

# Compression isentropique sur SPHINX

■ T. D'ALMEIDA - F. LASSALLE - A. MORELL - J. GRUNENWALD - F. ZUCCHINI - A. LOYEN / CEA – Gramat

L'installation SPHINX du CEA Gramat est un générateur de haute puissance pulsée de la classe 6 MA, 1 $\mu$ s, principalement dédié à la production de rayonnement X pour les études de durcissement de systèmes stratégiques. Dans ce mode de fonctionnement, l'impulsion de courant permet l'implosion d'une colonne de plasma par striction magnétique (Z-pinch). Cet article présente une nouvelle configuration où le champ magnétique créé par l'impulsion de courant génère la compression quasi-isentropique d'un tube métallique (liner). Pour optimiser ce régime de fonctionnement, l'impulsion de courant est mise en forme par un dispositif compact, logé sous vide en sortie du générateur. Ce dispositif, nommé DLCM (pour «*Dynamic Load Current Multiplier*») est décrit. Une synthèse des résultats issus d'une série de tirs réalisés sur un liner cylindrique en aluminium est présentée.

Le développement récent de la technique utilisant un champ magnétique pulsé pour la réalisation d'expériences de compression isentropique (*ICE*, pour *Isentropic Compression Experiments*) [1,2] présente un intérêt considérable pour de nombreuses applications : sciences des matériaux, géophysique, astrophysique, recherche sur la fusion par confinement inertiel, etc.

Le CEA – Gramat est un des précurseurs de cette technique, avec notamment le développement d'un générateur dédié, nommé GEPI [2] (classe 4 MA, 500 ns). Le présent article décrit les études préliminaires destinées à analyser les potentialités de l'installation SPHINX pour ce type d'expériences de compression isentropique. Ces études sont mises à profit pour explorer de nouvelles configurations expérimentales actuellement non couvertes par le générateur GEPI : charges planes remplacées par des charges cylindriques, durées de rampe plus importantes, profils de rampe mis en forme par un dispositif compact, le DLCM [3], inséré entre le générateur et la charge.

## Description du dispositif

Le principe de fonctionnement de ce dispositif, basé sur le schéma d'un autotransformateur, permet théoriquement de doubler le courant au niveau de la charge. Dans notre cas, cet autotransformateur fonctionne sous vide et sa grande compacité (diamètre 200 mm, hauteur 100 mm) permet d'obtenir la multiplication de courant (d'un facteur 1,1 à 1,9) sans modification de l'architecture du générateur. Une autre particularité essentielle de ce dispositif est l'extrudeur de flux qui permet d'optimiser le transfert du courant

vers la charge. À la différence d'un autotransformateur classique, l'impédance de l'extrudeur du DLCM est variable, ce qui permet la mise en forme du courant. Pratiquement, cet extrudeur de flux dynamique (EFD) est formé par un réseau cylindrique de fils qui implose sous l'effet de l'impulsion de courant. Les expériences décrites ci-après sont les premières applications concrètes de ce dispositif DLCM novateur, qui permet à la fois une augmentation d'amplitude et une mise en forme du courant injecté dans la charge. L'impulsion du courant et l'épaisseur de la charge sont choisies de manière à empêcher la transformation de l'onde de contrainte en onde de choc à l'intérieur de la charge, tout en préservant la surface interne dans l'état solide sur l'échelle de temps expérimentale.

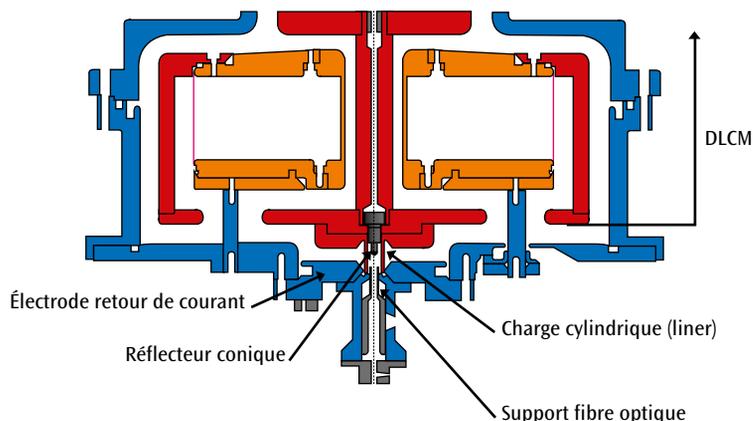


Figure 1. Coupe 2D du dispositif expérimental.

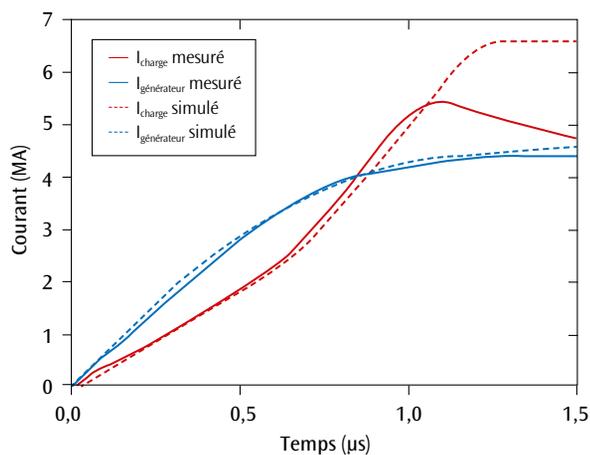


Figure 2. Profils de courant simulés et mesurés.

La **figure 1** représente schématiquement la configuration expérimentale. La partie supérieure est constituée des électrodes du DLCM et du réseau de fils de l'EFD. La charge cylindrique consiste en un liner en aluminium (hauteur 16 mm, rayons externe et interne, respectivement, de 5 mm et 3 mm) directement connecté à la sortie du DLCM et formant une ligne coaxiale avec l'électrode de retour de courant. Des mesures électriques (capteurs B-dot et bobines de Rogowski) sont implantées en divers points critiques du système. La vitesse d'implosion de la surface interne du liner est mesurée à l'aide d'un dispositif d'interférométrie laser Doppler hétérodyne [4].

### Résultats et discussion

La **figure 2** montre un exemple de mesures électriques obtenues en entrée du DLCM et dans la charge ICE, ainsi que les profils de courant simulés à l'aide d'un modèle de circuit équivalent dans le code MHD GORGON [5].

La vitesse de la surface interne du liner en implosion est extraite par traitement des signaux bruts issus de l'interféromètre. La **figure 3** montre, pour un tir, le profil de vitesse ainsi mesuré jusqu'à 1,17  $\mu$ s, instant au-delà duquel le signal est fortement altéré. Ce profil de vitesse est comparé au profil simulé dans le code hydrodynamique UNIDIM à partir du courant mesuré dans la charge. On observe un bon accord sur l'intervalle de temps d'acquisition du signal. Une analyse détaillée de ces résultats est présentée dans la référence [6].

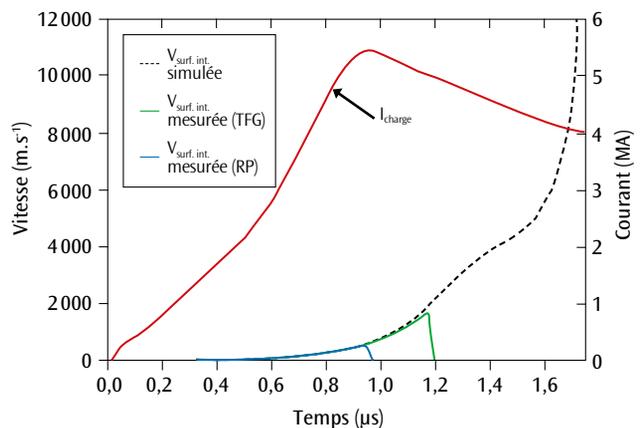
### Conclusion

Une technique de chargement a été développée pour les expériences de compression isentropique sur l'installation SPHINX. Elle utilise la mise en forme de l'impulsion de courant issue du générateur par le DLCM. Les diagnostics électriques implantés ont permis un suivi optimal de la circulation du courant à travers le DLCM, ainsi qu'une mesure précise du courant circulant dans la charge

de géométrie cylindrique. La mesure *in situ* de la vitesse de la surface interne du liner sur une portion significative de sa trajectoire durant son implosion est en bon accord avec les simulations effectuées à l'aide du courant expérimental mesuré dans la charge. Cette technique pourrait s'étendre à des applications telles que l'étude d'instabilités d'implosion de liners sous grandes vitesses de déformation.

Une évolution du DLCM, également à l'étude au laboratoire, consiste à rajouter en sortie du dispositif un commutateur à fermeture destiné à réduire le front de montée du courant dans la charge. S'il est validé, ce mode de fonctionnement permettra une amélioration des performances du générateur SPHINX en termes d'amplitude du courant délivré (5 MA  $\rightarrow$  6 à 8 MA), de durée du front de montée (1  $\mu$ s  $\rightarrow$  200 à 300 ns) et de profil (type sinus  $\rightarrow$  type «exponentiel»).

Figure 3. Profils de vitesse d'un liner en aluminium mesurés (extrait par Transformée de Fourier Glissante – TGF – et Repliement de Phase – RP) et simulé à partir du courant expérimental.



## Références

- [1] C. HALL, "Isentropic compression on the Sandia Z accelerator", *Phys. Plasmas*, 7, 2069 (2000).
- [2] P. L. HEREIL *et al.*, *GEPI: an ICE generator for dynamic material characterization and hypervelocity impact*, in *Shock Compression of Condensed Matter-2003*, edited by M. D. Furnish *et al.*, 1209 (2004).
- [3] A. S. CHUVATIN, "Dynamic Current Multiplier", 14<sup>th</sup> Symposium on High Current Electronics, Tomsk, Russia, p. 232-235 (2006).
- [4] O. T. STRAND *et al.*, "Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques", *Rev. Sci. Instrum.*, 77, 083108 (2006).
- [5] J. P. CHITTENDEN *et al.*, "X-ray generation mechanisms in three-dimensional simulations of wire array Z-pinches", *Plasm. Phys. Controlled Fusion*, 46, B457 (2004).
- [6] T. D'ALMEIDA *et al.*, "Microsecond ramp compression of a metallic liner driven by a 5 MA current on the SPHINX machine using a Dynamic Load Current Multiplier pulse shaping", *Phys. Plasmas*, 20, 092512 (2013).