



**HAL**  
open science

# Utilisation de forts courants impulsionnels pour l'étude du comportement des matériaux

Jacques Petit, Pierre-Yves Chanal

► **To cite this version:**

Jacques Petit, Pierre-Yves Chanal. Utilisation de forts courants impulsionnels pour l'étude du comportement des matériaux. CFM 2009 - 19ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2009, Marseille, France. hal-03390783

**HAL Id: hal-03390783**

**<https://hal.science/hal-03390783>**

Submitted on 21 Oct 2021

**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.

# Utilisation de forts courants impulsionsnels pour l'étude du comportement des matériaux

J. PETIT, P.-Y. CHANAL

Centre d'Etudes de GRAMAT, BP 80200, 46500 GRAMAT.

## Résumé :

Divers moyens expérimentaux utilisant de forts courants impulsionsnels ( $3 < I < 5 \text{ MA}$ ) à haute fréquence ( $50 < f < 500 \text{ kHz}$ ) ont été développés ces dernières années au Centre d'Etudes de Gramat (CEG). Ils permettent d'explorer des domaines de sollicitations inaccessibles aux moyens d'essais conventionnels. En configuration plane une pression de 90 GPa peut être atteinte en régime de déformation uniaxiale sans onde de choc. En configuration cylindrique des déformations de 1,5 et des vitesses de déformation de  $10^5 \text{ s}^{-1}$  peuvent être atteintes dans le cas de matériaux ductiles.

## Abstract :

Different experimental facilities using high impulsional currents ( $3 < I < 5 \text{ MA}$ ) with high frequencies ( $50 < f < 500 \text{ kHz}$ ) have been set up last years at Centre d'Etudes de Gramat (CEG). They cover solicitation fields non attainable with conventional experimental devices. With the strip line configuration, a 90 GPa pressure is achieved with uniaxial deformation without shock formation. With the cylindrical configuration, strain of 1.5 and strain rate of  $10^5 \text{ s}^{-1}$  may be achieved on ductile materials.

**Mots clefs :** électromagnétisme, dynamique des matériaux, équation d'état, comportement élasto-plastique, compression isentropique

## 1 Introduction

Les études de détonique, balistique ou de formage dynamique font aujourd'hui largement appel à la simulation numérique. La crédibilité et la précision des résultats obtenus dépendent en grande partie de celles des modélisations utilisées pour déterminer l'état thermodynamique et le seuil de plasticité des matériaux utilisés pendant ces processus. Différents moyens expérimentaux utilisant de forts courants impulsionsnels ont été développés ces dernières années à l'étranger (ex. Z-Machine, SNL-USA [1]) et au centre d'études de Gramat pour répondre à ces incertitudes. Les caractéristiques et quelques exemples de résultats significatifs sont brièvement présentés pour deux moyens représentatifs des installations du CEG.

## 2 Moyen d'essai de déformation uniaxiale

### 2.1 Description du moyen et des diagnostics

L'installation GEPI a été mise au point pour l'étude des matériaux en compression axiale [2]. Ses caractéristiques électriques sont données dans la figure 1. La partie terminale (outil) est composée de lignes plates séparées par un isolant (figure 1). La « pression magnétique » maximale accessible sur la face interne de ces lignes est de l'ordre de 90 GPa avec un courant de 3,3 MA et une largeur de ligne  $w$  de 6 mm. Les lignes plates peuvent être fabriquées directement à partir du matériau à étudier ou avec un matériau conducteur de référence bien connu (Al, Cu). Elles sont généralement assez épaisses pour leur garantir une bonne tenue mécanique. En revanche, l'épaisseur dans la zone d'analyse est réduite par lamage pour éviter une trop forte réduction du temps de montée en pression en allant de la face interne à la surface externe d'analyse. Les échantillons disponibles en dimensions réduites, non conducteurs ou de propriétés électriques mal connues, ... sont placés dans le lamage de lignes faites en matériau de référence. Les mesures mise en œuvre sur cette installation sont la mesure de courant et des mesures optiques faites directement sur la

surface externe de l'échantillon ou au travers d'un matériau fenêtre (vitesse ou déplacement par interférométrie laser, température par pyrométrie infrarouge multi-longueur d'ondes, ...).

capacité du banc de condensateurs	: 19	$\mu$ F
tension de charge des condensateurs	: 85	kV
énergie électrique disponible	: 70	kJ
courant maximal	: 3,5	MA
fréquence du courant	: 500	kHz

Principales caractéristiques

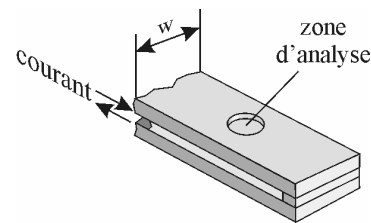


Schéma de l'outil

FIG. 1 – Installation GEPI.

Il est à noter qu'une utilisation autre que celle de compression quasi-isentropique est actuellement en développement sur les installations du CEG. La zone d'analyse d'épaisseur réduite (voir figure 1) finit par être comme poinçonnée. Elle devient ainsi un impacteur haute vitesse permettant de générer cette fois des pressions de choc supérieures à celles atteintes par des lanceurs de laboratoire à gaz ou à poudre. Un échantillon d'aluminium de 6 x 6 mm et d'épaisseur initiale 0.4 mm (0.04 g) a ainsi été projeté à une vitesse de plus de 10 km/s, ouvrant des perspectives nouvelles dans le domaine des impacts hypervitesse [2].

## 2.2 Exemple de résultats

La possibilité de mettre un échantillon sous forte pression dynamique sans formation d'onde de choc permet d'explorer des caractéristiques de compressibilité (p,v), de température, de seuil d'écoulement plastique, de rupture par écaillage ou encore de cinétique de transformation solide-solide ou solide-liquide avec des trajets de compression quasi-isentropiques. Un exemple d'analyse lagrangienne publiée par Hereil [3] est présenté sur la figure 2. Pour cette expérience deux échantillons de micro-bétons d'épaisseurs différentes ont été placés sur les deux lignes plates opposées. L'analyse lagrangienne faite à partir des 2 mesures de vitesses synchronisées permet de retracer la courbe de compressibilité quasi-isentropique sans même à avoir à exploiter la mesure de courant associée.

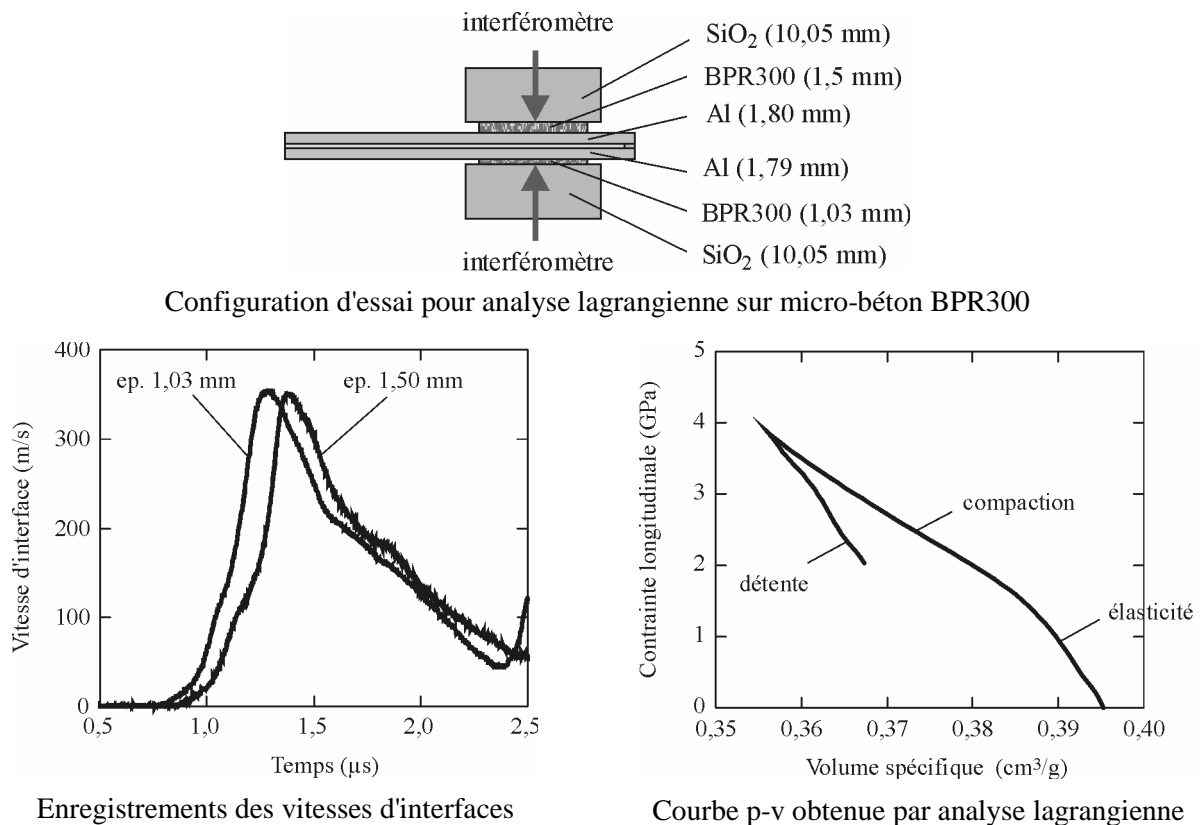


FIG. 2 – Exemple d'essai et traitement sur installation GEPI [3].

### 3 Moyen d'essai en configuration cylindrique

#### 3.1 Description du moyen et des diagnostics

L'installation Cyclope a été mise au point pour l'étude du comportement élastoplastique des matériaux en déformation plane [4, 5, 6]. Ces caractéristiques électriques sont données sur la figure 3. La partie terminale (outil) peut-être soit un inducteur dans lequel le tube échantillon est comprimé par un champ magnétique axial (figure 3) soit directement 2 électrodes cylindriques entre lesquelles un tube échantillon peut être implosé ou explosé par un courant. Les essais exploitables permettent d'atteindre au mieux des déformations de 1.5 et des vitesse de déformations de  $10^5 \text{ s}^{-1}$  dans le cas de matériaux ductiles et en partant de tubes éprouvettes de diamètre 20 mm et d'épaisseur 1 mm. Dans cette configuration les échantillons peuvent être monocouche, intégralement réalisés à partir du matériau d'étude, ou bicouches avec un matériau d'étude gainé d'un tube conducteur bien connu. Le courant est systématiquement mesuré sur chaque expérience puis suivant les cas et les configurations d'essai : des mesures d'induction magnétique et des mesures optiques : une caméra fente pour l'enregistrement du diamètre en fonction du temps, une caméra à images intégrales pour contrôler la circularité et enfin des interféromètres laser pour mesurer la vitesse ou le déplacement quand les surfaces sont accessibles.

capacité du banc de condensateurs	: 480	$\mu\text{F}$
tension de charge des condensateurs	: 25	kV
énergie électrique disponible	: 150	kJ
courant maximal	: 5	MA
fréquence du courant	: 45	kHz

Principales caractéristiques

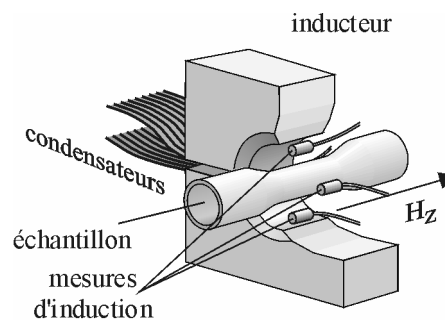


Schéma de l'outil champ axial

FIG. 3 – Installation Cyclope.

#### 3.2 Exemple de résultats

Le comportement en grande déformation à haute vitesse de déformation est inaccessible aux moyens de caractérisation habituels. Il ne peut donc qu'être extrapolé à partir des données acquises par des moyens conventionnels. Le moyen d'essai Cyclope permet de tester par exemple les modèles de saturation de contrainte en grande déformation ou encore les modèles de viscosité additionnelle à très grande vitesse de déformation. Un exemple de comparaison expérience-calcul est présenté à partir d'une mesure de diamètre en fonction du temps sur la figure 4 (échantillon de cuivre)[7]. Un deuxième exemple est présenté sur la figure 4. Les mesures par caméra à images intégrales offrent la possibilité d'évaluer des simulations de localisations de la déformation plastique dans une section (échantillon de TA6V4 gainé de cuivre)[8].

### 4 Conclusion

Les moyens expérimentaux utilisant de forts courants impulsifs permettent d'explorer les domaines de haute pression hors état de choc en configuration plane et les domaines de grande déformation à haute vitesse de déformation en configuration cylindrique inaccessibles aux moyens d'étude courants. Ces moyens et leurs diagnostics associés sont toujours en développement pour comprendre leur fonctionnement, les rendre reproductibles et fiables puis optimiser leur utilisation. Ces développements s'appuient de plus en plus sur les simulations numériques Magnéto-Hydro-Dynamiques réalisées avec des codes de calcul allant du 1D au 3D qui permettent d'analyser les relations entre électromagnétisme et mécanique [9, 10].

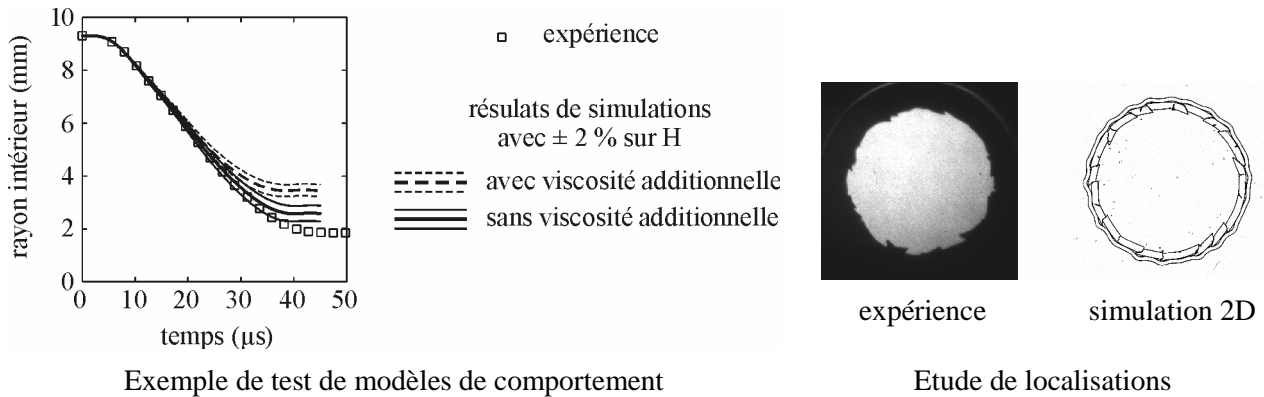


FIG. 4 – Exemples de résultats Cyclope et des simulations correspondantes.

## References

- [1] Asay, J. R., Some new developments in shock physics diagnostics, 54<sup>th</sup> Meeting of the Aeroballistic Range Association (ARA), Santa-Fe, New-Mexico, October 20-24, 2003.
- [2] Héreil P.-L., Lasalle F., Avrillaud G., GEPI : un générateur de rampe de compression pour l'étude du comportement dynamique des matériaux et la génération de projectiles hypervéloces, H.D.P. Symposium V (Tome II), Saint-Malo, France, 2003.
- [3] Héreil P.-L., Avrillaud G., GEPI : an ICE generator for dynamic material studies, 55<sup>th</sup> Meeting of the Aeroballistic Range Association (ARA), Freiburg, Germany, September 27-October 1, 2004.
- [4] Petit J., Alexeev Yu.A., Anan'yev S.P., Kazeev M.N., Compression of metallic tubes in pulsed high magnetic fields to test behaviour modelling at high strain rate, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. MEGAGAUSS, pp 569-576, 1997.
- [5] Alexeev Y., Kazeev M., Petit J. Halgand A., Metallic tubes compression in pulsed high magnetic field in z-current geometry with high level of symmetry, Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. MEGAGAUSS, pp 199-124, 2004.
- [6] Petit J., Alexeev Yu.A., Ananiev S.P., Kazeev M.N., Kozlov V.F., Tolstov Yu.S., Megagauss Level Expansion Tool to Study, , Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. MEGAGAUSS held in U.K., 2006.
- [7] Petit J., Dequiedt J.L., Halgand A., Sadou Y., Synthèse du travail de modélisation du cuivre avec prise en compte des effets de choc, Rapport CEG S2002-00131.
- [8] Petit J., Première approche de la localisation aléatoire en simulation numérique lagrangienne, Rapport CEG S2002-00131.
- [9] Le Blanc G., Héreil P.-L., Chanal P.-Y., L'Eplattenier P., Avrillaud G., Laporte P., Ramp wave compression in a copper strip line : comparison between numerical simulations (LS-DYNA<sup>®</sup>) and experimental results (GEPI device), 10th International LS-DYNA<sup>®</sup> Users Conference, June 8-10, 2008
- [10] Le Blanc G., Petit J., Chanal P.-Y., L'Eplattenier P., Modelling the dynamic magneto-thermo-mechanical behaviour of materials by means of multi-phases EOS, 7<sup>th</sup> European LS-DYNA<sup>®</sup> Conference, 2009.