Tirs double coquille sur « Z » à Sandia National Laboratories

P. L'Eplattenier et R.B. Spielman*

DT/HP, Centre d'Études de Gramat, 46500 Gramat, France

* Sandia National Laboratories, MS 1194, P.O. Box 5800, Albuquerque, New Mexico 87185, U.S.A.

Résumé: Un des problèmes fondamentaux lors d'une implosion du type « Z-pinch », est le développement d'instabilités, notamment du type Raileigh-Taylor. Des résultats analytiques et numériques prévoient que certains profils de densité initiale permettent de réduire considérablement la croissance de telles instabilités. Un premier pas vers de tels profils initiaux, utilisant la technique de cage d'écureuil largement expérimentée à Sandia National Laboratories, NM, USA, est l'utilisation de doubles cages d'écureuil imbriquées l'une dans l'autre. Une série de tirs à double coquille ont donc été réalisés sur le générateur « Z » de la Sandia, et ont permis un accroissement de la puissance pic rayonnée de l'ordre de 40% par rapport à des coquilles simples.

1. INTRODUCTION

Le principe de base d'un « Z-pinch », ou plasma sous striction magnétique [1] est d'imploser un cylindre de plasma en faisant passer un courant au travers de celui-ci, engendrant une pression magnétique centripète. L'énergie magnétique de ce courant est transformée en énergie cinétique du cylindre, puis lors de sa stagnation sur l'axe, en énergie interne, et énergie rayonnée, sous forme de rayonnement X principalement. Le générateur « Z » à Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, est un générateur à puissance pulsée capable de délivrer dans une charge Z-pinch un courant de 20 MA avec un temps de montée de l'ordre de 100 ns. C'est à l'heure actuelle le générateur le plus puissant au monde. Lors d'une expérience Z-pinch sur Z, les plasmas obtenus à la stagnation sont typiquement à des densités de l'ordre de 10^{20} particules/cm³ et des températures de l'ordre de quelques centaines d'eV. Ils forment un cylindre de 1 à 2 cm de haut, et de quelques mm de diamètre. Ces plasmas émettent entre 1 et 2 MJ de rayonnement X, sous forme d'une impulsion de quelques ns de largeur à mi-hauteur, soit des puissances crête rayonnées de l'ordre de 200 TW. Le spectre de ce rayonnement dépend beaucoup de l'élément constitutif du pinch, et varie entre un spectre de raies pour des éléments à faible Z comme l'aluminium, à un spectre quasiment planckien, à une centaine d'eV, pour des éléments à fort Z comme le tungstène. Le pinch est constitué initialement par une « cage d'écureuil » cylindrique de quelques cm de diamètre et de 1 à 2 cm de hauteur, formée de plusieurs centaines de fils de quelques microns de diamètre.

Une limitation importante dans la puissance rayonnée provient du développement d'instabilités du type Raleigh-Taylor lors de l'implosion du pinch. De nombreux résultats analytiques et numériques ont montré que certains profils initiaux de densité (densité en fonction de r) permettent de limiter considérablement le développement de telles instabilités. Une première étape vers de tels profils, utilisant la technique de cage d'écureuil, est de prendre comme condition initiale deux cages concentriques.

2. DÉFINITION DES PARAMÈTRES

Même en prenant une condition initiale relativement simple constituée de 2 coquilles concentriques, il reste un certain nombre de paramètres à fixer: les rayons initiaux, masses,

éléments constitutifs, et nombre de fils de chaque coquille, ainsi que la hauteur de l'ensemble. Nous avons travaillé avec du tungstène qui avait été utilisé abondamment auparavant pour des tirs simple coquille. Les autres paramètres ont été fixés en partant du tir simple coquille réalisé sur Z ayant eu la plus forte puissance rayonnée à cette date (tir Z51), obtenu après une optimisation des masses, diamètre initial, nombre de fils constitutifs et hauteur de la coquille. La coquille initiale pour ce tir avait une hauteur de 2cm, un diamètre initial de 4cm, et était constituée de 240 fils de $7.5\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre, correspondant à une masse totale de 4.09 mg.

Nous sommes donc partis de cette coquille comme coquille extérieure pour nos expériences, en laissant toutefois le diamètre des fils constitutifs (et donc la masse de la coquille) comme un paramètre libre. La coquille extérieure avait donc 2 cm de hauteur, 4 cm de diamètre initial, et était constituée de 240 fils de tungstène. Les dimensions de la coquille intérieure ont été fixées principalement par des considérations de faisabilité technique de la charge: son diamètre initial devait être assez petit pour loger à l'intérieur de la coquille extérieure, avec de la place pour les barres de soutien présentes lors de la construction, du transport et de l'installation de la charge dans la machine, et en même temps assez grand pour pouvoir être elle même construite. Le compromis trouvé fut un diamètre initial de 2 cm. On a alors pris 120 fils constitutifs pour garder l'espacement entre fils identique entre les coquilles intérieure et extérieure. Enfin, la hauteur de la coquille intérieure fut prise égale à 2 cm, comme celle de la coquille extérieure. Une fois ces paramètres fixés, les deux seuls paramètres libres restant étaient les diamètres des fils constitutifs de chacune des coquilles, ou encore la masse totale de chacune des coquilles. Ces deux paramètres sont en fait liés entre eux par une relation traduisant un temps d'implosion constant de l'ensemble correspondant au meilleur couplage de la charge avec le générateur Z. Typiquement, le temps d'implosion doit être légèrement supérieur au temps de montée du courant. Si l'on augmente la masse de la coquille interne, on doit en même temps diminuer celle de la coquille externe. La relation entre ces 2 masses est montrée sur la figure 1, ainsi que les points correspondants aux 4 tirs réalisés. Ceux-ci ne satisfont pas exactement au critère de temps d'implosion donné, car les fils ne sont disponibles qu'en certains diamètres, mais ils sont néanmoins suffisamment près de cette courbe pour que la différence de temps d'implosion entre les tirs n'ait pas d'influence sur leurs résultats.

Figure 1: Masses des coquilles internes et externes pour les 4 tirs double coquille. La relation entre les masses correspondant à un temps d'implosion donné est également représentée.

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les 4 tirs indiqués sur la figure 1 ont donc été effectués. Plusieurs diagnostics étaient placés autour du pinch, dont un réseau de détecteurs XRD, un réseau de détecteurs PCD, et des caméras pinholes résolues en temps. La puissance rayonnée a été reconstruite à partir des données des détecteurs XRD.

Le premier constat fut que, mis à part pour le tir Z143 avec une coquille interne de masse très élevée, l'ensemble des tirs double coquille ont donné des meilleurs résultats en terme de puissance rayonnée que le tir simple coquille de référence (tir Z51). Le meilleur tir de la série a été le tir Z140, correspondant à un rapport des masses entre coquille interne et coquille externe de 1/3, avec pour ce tir, un accroissement de l'ordre de 40% de la puissance maximale rayonnée par rapport au tir Z51. Il est à noter que cet accroissement de la puissance pic rayonnée est du plus à une diminution de la largeur à mi-hauteur du pic de rayonnement qu'à une augmentation de l'énergie totale rayonnée. Cette largeur à mi hauteur est passée de 7 ns pour Z51 à 2.5 ns pour Z140. Les figures 2 et 3 montrent le courant délivré à la charge, ainsi que la puissance rayonnée en fonction du temps, pour les tirs Z51 et Z140 respectivement. La figure 4 représente la puissance pic rayonnée en fonction du rapport des masses entre la coquille interne et la coquille externe. L'augmentation de la puissance rayonnée par l'ajout d'une deuxième coquille semble bien provenir d'une plus grande stabilité de l'implosion, comme le montrent les images des caméras pinholes en fin d'implosion.

Figure 2: Courant délivré par le générateur et puissance rayonnée en fonction du temps pour le tir Z51.

Figure 3: Courant délivré par le générateur et puissance rayonnée en fonction du temps pour le tir Z140.

Figure 4: Puissances pic rayonnées en fonction du rapport masse coquille interne/masse coquille externe pour les 4 tirs double coquille, plus le tir de référence (tir Z51).

4. CONCLUSION

Cette série d'expériences menées en collaboration entre le Centre d'Etude de Gramat et le Sandia National laboratories, ont apporté de très bonnes nouvelles quant à l'utilisation de charges Z-pinch à profil de densité initiale complexe, pour un accroissement de la puissance rayonnée. Cet accroissement semble bien provenir d'une stabilisation de l'implosion par la présence de la coquille interne. Le succès de cette première série d'expériences ouvre la voie à de nombreuses autres expériences avec différents profils de densité. D'autres types de charges Z-pinch sont également testées à la Sandia, et très prochainement au Centre d'Etudes de Gramat, où dans le cadre du projet « Syrinx », un générateur à puissance pulsée délivrant 10 MA avec un temps de montée de quelques centaines de ns est en cours d'étude actuellement.

Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe des hautes puissances pulsées au CEG, ainsi que l'ensemble du personnel du Pulsed Power Sciences Center à Sandia National laboratories, sans lesquels ces expériences n'auraient pas eu lieu.

Référence

1. N.R. Pereira, J. Davis, J. Appl. Phys. **64** (3), August 1988