

Simulations sur processeurs graphiques d'impulsions laser nanosecondes

L. BERGÉ - G. COLIN DE VERDIÈRE - S. MAUGER / CEA-DAM Île-de-France
S. SKUPIN / Institut Max Planck, Dresden & Université Friedrich-Schiller, Jena, Allemagne

Les processus d'auto-focalisation et de rétrodiffusion Brillouin sont responsables de dommages dans les optiques des lasers de puissance comme le Laser Mégajoule (LMJ). La compréhension et la maîtrise de ces processus nécessitent des codes numériques 3D dont les calculs sont maintenant accélérés par des processeurs graphiques.

Le LMJ doit délivrer des impulsions nanosecondes dont la puissance excède le térawatt ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). En traversant les hublots de la chambre d'expérience, ces impulsions peuvent générer des phénomènes singuliers, comme l'auto-focalisation optique qui produit des cellules de lumière micrométriques de très forte intensité appelées « filaments ». Cette dynamique force l'onde laser incidente (onde de pompe) à croître en intensité sur plusieurs ordres de grandeur et à se fragmenter en temps en structures extrêmement piquées, dont la durée peut être réduite à quelques centaines de femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Cette filamentation conduit à l'endommagement des verres de silice. En outre, la pression exercée au sein du matériau produit des ondes acoustiques sur lesquelles diffuse une partie de l'énergie laser par diffusion Brillouin stimulée. Une seconde onde électromagnétique (onde Stokes) est alors créée, se propage en direction opposée à celle de l'onde de pompe [1] et est source de dommages en face avant du hublot.

L'algorithme décrivant ces dynamiques singulières est un code parallèle appelé « SBS_3D ».

À partir de données d'entrée (longueur totale de propagation, forme de l'impulsion), le code intègre deux équations de type Schrödinger non linéaires, l'une pour la composante avant de l'onde laser, l'autre pour sa composante rétrodiffusée, couplées à une troisième équation décrivant l'émission d'ondes acoustiques. Typiquement, une résolution spatiale de l'ordre du micron et un pas en temps proche de 10 fs sont requis pour résoudre correctement l'auto-focalisation. Pour des impulsions de quelques nanosecondes, le maillage usuel est en général $256 \times 256 \times 4096$ dans l'espace (x, y, z) pour des calculs parallèles exploitant sur 4 jours 128 processeurs CPU (Central Processing Unit). Ceci correspond à des pas en espace de $4 \mu\text{m}$ et un incrément en temps de 60 fs.

La figure 1a illustre la propagation des deux ondes laser et Stokes dans 5 cm de silice dans ces conditions. La courbe bleue représente l'intensité maximale d'une onde de pompe modulée en phase; la courbe verte illustre celle de l'onde Stokes rétrodiffusée. Ces intensités croissent du $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ à plusieurs $\text{TW}\cdot\text{cm}^{-2}$ sur quelques mm [2]. Ici le maillage limite la croissance de l'onde de pompe,

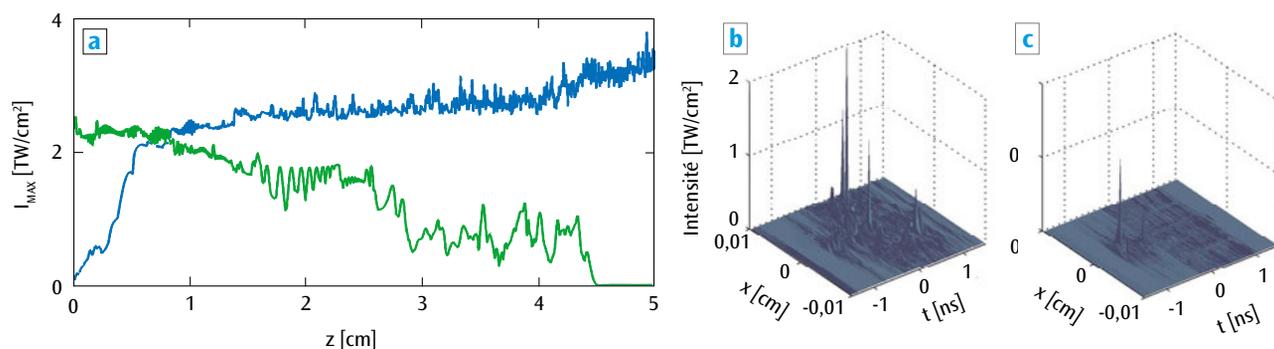


Figure 1. (a) : Intensité maximale d'une impulsion laser de 2,5 ns modulée en phase opérant à 355 nm dans 5 cm de silice et celle de son onde Stokes. La courbe bleue représente l'onde de pompe; la courbe verte illustre l'onde Stokes rétrodiffusée. Profils d'intensité dans le plan (x, t) à la distance $z = 2,34$ cm pour l'onde de pompe laser (b) et l'onde Stokes (c).

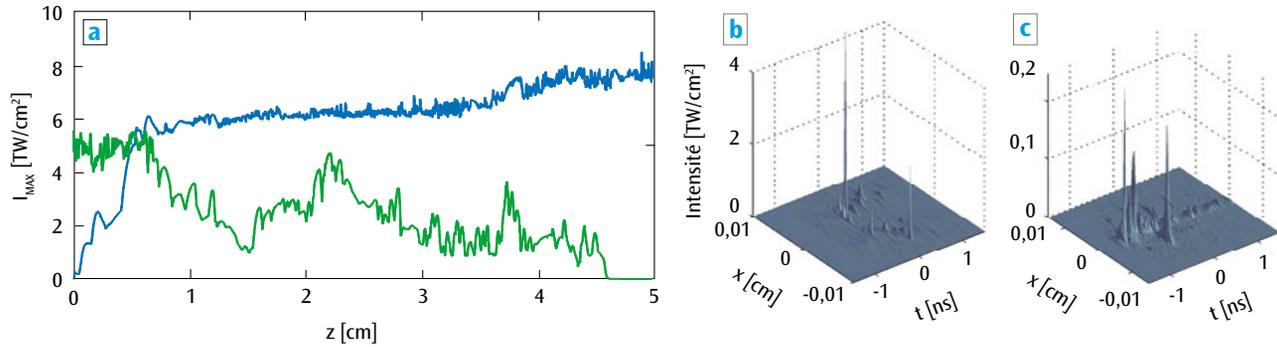


Figure 2. (a) : Calcul GPU pour l'onde de pompe (courbe bleue) et l'onde Stokes (courbe verte) produites par l'impulsion nanoseconde simulée en figure 1. Profils d'intensité dans le plan (x,t) de l'onde de pompe (b) et de l'onde Stokes (c) à $z = 2,34$ cm. La résolution graphique est limitée à 9 ps.

avant que la production d'un plasma puisse apparaître à des intensités laser approchant $7 \text{ TW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Les figures 1b et 1c montrent des filaments grossièrement résolus avec le maillage précédent. Améliorer ces résultats nécessite de doubler le nombre de points en (x, y, z, t) , ce qui revient à multiplier par 16 le nombre de CPU pour achever le même calcul en des temps comparables. Une alternative est alors d'exploiter les processeurs graphiques GPU (*Graphics Processing Unit*) pour accélérer le code.

Le code SBS_3D/CUDA

Un GPU est constitué d'un grand nombre d'unités de traitement qui travaillent en parallèle. Pour l'utiliser de manière optimale, un code doit favoriser des traitements intensifs et limiter les transferts de données avec les CPU. Le code SBS_3D a donc été réécrit pour exploiter la pleine puissance des cartes graphiques.

Nous avons adapté le code SBS_3D/CPU à l'architecture CUDA (*Computer Unified Device Architecture*), de sorte que seuls des transferts de données imposés par la décomposition en domaines soient nécessaires. Pour évaluer les performances du code GPU, deux types de tests ont été effectués : l'un de «strong scaling» (décroissance du temps de traitement à nombre d'unités de traitement croissant pour un problème de taille donnée), l'autre de «weak scaling» (préservation du temps de traitement pour un problème de taille croissant avec le nombre d'unités de traitement). Ces tests ont été réalisés sur la partition hybride de la machine Titane du CCRT (Centre de calcul de recherche et technologie). En configuration «strong scaling», le code CUDA présente un facteur d'accélération proche de 10. En configuration «weak scaling», les facteurs d'accélération restent excellents : de 12,4 à 9,6. De meilleurs gains sont obtenus pour des maillages lourds impliquant une exploitation optimale de la mémoire GPU.

Amélioration des résultats physiques

Nous avons finalement utilisé 128 processeurs graphiques de la machine Titane, afin d'améliorer les résultats précédents. L'impulsion laser commentée en figure 1 a été de nouveau simulée en doublant la résolution dans toutes les dimensions avec $512 \times 512 \times 8192$ points. Les résultats de calcul ont été obtenus sur 4 jours, soit le temps requis pour une simulation CPU avec une résolution 16 fois plus faible. Ces résultats sont résumés sur la figure 2. Par comparaison avec la figure 1, on observe que le calcul sur GPU permet de repousser le seuil de saturation imposé artificiellement par le maillage à des valeurs d'intensité supérieures à $7 \text{ TW} \cdot \text{cm}^{-2}$, pour lesquelles une ionisation du milieu peut physiquement apparaître. Les profils des figures 2b et 2c montrent que la distribution des filaments change avec la résolution : plus élevée, celle-ci améliore la physique décrite.

En conclusion, nous avons adapté un code numérique parallèle aux processeurs graphiques en employant une architecture CUDA. L'utilisation des GPU promet des facteurs d'accélération supérieurs à 10, permettant de réaliser des simulations avec des maillages 16 fois plus importants en des temps d'exécution comparables.

Références

- [1] R. W. BOYD, *Nonlinear Optics*, Academic Press, San Diego (1992).
- [2] S. MAUGER, L. BERGÉ, S. SKUPIN, "Controlling the stimulated Brillouin scattering of self-focusing nanosecond laser pulses in silica glasses", *Phys. Rev. A*, **83**, 063829 (2011).
- [3] S. MAUGER, G. COLIN DE VERDIÈRE, L. BERGÉ, S. SKUPIN, "GPU accelerated fully space and time resolved numerical simulations of self-focusing laser beams in SBS-active media", *J. Comput. Phys.*, **235**, p. 606-625 (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2012.10.034>.