypothèse de déformations uniaxiales,
- conditions de chargement :
 - dans le cas de l'impact de plaque ==> vitesse initiale d'impacteur de 299 m/s,
 - dans le cas de l'irradiation par flash d'électrons ==> pression imposée sur la face avant de l'ordre de la dizaine de GPa, à profil trapézoïdal $f(t)$ durant un temps de l'ordre du dixième de µs.

Le niveau-crête P_{MAX} de la pression d'entrée est évalué à partir de la mesure de l'impulsion surfacique I_0 , engendrée par une fluence électronique Φ_0 et telle que :

$$I_0 = P_{MAX} \cdot \int f(t) \cdot dt$$

Quand on ne dispose pas de mesure d'impulsion à la fluence Φ_0 , comme c'est ici le cas, on applique la méthodologie illustrée en figure 1. Trois essais préliminaires avec mesures d'impulsions I_i , à différentes fluences Φ_i inférieures à la fluence Φ_0 , sont simulés à l'aide du code hydrodynamique monodimensionnel WONDY utilisant une équation d'état PUFF, afin de caler tous les paramètres du matériau. Une quatrième simulation est effectuée pour extrapoler l'impulsion I_0 à la fluence Φ_0 , qui est ainsi estimée à 1550 Pa.s.

Le maillage et les conditions aux limites sont présentés en figure 2. Le maillage est choisi avec le pas de temps juste nécessaire pour atteindre la convergence (pas d'oscillations numériques). Il se trouve qu'alors le temps CPU est raisonnable. Les viscosités sont choisies de manière standard pour chacun des codes.

Figure 1 : Méthodologie flash d'électrons

Figure 2 : Maillage et conditions aux limites

3.2 Caractéristiques du tantale testé

Les échantillons testés ont été tirés d'un barreau de diamètre de 80 mm, élaboré par fusion sous vide, puis forgé et recuit. C'est un tantale garanti pur à 99,9 % minimum [3]. Les valeurs maximales des taux d'impuretés en ppm sont : H = 10, C = 50, N = 50, O = 100, Si = 50, Ti = 20, Cr = 50, Fe = 50, Ni = 50, Nb = 300, Mo = 200 et W = 300. La granulométrie minimale est d'indice 3 en norme ASTM et la dureté est VHN 120.

Les mesures de densité et de vitesses ultrasonores ont donné :

- masse volumique $\rho = 16\,690 \text{ kg/m}^3$
- vitesse de propagation des ondes longitudinales $C_L = 4140 \text{ m/s}$
- vitesse de propagation des ondes transversales $C_T = 2062 \text{ m/s}$.

La tension d'écaillage σ_{ec} est déterminée à partir du profil de vitesse de surface libre de l'écaille et d'après la formulation empirique de TAYLOR mentionnée en [4] : $\sigma_{ec} = 1/2 \rho \cdot C_L \cdot (V_A - V_B)$

Les valeurs ainsi calculées sont :

- pour l'impact plaque sur plaque $\sigma_{ec} = 5,6 \text{ GPa}$
- pour l'irradiation par faisceau d'électrons $\sigma_{ec} = 9,08 \text{ GPa}$.

L'équation d'état de MIE-GRÜNEISEN est choisie et deux lois de comportement sont utilisées :

- la plasticité parfaite au-delà de la limite d'élasticité dynamique,
- la loi de STEINBERG et GUINAN, prenant en compte un écrouissage en fonction de la pression et un radoucissement en fonction de la température [5].

La limite d'élasticité dynamique est également déterminée à partir du diagramme de vitesse de surface libre, au moyen d'une formulation semblable à celle de TAYLOR ; elle est ainsi estimée à 1,09 GPa et applicable pour les deux types d'essais.

3.3 Le modèle de rupture

Quand on dépasse, dans une maille du matériau, la pression limite d'écaillage, les contraintes dans cette maille sont alors instantanément annulées. Le principe de ce modèle de rupture existait dans AUTODYN. Par contre, il a été introduit dans DYNA2D.

La discontinuité de contraintes, pour être prise en compte, exige un pas de temps très petit. En effet, dans le cas contraire, la maille la plus proche a le temps de casser avant que la réflexion de l'onde sur la surface cassée ne soit prise en compte. Pour éviter ce problème numérique, on diminue le pas de temps en imposant un coefficient multiplicatif (inférieur à 1), suffisamment petit pour que deux éléments adjacents ne rompent pas pour deux cycles consécutifs.

4. RESULTATS DES SIMULATIONS

4.1 Impact plaque sur plaque

Sur les figures 3 et 4 sont présentées les vitesses de surface libre obtenues d'une part au cours de l'essai et d'autre part dans les calculs avec les deux codes, respectivement pour les lois de comportement élastoplastique et de STEINBERG et GUINAN.

Figure 3 : Loi élastoplastique parfaite

Figure 4 : Loi de STEINBERG et GUINAN

En ce qui concerne la loi de comportement élastoplastique, les résultats des deux codes sont similaires. La vitesse maximale est approchée par les codes à 3 % près, les codes donnant une valeur inférieure à celle mesurée. Après le premier minimum de vitesse (point B), on constate que l'amortissement des ondes dans l'écaïlle est plus faible que dans la réalité ; cependant le phénomène temporel (périodicité des oscillations) est bien rendu.

En ce qui concerne la loi de STEINBERG et GUINAN, on peut tirer les mêmes conclusions. Les résultats dépendent finalement peu de la loi de comportement, pour peu que la valeur de la limite d'élasticité dynamique soit prise judicieusement. Quant à l'épaisseur de l'écaïlle, le tableau suivant récapitule les résultats, les valeurs étant précises à l'épaisseur d'un élément près.

Epaisseur d'écaïlle (mm)	Loi élastoplastique parfaite	Loi de STEINBERG et GUINAN	Essai (*)
AUTODYN-2D	$1,51 \pm 0,05$	$1,46 \pm 0,05$	1,57
DYNA-2D	$1,46 \pm 0,05$	$1,46 \pm 0,05$	

(*) Valeur estimée à partir de la relation : $e_{ec} = 1/2 C_L \cdot (t_C - t_B)$

Avec DYNA-2D, l'épaisseur de l'écaïlle est la même pour les deux lois de comportement ; elle diffère de 7 % de l'épaisseur de l'écaïlle estimée par la formule analytique précédente. Avec AUTODYN-2D, l'épaisseur de l'écaïlle diffère pour les deux lois de comportement : la rupture se produit en effet dans deux éléments adjacents. L'épaisseur varie de 4 % à 7 % de celle calculée analytiquement.

Les figures 5 et 6 montrent la pression dans l'élément en rupture pour les deux codes, respectivement pour les lois de comportement élastoplastique et de STEINBERG et GUINAN. Les résultats sont similaires.

Figure 5 : Loi élastoplastique parfaite

Pression dans l'élément en rupture

Figure 6 : Loi de STEINBERG et GUINAN

Les figures 7 et 8 montrent la vitesse de déformation plastique $\dot{\epsilon}$ dans le même élément en rupture. A l'instant de la rupture, la vitesse de déformation présente une discontinuité importante.

Figure 7 : Loi élastoplastique parfaite

Vitesse de déformation dans l'élément en rupture

Figure 8 : Loi de STEINBERG et GUINAN

Le tableau suivant récapitule les résultats de $\dot{\epsilon}$. On constate que la vitesse de déformation calculée dépend à la fois du code et de la loi de comportement.

Vitesse de déformation $\dot{\epsilon} \text{ (}\mu\text{s)}^{-1}$	Loi élastoplastique parfaite	Loi de STEINBERG et GUINAN
AUTODYN-2D	0,220	0,315
DYNA-2D	0,304	0,247

4.2 Irradiation par flash d'électrons

Sur les figures 9 et 10 sont présentées les vitesses de surface libre obtenues d'une part au cours du tir et d'autre part dans les calculs avec les deux codes, respectivement pour les lois de comportement élastoplastique et de STEINBERG et GUINAN. Au niveau du palier de vitesse, on observe quelques oscillations dues à la difficulté numérique de saisir l'onde de choc.

Figure 9 : Loi élastoplastique parfaite

Figure 10 : Loi de STEINBERG et GUINAN

La loi de STEINBERG et GUINAN donne des résultats plus proches de l'essai que la loi élastoplastique parfaite. De même qu'en impact de plaques, le deuxième pic de vitesse obtenu avec les codes est nettement supérieur à celui de l'interférogramme : l'amortissement des ondes est sous-estimé par le calcul.

Quant à l'épaisseur de l'écaïlle, le tableau suivant récapitule les résultats, la précision étant de l'ordre de l'épaisseur d'un élément du maillage.

Epaisseur d'écaïlle (mm)	Loi élastoplastique parfaite	Loi de STEINBERG et GUINAN	Essai Mesure avec un comparateur
AUTODYN-2D	$0,20 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,01$	0,35
DYNA-2D	$0,20 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,01$	

On observe dans ce cas une bonne cohérence entre les résultats des deux codes, à loi de comportement donnée : la rupture se produit dans le même élément. De plus, la différence entre les résultats pour les deux lois de comportement n'est pas grande, elle correspond à des éléments rompus adjacents.

Les résultats numériques obtenus sont également tout à fait compatibles avec l'évaluation par la relation $\sigma_{ec} = 1/2 C_L \cdot (t_c - t_b)$.

En revanche, la comparaison entre les résultats numériques et la mesure de l'épaisseur de l'écaïlle indique une différence importante. Pour interpréter cette différence, l'hypothèse suivante a été émise : l'écaïlle récupérée après le tir contient à l'intérieur d'autres plans de fracture qui viennent alors modifier le régime de propagation et de réflexion des ondes. Cette hypothèse pourrait être vérifiée par un examen micrographique d'une coupe de l'écaïlle. Nous avons d'ailleurs mis en évidence dans nos simulations d'autres dépassements de la valeur de tension d'écaillage affichée, à l'intérieur-même de l'écaïlle et postérieurs à la première rupture. Mais ces investigations n'ont pas été poussées dans le cadre de cette publication, car elles nécessitent d'autres expérimentations pour être étayées.

Les figures 11 et 12 représentent la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ dans l'élément en rupture, respectivement pour les lois de comportement élastoplastique et de STEINBERG et GUINAN. Le tableau suivant récapitule les résultats de $\dot{\epsilon}$. Contrairement aux résultats obtenus dans l'impact de plaques, les influences respectives des codes et des lois de comportement varient dans le même sens et les écarts sont moins importants.

Vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ (μs) ⁻¹	Loi élastoplastique parfaite	Loi de STEINBERG et GUINAN
AUTODYN-2D	1,25	1,15
DYNA-2D	1,68	1,41

Figure 11 : Loi élastoplastique parfaite
Vitesse de déformation dans l'élément en rupture

Figure 12 : Loi de STEINBERG et GUINAN
Vitesse de déformation dans l'élément en rupture

5. CONCLUSIONS

Les conclusions sont relatives à la variété de tantale décrite au §3.2.

Compte tenu des diverses valeurs de $\dot{\epsilon}$ obtenues dans les simulations, nous proposons d'en donner, pour chaque type d'essai, une valeur moyenne associée à une valeur absolue. Il est alors possible de constater que les incertitudes relatives sont inférieures à 20 %, ce qui représente un résultat très satisfaisant du point de vue industriel.

Nous mentionnons de plus, dans le tableau de synthèse suivant (en unités SI), les résultats de rupture en traction quasi-statique fournies par le fabricant [3] de ce type de tantale :

NATURE de L'ESSAI	σ_{RUPTURE} (GPa)	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)
FLASH d'ELECTRONS	9,08 ± 0,28	1,41 ± 0,27 · 10 ⁶
IMPACT de PLAQUES	5,60 ± 0,10	2,67 ± 0,48 · 10 ⁵
TRACTION QUASI-STATIQUE	0,172 ± 0,0086	[0,10 ± 0,09]

Figure 13 : Rupture en traction du tantale

Ces résultats ont également été reportés sur un diagramme log-log en figure 13. Celui-ci peut être complété par :

- d'une part, des résultats et simulations d'essais aux barres d'HOPKINSON, pour obtenir des points dans la gamme des 10³ s⁻¹,
- d'autre part, des résultats et simulations d'essais au laser impulsif, pour avoir des vitesses de déformation supérieures à celles obtenues au flash d'électrons, qui pourraient faire l'objet d'une autre communication.

Enfin, il serait intéressant d'approfondir expérimentalement et théoriquement les phénomènes de fractures à l'intérieur de l'écaïlle, afin d'améliorer la connaissance des vitesses de déformation.

REFERENCES

- [1] AUTODYN : User's manual Version 2. (Century Dynamics Incorporated 1989)
- [2] DYNA2D : User's manual for DYNA2D
An explicit two-dimensional hydrodynamic finite element code with interactive rezoning.
John O. Hallquist March, 1988 UCID 18756, Rev 3. Lawrence Livermore National Laboratory.
- [3] SOGEMET (Société Générale des Métaux) - B.P. 147 Neuilly sur Seine
Commande d'un barreau de tantale ϕ 80 mm.
- [4] W. M. Isbell ; D.R. Christman ; S. G. Babcock
Measurements of Dynamics Properties of Materials. Volume VI. Tantalum. July 70
- [5] D. J. Steinberg, S. G. Cochran and M. W. Guinan
A constitutive model for metals applicable at high-strain rate. J. Appl. Phys (153), March 1980