LES HAUTES PUISSANCES PULSEES : FORTES PRESSIONS OU GRANDES DEFORMATIONS

J. Petit, P.-Y. Chanal, B. Erzar, C. Chauvin, S. El Maï, G. Le Blanc, *CEA*, *DAM*, *GRAMAT*, *F*-46500 Gramat, France. Téléphone : 05 65 10 53 54, adresses électroniques : jacques.petit@cea.fr, *pierre-yves.chanal@cea.fr*.

Mots clés : électromagnétisme, dynamique des matériaux, équation d'état, élastoplasticité, localisations.

1 INTRODUCTION

Les études de détonique, balistique, et de formage dynamique font aujourd'hui largement appel à la simulation numérique ce qui limite les essais onéreux. La crédibilité et la précision des résultats obtenus dépendent en particulier de celles des modélisations de l'état thermodynamique et de l'élastoplasticité. Différents moyens expérimentaux utilisant de forts courants impulsionnels ont été développés ces dernières années pour élargir le domaine des essais de caractérisation et de validation. Le principe de ces installations est de créer un courant impulsionnel par la décharge de batteries de condensateurs qui peuvent être chargés jusqu'à 85 kV. Le courant délivré est de type sinusoïde amortie. La valeur maximale va de quelques MA, par exemple 3,5 MA pour la machine GEPI du CEA Gramat, à 26 MA pour la machine Z du SNL-USA et son temps de montée va de 100 ns à 5 µs. Le type de sollicitation dépend de la forme de l'outil dans lequel est concentré ce courant. Des états de déformation uniaxiale peuvent ainsi être générés avec des électrodes plates alors qu'avec des bobines ou des électrodes cylindriques il est possible d'imploser ou exploser des échantillons. Ces deux familles d'essais sont successivement présentées et illustrées par des résultats obtenus au CEA Gramat pour lesquels toutes les données expérimentales et numériques étaient disponibles.

2 ESSAIS DE DEFORMATION UNIAXIALE

Les sollicitations décrites dans ce chapitre sont dans l'ensemble comparables à celles qui peuvent être étudiées avec des essais d'impact plan (compression et écaillage) ou d'impact incliné, (cisaillement sous pression). L'intérêt est de pouvoir travailler avec des vitesses de déformation plus faibles et de pouvoir plus facilement récupérer les échantillons pour observations post mortem. L'exploitation de ces essais associe dans des proportions variables mesures et simulation numérique.

2.1 Principe

Dans les essais de déformation uniaxiale la partie terminale de l'outil est constituée de deux électrodes plates, généralement en alliage d'aluminium, de largeur w. Elles sont en court-circuit à leur extrémité et séparées par un isolant électrique (figure 1). En dehors de la zone d'analyse, l'électrode est épaisse pour garantir sa tenue mécanique. Dans la zone de l'échantillon, son épaisseur doit être réduite pour éviter la formation de choc mais suffisamment épaisse pour éviter un courant induit dans l'échantillon à étudier. Les deux électrodes, haute et basse, soumises au même courant impulsionnel, sont utilisées de façon complémentaire suivant le type d'essai en supposant, bien sûr, une parfaite symétrie de la sollicitation. Le courant I est toujours mesuré par jauge de Rogowski. Pour une électrode plate, la pression p, dite magnétique, appliquée sur la face interne est :

$$p(t) = k_{sh}(t) \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{I(t)}{w}\right)^2$$
(1)

avec k_{sh} un coefficient tenant compte des effets tridimensionnels, largeur et espacement des lignes, et μ_0 la perméabilité magnétique du vide.



Figure 1. Schéma de la configuration ligne plate.

2.2 Méthode de validation de modèles

Dans de nombreuses configurations l'essai de compression isentropique est utilisé comme test de validation avec une comparaison expérience-simulation. L'échantillon, au comportement à évaluer, est alors placé sur une électrode alors que l'autre, sans échantillon, sert à valider les conditions de simulation numérique (figure 2). C'est par exemple le cas dans l'étude de la cinétique de changement de phases de l'étain déjà exploré sous choc (Chauvin et al. 2012) et prise en exemple dans ce paragraphe.



Figure 2. Configuration générique pour une comparaison expérience – simulation.

Les essais ont été réalisés avec des fenêtres LiF. La pression imposée dans l'échantillon était de 12 GPa, pression supérieure à celle du changement de phase à l'équilibre prédit à environ 8.5 GPa. Une simulation numérique avec un changement de phases à l'équilibre ne donne pas des résultats satisfaisants (figure 3) ; l'utilisation d'une cinétique, fonction des enthalpies libres par exemple, s'avère indispensable.



Figure 3. Comparaisons expérience-simulation pour le changement de phases de l'étain.

2.3 Trajet de compression isentropique

Dans cette application, il est possible d'accéder à la contrainte et éventuellement à la limite d'écoulement élastoplastique sans utiliser la simulation numérique contrairement à l'exemple précédent. Deux échantillons d'épaisseurs différentes sont placés de part et d'autre (figure 4).



Figure 4. Configuration d'analyse lagrangienne.

Le traitement des mesures de vitesses matérielles, u_x , faites sur ces échantillons permet par analyse lagrangienne de déterminer la contrainte σ_{xx} (Cagnoux et al. 1987). Les relations utilisées pour le traitement sont :

$$d\sigma_{xx} = \rho_0 C_L(u_x) du_x, \quad d\varepsilon_{xx} = \frac{d\rho}{\rho} = \frac{du_x}{C_L(u_x)}$$
(2,3)

avec ρ_0 la masse volumique initiale et C_L la vitesse d'onde lagrangienne longitudinale du matériau échantillon. Cette dernière doit, dans ce cas d'ondes de chargement non centrées, être calculée à partir des deux enregistrements de vitesses. Par ailleurs, si des fenêtres sont utilisées, la mesure de vitesse d'interface doit être traitée pour extraire la vitesse matérielle dans l'échantillon à partir des caractéristiques des matériaux échantillon et fenêtre. Un exemple d'analyse lagrangienne avec échantillons de mortier et fenêtres SiO₂ est donné ci-dessous (figure 5) (Hereil et al. 2004) :



Figure 5. Exemple d'analyse lagrangienne.

La limite d'écoulement élastoplastique, Y, peut alors ensuite être extraite avec :

$$Y(u_{xi}) = \frac{3}{2} \rho_0 \int_0^{u_{xi}} (C_L^2(u_x) - C_K^2(u_x)) \frac{du_x}{C_L}$$
(4)

à condition de bien connaître la vitesse d'onde lagrangienne isotrope $C_K(u_x)$ en pression. Un exemple de traitement complet jusqu'à 18 GPa est donné par exemple par Asay et al. (2009).

2.4 Essais d'écaillage

La tenue à l'écaillage est depuis longtemps étudiée avec des impacts plans dissymétriques. La vitesse de déformation dans le plan d'écaillage, liée à l'étalement des faisceaux de détentes opposés reste toutefois toujours très élevée. L'utilisation des hautes puissances pulsées permet d'étudier l'écaillage à plus faible vitesse de déformation. Aucun matériau fenêtre n'est utilisé sur la ligne d'étude (figure 6) pour assurer l'écaillage et faciliter le dépouillement qui s'appuie sur les mesures et une simulation de l'essai.



Figure 6. Configuration d'essai d'écaillage.

Le traitement de l'écaillage d'une alumine AL23 pris ici en exemple (Erzar et al. 2012) est simple puisque le matériau reste en régime élastique. Deux mesures peuvent être prises sur la vitesse de surface libre de l'échantillon (figure 7) : la première décroissance de vitesse Δu_{ec} et le temps d'aller-retour d'une onde dans l'épaisseur de l'écaille Δt_{ec} .



Figure 7. Essais d'écaillage sur alumine AL23.

Dans le cas d'une mesure en surface libre et pour un matériau sollicité dans le domaine élastique la contrainte d'écaillage σ_{ec} est facilement calculée avec :

$$\sigma_{\rm ec} = \frac{1}{2} \rho_0 C_{\rm L} \Delta u_{\rm ec} \tag{5}$$

La distance entre le plan d'écaillage et la surface libre, e_{pec} , peut-être évaluée avec Δt_{ep} . Mieux, elle peut être mesurée sur l'échantillon récupéré après essai, récupération beaucoup plus facile que dans le cas d'expériences réalisées avec des lanceurs à gaz ou à poudre ; c'est un avantage appréciable des machines hautes puissances pulsées. Enfin, la vitesse de déformation dans le plan d'écaillage est déterminée par simulation MHD de l'essai à partir d' e_{pec} . Les résultats obtenus sur l'alumine AL23 montrent clairement l'effet de la vitesse de déformation sur la contrainte d'écaillage (figure 7).

2.5 Essais de cisaillement sous pression

A l'instar de l'impact incliné (Clifton et al. 1985) il est possible d'avoir partiellement accès à la limite d'écoulement élastoplastique d'un échantillon cisaillé sous pression en utilisant les hautes puissances pulsées (Alexander et al. 2010). La configuration d'essai, dénommée MAPS (Magnetically Applied Pressure Shear), est présentée ci-dessous (figure 8).



Figure 8. Configuration d'essai MAPS.

Un champ magnétique H_x , constant pendant quelques millisecondes, est d'abord appliqué à l'ensemble avec des bobines d'Helmholtz. Une fois que ce champ s'est homogénéisé dans les différents constituants, le courant impulsionnel I est appliqué. Les forces volumiques de Laplace ont alors 2 composantes f_x et f_y qui vont générer une sollicitation de compression puis de cisaillement.

Du côté de la ligne de référence, à gauche, sans échantillon, la sollicitation est transmise au matériau enclume. Une mesure de la vitesse de surface libre de cette enclume suivant x et y permet de qualifier la sollicitation imposée à condition d'utiliser un matériau enclume parfaitement connu et restant de préférence contraint dans son domaine élastique. De l'autre côté, la même sollicitation est transmise à l'échantillon qui, dans un régime de déformation plastique à faible limite d'écoulement, ne transmettra qu'une partie du cisaillement à l'enclume de droite dont la vitesse de surface libre est également mesurée suivant x et y. Les différences de vitesses des surfaces libres permettent d'estimer, au moins partiellement, la sollicitation dans l'échantillon.

Des simulations de cette expérience non encore mise en œuvre au CEA Gramat ont été faites avec le code 1D MHD Unidim pour évaluer l'expérience et les méthodes de dépouillement associées. Les conditions de calcul sont : $I_{max} = 3.2$ MA à 0.55 µs, la largeur w des électrodes en molybdène est de 40 mm, $H_x = 3.98$ MA/m ; l'épaisseur de l'échantillon en aluminium est de 0.1 mm et les enclumes sont en alumine. Les vitesses de surfaces libres des enclumes obtenues par simulation sont représentées sur la figure 9.



Figure 9. Vitesses sur les faces externes des enclumes - simulation.

De ces mesures il est possible comme dans le paragraphe 2.3 de déterminer les contraintes dans l'échantillon à partir des mesures effectuées sur l'électrode d'étude sachant qu'avec des enclumes en régime élastique linéaire la vitesse de surface libre est le double de la vitesse matérielle :

$$d\sigma_{xx} = \frac{1}{2}\rho_0 C_L |du_{xSL}| = dp + dS_{xx}$$
(6)

$$d\sigma_{xy} = \frac{1}{2}\rho_0 C_S \left| du_{ySL} \right| = dS_{xy}$$
⁽⁷⁾

avec ρ_0 , C_L et C_S respectivement masse volumique initiale et vitesses d'onde lagrangienne longitudinale et transversale du matériau enclume. Après recalage temporel pour tenir compte des différentes vitesses d'ondes, les contraintes dans l'échantillon, obtenues avec ces relations à partir des vitesses de surfaces libres sont représentées ci-dessous (figure 10).



Figure 10. Contraintes dans l'échantillon obtenues par traitement des vitesses.

Le traitement ne peut pas être prolongé par les relations du paragraphe 2.3 puisque la déformation ε_{xx} dans l'échantillon n'est pas connue. En revanche, la formule de la contrainte équivalente de Von Mises σ_{eq} est exploitable en supposant une transmission de contrainte parfaite entre l'échantillon et l'enclume :

$$\sigma_{\rm eq} = \sqrt{\frac{9}{4}S_{\rm xx}^2 + 3S_{\rm xy}^2}$$
(8)

Dès la limite élastique atteinte, la contrainte équivalente reste égale à la limite d'écoulement Y. Après avoir atteint la contrainte maximale σ_{xx} , la partie déviatoire S_{xx} va décroitre puis s'inverser. C'est-à-dire qu'a ce moment il est possible d'extraire une valeur de Y limitée à :

$$Y = \sqrt{3} S_{xy}$$
(9)

Enfin, la vitesse de déformation peut être estimée avec les mesures de vitesses transversales puis intégrée mais la déformation de l'échantillon est toujours sous-estimée car la vitesse d'interface électrode-enclume à gauche est toujours un peu inférieure à celle de l'interface électrode-échantillon à droite et par ailleurs l'épaisseur de l'échantillon n'est pas connue. Cet essai reste néanmoins un bon test de validation par comparaison expérience – simulation.

L'ensemble de matériaux électrode/échantillon/enclume doit néanmoins répondre à quelques exigences. La conductivité de l'électrode ne doit pas être trop élevée pour favoriser une homogénéisation rapide du champ initial H_x mais suffisamment élevée pour que le courant impulsionnel n'atteigne pas l'échantillon. Par ailleurs, la limite d'écoulement élastoplastique de l'échantillon doit être inférieure à celles de l'électrode et de l'enclume. Dans des conditions optimales, la contrainte de compression accessible peut être de l'ordre de 20 GPa et la vitesse de déformation de l'ordre de quelques 10^4 s^{-1} (Alexander et al. 2010).

2.6 Impact plan

Même si le principal intérêt des hautes puissances pulsées est d'obtenir des compressions quasiisentropiques, il est néanmoins possible de générer des ondes de choc à faible coût. La partie amincie en épaisseur par le lamage est « poinçonnée » et, côté ligne d'étude, impacte l'échantillon initialement décollé de l'électrode (figure 11). La mise en vitesse est identique sur les deux électrodes. La mesure coté électrode de référence permet donc de connaitre la vitesse à l'impact du coté ligne d'étude.



Figure 11. Configuration d'impact.

Cette configuration présente néanmoins une difficulté : la connaissance de l'état de l'impacteur ainsi généré. En effet, l'électrode est partiellement vaporisée-liquéfiée par effet Joule sur sa face interne. C'est-à-dire que le temps de maintien sous pression maximale de l'échantillon peut être drastiquement réduit puis la détente plus étalée par dilatation de l'épaisseur initiale.

Dans l'exemple traité dans ce paragraphe (Lefrançois et al. 2011), les électrodes et la cible étaient en alliage d'aluminium 2017A-T4. La vitesse d'interface échantillon/ fenêtre LiF est bien restituée par simulation MagnétoHydroDynamique avec le code 1D Unidim (figure 12). La mise en vitesse de la cible par un impacteur de même épaisseur initiale que l'électrode mais resté à l'état solide, comme le prédirait la formule (1), a été ajoutée sur cette figure pour évaluer l'influence du changement d'état induit par effet Joule.



Figure 12. Mise en vitesse de la cible sous impact.

Dans cette configuration Seagle et al. (2013) ont d'abord impacté un échantillon d'étain pour le mettre en fusion puis, sous l'action du courant toujours présent, l'ont soumis à une compression quasi-isentropique subséquente. Des vitesses d'impact de l'ordre de 45 km/s avec des impacteurs en aluminium, inaccessibles aux lanceurs conventionnels, peuvent être atteintes dans cette configuration (machine Z SNL-Sandia, Lemke et al. 2011).

3 ESSAIS EN CONFIGURATION CYLINDRIQUE

Les configurations d'essais cylindriques développés sur les machines à haute puissance pulsée sont voisines des essais d'implosion de tubes (Nesterenko et al. 1989) ou d'expansion d'anneaux (Johnson et al. 1963) pyrotechniques. L'avantage d'une sollicitation électromagnétique est de s'affranchir des effets plus ou moins importants d'une mise en vitesse par explosif sur l'état des matériaux et bien sûr d'éviter les contraintes liées à l'utilisation d'explosifs.

3.1 Implosion cylindrique

L'installation Cyclope du CEA Gramat a été initialement mise au point pour l'étude du comportement élastoplastique des matériaux à grande vitesse de déformation (Petit et al. 1997). La partie terminale, outil, est dans ce cas un inducteur monospire dans lequel le tube échantillon est comprimé par un champ magnétique axial (figure 13). Si le matériau échantillon est un mauvais conducteur électrique, il doit être gainé, de cuivre par exemple. L'induction est mesurée par Bdot. L'évolution du diamètre intérieur est suivie par caméra à balayage de fente ou par interférométrie laser et la circularité est contrôlée par caméra à images intégrales, circularité indispensable pour une exploitation numérique 1D. Les dimensions génériques d'un tube échantillon sont : $\emptyset_{ext} = 20$ mm et longueur 100 mm, l'épaisseur étant ajustée en fonction de la vitesse d'implosion souhaitée.



Figure 13. Configuration d'implosion avec champ magnétique axial.

Cet essai est un test de validation par comparaison expérience-simulation MHD. La déformation peut atteindre 1.5 avec des matériaux ductiles et la vitesse de déformation quelques 10^4 s⁻¹. Il permet ainsi d'évaluer une extrapolation des modèles au-delà du domaine accessible aux barres d'Hopkinson et en particulier de tester l'existence d'une viscosité additionnelle prise en compte dans certaines modélisations élastoplastiques au-delà de 10^3 s⁻¹ (Petit 2010).



Figure 14. Exemple d'évaluation de la modélisation élastoplastique d'un cuivre.

Des localisations de la déformation plastique et même des ruptures peuvent par ailleurs être observées sur les échantillons facilement récupérés après essai. Cela a permis de tester différentes méthodes susceptibles de reproduire numériquement ces phénomènes de localisation (figure 15, Petit 2010).



Figure 15. Rupture d'un tube TA6V4 en implosion.

3.2 Expansion cylindrique

Avec un aller-retour de courant coaxial placé à l'intérieur d'un échantillon tubulaire, il est possible de tester des matériaux, en particulier fragiles, en expansion (figure 16). Le courant est mesuré par jauge de Rogowski. La vitesse d'expansion est mesurée par interférométrie sur la face externe d'une gaine en acier de faible épaisseur assurant la réflexion laser et le confinement du mortier pour permettre une analyse post mortem.



Figure 16. Configuration d'expansion cylindrique.

Un tube de mortier MR30A7 dont la modélisation est en cours de développement a ainsi été testé : $Ø_{int} = 12 \text{ mm}$, $Ø_{ext} = 43 \text{ mm}$ et longueur = 200 mm. L'impulsion de mise en vitesse atteint 1 GPa. Une comparaison expérience-simulation est présentée ci-dessous (figure 17). La compaction est bien restituée par la simulation 1D MHD, pas la détente. Elle confirme la difficulté à modéliser un mortier, sa compaction, ses modules élastiques, l'influence de la pression sur le déviateur, la prise en compte de l'hygrométrie, ...



Figure 17. Modélisation de l'expansion d'un tube de mortier.

3.3 Expansion d'anneaux

Cette application, probablement la plus connue des applications électromagnétiques, a été développée depuis de nombreuses années pour l'étude des localisations et ruptures en tension (Niordson 1965, Walling et al. 1973, Grady et al. 1983, Gourdin et al. 1989). Dans les versions plus récentes, l'échantillon est placé autour d'une bobine dans laquelle est déchargé le courant (figure 18). L'anneau-échantillon a un diamètre intérieur de l'ordre de 35 mm et une section de 1 à quelques mm². L'utilisation d'un anneau « pousseur d'échantillon », non représenté sur la figure, évite un échauffement par effet Joule complexe dans l'échantillon, échauffement hétérogène rendant difficile l'exploitation numérique de l'essai. Il permet de plus de mettre en vitesse des échantillons non conducteurs. La vitesse d'expansion de l'anneau peut être enregistrée par interférométrie laser. Les courants sont mesurés par jauges de Rogowski. Les fragments peuvent facilement être récupérés dans un matériau de faible densité pour déterminer leur distribution en masse.



Figure 18. Schéma de principe de l'expansion d'anneau électromagnétique (Gourdin et al. 1989).

Ce type d'essai est très utilisé pour alimenter à moindre coût des modélisations analytiques de fragmentation de type Mott, reprises en particulier par Grady (2006) et de très nombreuses études numériques sur la localisation et le traitement de la rupture (voir par exemple Pandolfi et al. 1999). Une observation par caméra à images intégrales est indispensable pour détecter le temps d'apparition des strictions et des ruptures. Un exemple est donné sur la figure 19 (El Maï 2014).



Figure 19. Exemple de visualisation d'un anneau de cuivre en expansion.

4 CONCLUSION

Les moyens expérimentaux utilisant de forts courants impulsionnels permettent d'explorer les domaines de haute pression hors état de choc en configuration de déformation uniaxiale et les grandes déformations à grandes vitesses de déformation en configuration d'implosion et d'expansion. Ces moyens et leurs diagnostics associés sont toujours en développement pour comprendre leur fonctionnement, les rendre reproductibles et fiables et enfin étendre encore leurs domaines de sollicitation. Des systèmes de préchauffage de l'échantillon peuvent ainsi permettre de travailler sur la resolidification sous compression. Des électrodes ont par ailleurs été conçues avec des largeurs variables pour appliquer des pressions graduées sur les échantillons. Ces développements s'appuient de plus en plus sur les simulations numériques MagnétoHydroDynamiques réalisées avec des codes de calcul allant du 1D au 3D permettant d'optimiser la forme des outils et de mieux comprendre les relations entre électromagnétisme et mécanique.

REFERENCES

- Alexander C. S., Asay J. R., Haill T. A., "Magnetically applied pressure-shear: A new method for direct measurement of strength at high pressure", J. Appl. Phys. 108, 126101 (2010).
- Asay J. R., Ao T., Vogler T. J., Davis J.-P., Gray III G. T., "Yield strength of tantalum for shockless compression to 18 GPa", J. Appl. Phys. **106**, 073515 (2009).
- Cagnoux J., Chartagnac P., Hereil P., Perez M., "Lagrangian analysis. Modern tool of the dynamics of solids" Ann. Phys. Fr. **12**, pp 451-524 (1987).
- Chauvin C., Petit J., Sinatti F., "Polymorphic transition of tin under shock wave compression: Experimental results", EPJ Web of Conferences **26** EDP Sciences pp 01026-p.1-01026-p.5 (2012).
- Clifton R. J., Klopp R. W., "Pressure-Shear Plate Impact Testing", Metals Handbook, Ninth Edition, **8**, pp 230-239 (1985).
- El Maï S., "Etude du développement des instabilités dans un anneau en expansion dynamique », thèse de l'université de Lorraine, 28 avril (2014).
- Erzar B., Buzaud E., "Shockless spalling damage of alumina ceramic", Eur. Phys. J. Special Topics **206**, 71-77 (2012).
- Gourdin W. H., Weinland S. L., Boling R. M., "Development of the electromagnetic launched expanding ring as a high-strain-rate test technique", Rev. Sci. Instrum. **30** (3) pp 427-432 March (1989).
- Grady D., Fragmentation of Rings and Shells The Legacy of N.F. Mott, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2006).
- Grady D. E., Benson D. A., "Fragmentation of Metals Rings by Electromagnetic Loading", Experimental Mechanics 23 pp 393-400 December (1983).
- Héreil P.-L., Avrillaud G., "GEPI : an ICE generator for dynamic material studies", 55th Meeting of the Aeroballistic Range Association (ARA), Freiburg, Germany, September 27-October 1 (2004).
- Johnson P. C., Stein B. A., Davis R. S., "Measurement of dynamic plastic flow stress properties under uniform stress", Symposium on Dynamic Behavior of Material, ASTM Special Technical Publication n°336, pp 195-207 (1963).
- Lefrançois A., Chanal P.-Y., Le Blanc G., Petit J., Avrillaud G., Delchambre M., "High-Velocity Flyer-Plate Developments on Two High-Pulsed-Power Generators Based on a Strip-Line Design (GEPI and CEPAGE)", IEEE Transactions on Plasma Science, **39** (1) January pp 288-293 (2011).
- Lemke R. W., Knudson M. D., Davis J.-P., "Magnetically driven hyper-velocity launch capability at the Sandia Z accelerator", Int. J. Impact Engineering 38 pp 480-485 (2011).
- Nesterenko V. F., Lazaridi A. N., Pershin S. A., "Deformation localization in copper during explosive compression of hollow cylinders", Fiz. Goren. Vzryva **25** (4) pp 154-155 (1989).
- Niordson F. I., "A Unit for Testing Materials at High Strain Rates", Experimental Mechanics 5 (1) pp 29-32 (1965).
- Pandolfi A., Krysl P., Ortiz M., "Finite element simulation of ring expansion and fragmentation: The capturing of length and time scales through cohesive models of fracture", Int. J. of Fracture, 95 pp 279-297 (1999).
- Petit J., Alexeev Y. A., Ananiev S. P., Kazeev M. N., "The Electromagnetic Cylindrical Compression: A Tool to Test Behavior Modeling under Large Strain at High Strain Rate", J. Phys. IV FRANCE 7, Colloque C3, Supplément au Journal de Physique III pp C3-109 C-114 (1997).
- Petit J. "An Approach to Generate Random Localizations in Lagrangian Numerical Simulations", Ch. 14 in Materials under Extreme Loadings, Eds Buzaud E, Ionescu R., Voyiadjis G. Z., ISTE & Wiley (2010).
- Seagle C. T., Davis J.-P., Martin M. R., Hanshaw H. L., "Shock-ramp compression: Ramp compression of shock-melted tin" Appl. Phys. Lett. **102**, 244104 (2013).
- Walling H. C., Forrestal M. J., "Elastic-Plastic Expansion of 6061-T6 Aluminum Rings", AIAA Journal 11 (8) pp 1196-1197 August (1973).