

# Optimisation de sources X intenses de type Z-pinch couplées au générateur fort courant SPHINX

Le CEA - Gramat a conçu et mis au point un système unique et original pour la production de rayonnements X intenses dans la gamme spectrale du keV. Ces travaux comprennent le développement du générateur de Hautes puissances pulsées (HPP) SPHINX et des sources rayonnantes Z-pinch associées. Le moyen SPHINX est la seule machine Z-pinch au monde conçue à partir de la technologie LTD (Linear Transformer Driver), et délivre une impulsion de courant de 8 MA en  $1 \mu\text{s}$ , soit un temps de montée 10 fois plus long que les machines Z-pinch employées jusqu'alors. Cet aspect a nécessité une démarche systématique de caractérisation et d'optimisation du couplage générateur-charge Z-pinch. Le présent article présente les différentes étapes de cette démarche d'optimisation et donne les performances obtenues.

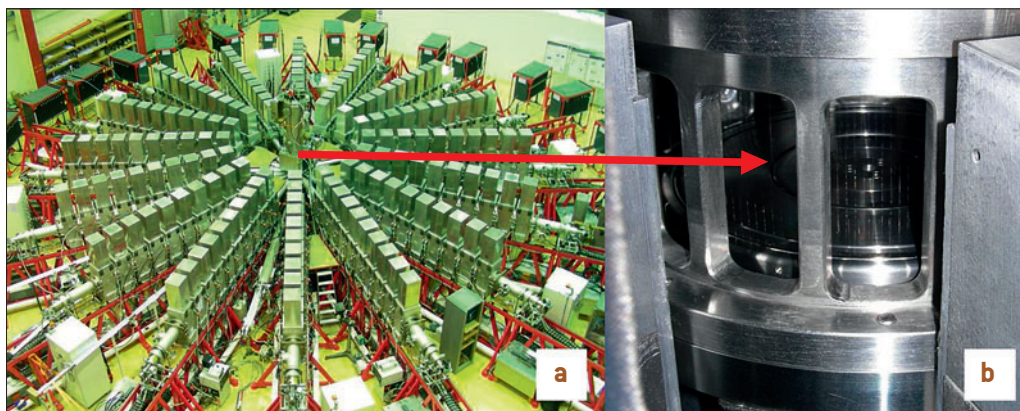
H. Calamy • F. Lassalle • J. Grunenwald • F. Zucchini CEA - Gramat

Une source Z-pinch repose sur l'implosion d'un cylindre de matière ionisée par les forces de Lorentz créées par l'injection dans ce cylindre d'une forte impulsion de courant délivrée par un générateur HPP. Le générateur SPHINX permet de produire des rayonnements X intenses dans des gammes spectrales allant des XUV à 10 keV en utilisant des sources tungstène, aluminium ou argon [1]. Pour les deux premières, la charge est constituée initialement par un réseau cylindrique de quelques centaines de fils métalliques fins (diamètre de l'ordre de la dizaine de  $\mu\text{m}$ ).

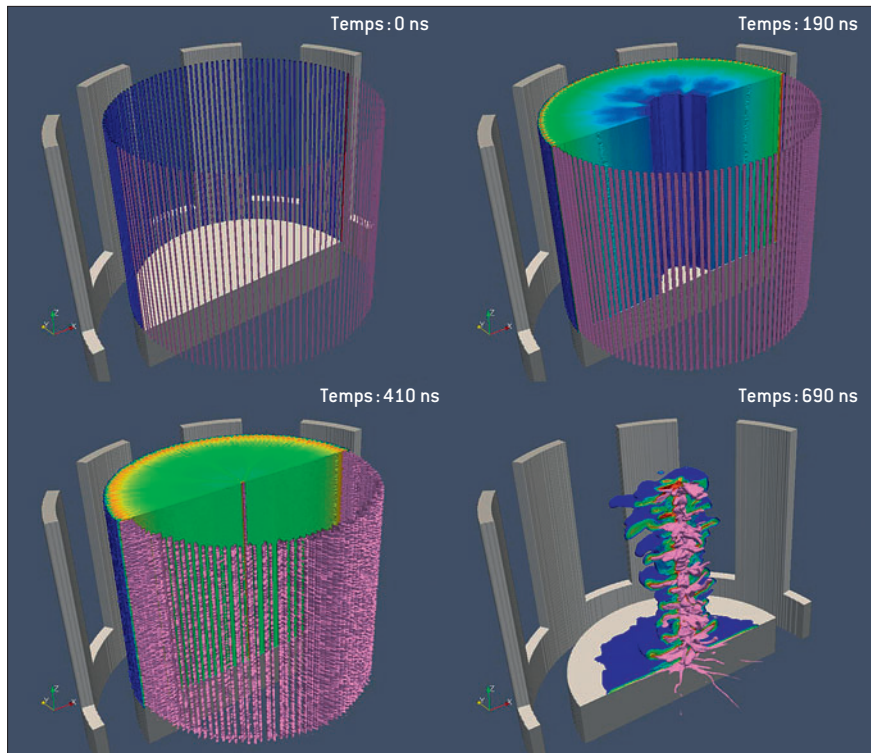
La machine SPHINX (figure 1) repose sur la technologie LTD et fait suite au développement au CEA - Gramat [2] d'étages présentant un front de montée de  $1 \mu\text{s}$ . L'architecture comprend 16 lignes de 10 étages LTD, connectées à la charge terminale au moyen de lignes coaxiales sous vide utilisant l'isolement magnétique. La technologie LTD- $1 \mu\text{s}$  permet, grâce aux composants faiblement inductifs et résistifs développés (condensateurs

et éclateurs), de délivrer une impulsion de courant intense sur une charge de faible impédance, sans dispositif de compression temporelle de l'impulsion. Le seul fluide isolant utilisé est de l'air sec à pression atmosphérique. SPHINX stocke une énergie de 2,2 MJ, délivre 8 MA en  $1 \mu\text{s}$  sur charge adaptée et est la seule installation Z-pinch au monde intégralement basée sur cette technologie LTD. De par ce choix technologique, la machine est ainsi compacte, robuste, modulaire et également plus sûre et plus facile d'emploi (maintenance). La contrepartie réside dans le travail nécessaire de stabilisation de l'implosion des charges Z-pinch soumises à ce front de montée long.

Le fonctionnement d'une charge Z-pinch à fil (figure 2) est mieux connu depuis le début des années 2000 grâce aux données issues de diagnostics plus performants et à l'apport des simulations numériques en magnétohydro-dynamique (MHD) radiative 3D [3]. La modélisation s'attachant uniquement aux problèmes d'instabilités MHD se développant lors de l'implosion d'un cylindre creux de



**Figure 1.**  
**(a)** Vue générale de l'installation SPHINX – Générateur 8 MA,  $1 \mu\text{s}$  utilisé pour des expérimentations Z-pinch – Encombrement :  $\varnothing 16 \text{ m}$ , hauteur 3 m ;  
**(b)** Charge Z-pinch à réseau de fils placée au centre du générateur.



**Figure 2.** Simulation MHD 3D de l'implosion d'une charge Z-pinch à réseau de fils.

La géométrie des électrodes et la disposition des fils sont présentées. Les isocontours de densité en représentation logarithmique sont scindés en deux parties (5 valeurs de  $10^{-4}$  g/cc à 1 g/cc pour le fond et uniquement les fortes densités 1g/cc pour le reste).

Les différentes étapes de l'implosion sont présentées: la situation initiale, l'effet de la phase d'ablation (190 ns) avec la réorganisation du profil de densité, le départ de l'implosion (410 ns) et la phase de stagnation avec la formation de la colonne rayonnante soumise aux instabilités MHD (690 ns).

matière ionisée est insuffisante. L'effet de la phase dite d'initiation (quelques ns) est à prendre en compte: celle-ci crée au niveau de chaque fil un système constitué d'un cœur froid et dense entouré par une couronne de plasma chaud (10 eV) peu dense ( $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  g/cc). Le courant injecté circule préférentiellement dans la couronne du fait du ratio des résistivités cœur/couronne. Les forces de Lorentz jouent sur la couronne de chaque fil et injectent continuellement le plasma de celles-ci vers l'axe du système, tandis que le cœur s'échauffe sous l'effet du rayonnement UV de la couronne nourrissant ainsi celle-ci. Cette phase, dite d'ablation, est la plus longue de l'expérience (40 à 70% du temps d'implosion) et organise le profil de densité depuis la position initiale des fils jusqu'à l'axe du système. Une fois ce régime d'ablation terminé, l'implosion proprement dite se déroule et crée sur l'axe une colonne de plasma dense et chaud (densité de quelques g/cc, température électronique de  $T_e = 700$  eV), stable pendant 10 à 20 ns (on parle de stagnation) qui libère son énergie sous forme de rayonnement X.

L'optimisation du rendement de conversion de l'énergie stockée en rayonnement X utile (10 à 25% sur SPHINX) implique une maîtrise du régime d'ablation et des instabilités (Rayleigh-Taylor) durant l'implosion. Pour la production de rayonnement de couche K, il est d'autre part apparu qu'un niveau de développement raisonnable des instabilités était nécessaire: la colonne rayonnante finale consiste ainsi en une succession selon l'axe  $z$  de points chauds et denses fortement comprimés où la matière est suffisamment ionisée pour produire le spectre de raie K recherché. L'utilisation conjointe de la simulation numérique et de tests expérimentaux a permis d'identifier les paramètres conditionnant la phase d'ablation et donc

l'optimisation du profil de densité limitant le développement des instabilités.

Il était cependant crucial d'obtenir une homogénéité axiale de l'implosion par un travail de contrôle de la phase d'initiation (la fin de celle-ci correspond aux conditions initiales des simulations MHD). Une technique [4], consistant à injecter avant l'arrivée du courant principal une faible impulsion de quelques kA avec un temps de montée de quelques  $\mu$ s, a été développée pour obtenir un claquage le long des fils avant fusion (claquage lié aux impuretés). Ceci modifie les conditions de contact fils-électrodes et la topologie du champ électrique au niveau du réseau de fils.

Les expériences réalisées avec ce pré-conditionnement conduisent ainsi à des implosions axialement homogènes et à l'augmentation des niveaux de puissances rayonnées d'un facteur 7. Les performances atteintes sont respectivement 500 kJ, 16 TW, 15 ns pour une source Z-pinch tungstène (rayonnement  $< 1$  keV) et 28 kJ, 0,6 TW, 25 ns pour une source Z-pinch aluminium (rayonnement  $> 1$  keV).

## RÉFÉRENCES

- [1] F. ZUCCHINI *et al.*, "First argon gas puff experiments with 500 ns implosion time on SPHINX driver", AIP Conf. Proc., 1088, p. 247-250 (2009).
- [2] F. LASSALLE *et al.*, "Status on the Sphinx machine based on the microsecond LTD technology", *IEEE Trans. on Plasma Sciences*, **36**(2), Part 1, p. 370-377 (2008).
- [3] H. CALAMY *et al.*, "Peculiarities of microsecond wire array Z-pinch on Sphinx machine", *IEEE Trans. Plasma Sciences*, **34**, 2279 (2006).
- [4] H. CALAMY *et al.*, "Use of microsecond current prepulse for dramatic improvements of wire array Z-pinch implosion", *Phys. Plasmas*, **15**, 012701 (2008).