

L'augmentation de l'intensité des impulsions laser ultra-courtes pour des applications médicales

Petrisor Gabriel Bleotu

*Extreme Light Infrastructure-Nuclear
Physics (ELI-NP)
Magurele, Roumanie
gabriel.bleotu@eli-np.ro*

Gerard Mourou

*Institut Polytechnique
de Paris
Palaiseau, France
gerard.mourou@polytechnique.edu*

Klaus M. Spohr

*Extreme Light Infrastructure-Nuclear
Physics (ELI-NP)
Magurele, Roumanie
klaus.spohr@eli-np.ro*

Emilia Rebeca Matache

*Extreme Light Infrastructure-Nuclear
Physics (ELI-NP)
Magurele, Roumanie
emilia.matache@eli-np.ro*

Jonathan Wheeler

*Laboratoire d'optique
appliquée
Palaiseau, France
jonathan.wheeler@polytechnique.edu*

Daniel Ursescu

*Extreme Light Infrastructure-Nuclear
Physics (ELI-NP)
Magurele, Roumanie
daniel.ursescu@eli-np.ro*

Résumé — Les systèmes laser à haute puissance permettent de générer des impulsions ultra-intenses et ultra-courtes grâce à la post-compression, augmentant significativement leur intensité. Cette avancée facilite la production de neutrons via les interactions laser-matière et leur utilisation en thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT), une méthode prometteuse de traitement du cancer. La BNCT exploite les propriétés uniques des neutrons pour cibler les cellules tumorales tout en préservant les tissus sains. Cet article examine l'optimisation et l'efficacité des impulsions laser post-comprimées pour améliorer davantage la production de neutrons et leur application en BNCT, mettant en lumière le rôle important des technologies laser.

Mots-clés — Lasers à haute puissance, thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT)

I. INTRODUCTION

Même avec les développements récents des impulsions laser à haute énergie et ultra-courtes [1, 2], voire même du laser de classe Exawatt proposé [3], un grand défi demeure pour développer davantage la technologie et ses applications. Les systèmes laser à haute puissance de crête peuvent être utilisés pour ouvrir la voie à une meilleure compréhension de la physique fondamentale, de la science des matériaux et pour développer davantage les applications médicales. Dans la poursuite de ces applications multiples, un objectif majeur est l'augmentation de la puissance de crête maximale atteignable par les systèmes laser développés dans le monde entier.

La post-compression basée sur la Compression à Film Mince (TFC) [4] apparaît comme une méthode peu coûteuse et efficace pour augmenter la puissance de crête des impulsions femtosecondes (fs) existantes vers la limite fondamentale d'un seul cycle de leur longueur d'onde porteuse. Cette méthode a été proposée comme un raccourci pour la transformation des lasers de classe TW en lasers de classe PW. La méthode TFC émerge comme la voie la plus fiable pour atteindre des durées d'impulsions inférieures à 10 fs pour les systèmes laser à haute puissance, pour les systèmes laser PW et 10 PW existants.

L'interaction des lasers à haute puissance avec la matière permet la production de neutrons épithermiques via des processus non linéaires et hautement énergétiques. Lorsqu'une impulsion laser ultra-intense interagit avec un matériau cible approprié, elle génère des températures et des pressions extrêmement élevées, créant des conditions propices aux réactions nucléaires. Par exemple, l'accélération des ions par laser peut produire des ions à haute énergie qui entrent en collision avec des noyaux cibles spécifiques, entraînant l'émission de neutrons.

En sélectionnant soigneusement le matériau cible et les paramètres du laser, tels que l'intensité, la durée de l'impulsion et la taille de la tache focale, le spectre énergétique des neutrons émis peut être ajusté pour favoriser la gamme épithermique. Ces neutrons, dont les énergies sont typiquement comprises entre 1 eV et 10 keV, sont particulièrement précieux pour des applications comme la thérapie par capture de neutrons au bore (BNCT) [5], où leur profondeur de pénétration et leurs caractéristiques d'interaction sont optimisées pour cibler les tissus cancéreux. Par conséquent, l'augmentation de l'intensité de crête en raccourcissant la durée de l'impulsion entraînera un nombre plus élevé de neutrons, nécessaires pour la méthode BNCT.

Ce travail explore une méthode de post-compression qui repose sur le contrôle précis de la modulation de phase auto-induite utilisée ici pour augmenter la bande passante de l'impulsion laser, ainsi que sur le contrôle de la compensation nécessaire de la dispersion de retard de groupe des impulsions à large bande (voir Figure 1).

L'accent de notre travail résidera dans une exploration approfondie de l'interaction entre les impulsions laser de haute intensité et les milieux transparents minces afin de générer des impulsions ultra-courtes, proches du cycle unique. Leur utilisation ultérieure dans des processus tels que l'interaction lumière-matière [3] permettra la production de neutrons, offrant l'alternative la plus sûre pour le traitement du cancer.

II. METHODE

La post-compression repose sur deux principes fondamentaux : la gestion de la dispersion et l'optique non linéaire, incluant les non-linéarités (n_2) et la modulation de phase auto-induite. Ces paramètres ont été explorés en profondeur afin de comprendre comment les impulsions laser peuvent être intentionnellement modulées pour obtenir un élargissement contrôlé. La forme temporelle de l'impulsion est ensuite définie par le système de gestion de la dispersion, un composant clé pour atteindre le régime à cycle unique.

Les matériaux optiques utilisés pour l'élargissement spectral ont fait l'objet d'une caractérisation complète, prenant en compte des propriétés essentielles pour ce travail. La caractérisation a été centrée sur les mesures effectuées à la longueur d'onde centrale $\lambda = 800$ nm, typique de la plupart des lasers Ti:Sapphire, y compris ceux utilisés dans cette étude.

La modulation de phase auto-induite (SPM) est un processus non linéaire basé sur la variation de l'indice de réfraction (n_0) en fonction de l'intensité (I) lorsqu'un faisceau intense se propage dans le milieu ($n = n_0 + n_2 * I$). En d'autres termes, la variation de

l'indice de réfraction avec l'irradiance incidente induit une modulation de phase dans le temps pour chaque composante fréquentielle de l'impulsion. La réponse du milieu introduit un décalage de phase à l'onde incidente, entraînant la génération de nouvelles fréquences. La réponse non linéaire varie selon les matériaux, en fonction de leur composition chimique, ce qui conduit à des indices de réfraction non linéaires distincts influençant la génération de SPM.

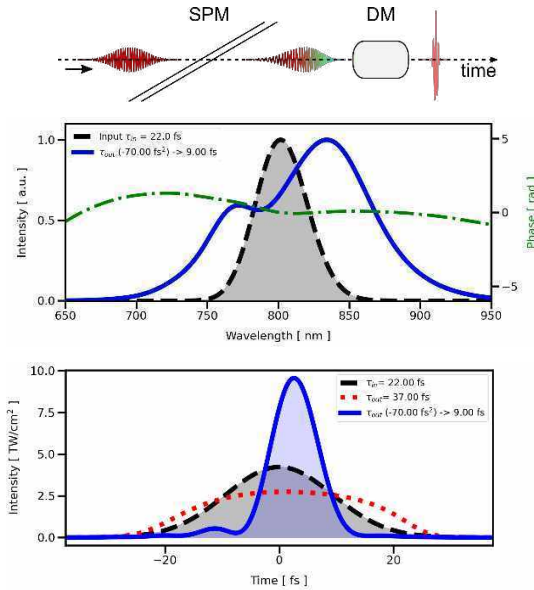


Figure 1. Méthode expérimentale (Thin Film Compression) où une impulsion laser ultra-intense (~ 25 fs) interagit avec un matériau transparent. Cette interaction génère une série de nouvelles fréquences qui, après passage dans le système de dispersion (DM), produiront des impulsions de durées bien plus courtes. La courbe noire en pointillés représente la forme spectrale et temporelle initiale, tandis que celle en bleu montre le résultat final. Figure tirée de la référence [1].

III. RESULTATS

Avant d'augmenter l'intensité, une caractérisation complète de plusieurs matériaux a été réalisée. La caractérisation linéaire comprenait des mesures relatives à la dispersion (Dispersion des Retards de Groupe - GDD, Dispersion d'Ordre Trois - TOD, et phase spectrale), à la transmission, à la rugosité de surface, à la compatibilité sous vide et aux distorsions du front d'onde. La caractérisation non linéaire inclut la mesure de l'indice de réfraction non linéaire et du seuil de dommage induit par laser [6,7]. Les données temporelles, spectrales, les pertes énergétiques ainsi que le couplage spatio-temporel ont été étudiés.

Nous présentons ensuite les résultats les plus significatifs dans le domaine temporel où, en utilisant une seule étape de compression, 2 mm de verre BK7 et 1 J d'énergie, nous avons réussi à mesurer une durée d'impulsion stable d'environ 11 fs lorsque les ordres supérieurs de dispersion ont été compensés (voir Figure 2).

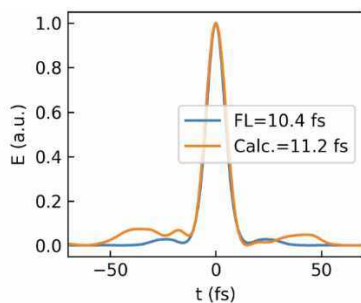


Figure 2. Durée d'impulsion mesurée (calc.) après la compensation des ordres supérieurs de dispersion.

Ce résultat indique que la méthode est adaptée à des applications nécessitant stabilité et répétabilité. Avec une dispersion optimisée, les ordres supérieurs de phase spectrale ont été efficacement compensés, atteignant une durée d'impulsion proche de sa limite de Fourier (FL).

Cette expérience offre plusieurs avantages significatifs, notamment la métrologie de l'augmentation de l'intensité au foyer et une caractérisation complète (temporelle, spectrale, spatiale et des couplages spatio-temporels) des impulsions laser post-comprimées.

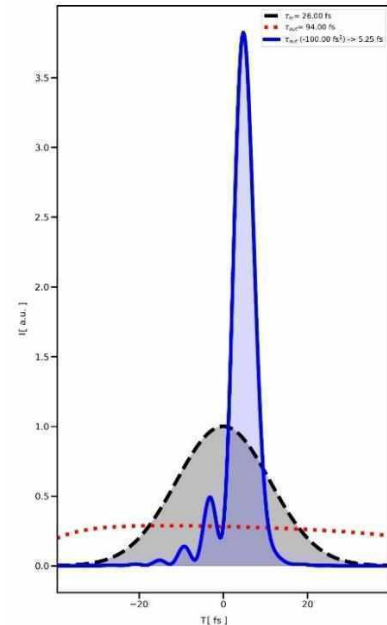


Figure 3. Durée d'impulsion (τ) estimée (bleu) après la propagation des impulsions laser incidentes (pointillé noir) et après leur passage à travers le matériau pour une énergie incidente de 2 J. Cette figure met en évidence le potentiel de réduire la durée par un facteur 4, ce qui équivaut à une augmentation de l'intensité par un facteur 4.

Dans ce travail, nous avons démontré une durée moyenne d'impulsion de 11 fs avec une énergie d'entrée de 1 J sur 100 tirs. Les résultats des simulations, combinés aux mesures spectrales, suggèrent une durée d'impulsion inférieure à 6 fs lorsque 2 J d'énergie d'entrée sont utilisés (voir Figure 3), correspondant à la pleine capacité du faisceau laser de 100 TW d'ELI-NP.

Cette expérience représente l'une des approches les plus proches du régime à cycle unique au niveau joule jamais rapportées avec des données expérimentales. En plus de mesurer les impulsions de 11 fs et de prédire une durée de 6 fs, cette expérience inclut également une analyse détaillée et approfondie de la métrologie des impulsions laser, dépassant tous les rapports précédents dans ce domaine.

CONCLUSIONS

Dans ce travail, nous présentons l'approche métrologique la plus complète pour les matériaux optiques et les impulsions laser post-comprimées à haute énergie. L'impact cumulé des matériaux de haute qualité optique, du raccourcissement des durées d'impulsion et des deux facteurs clés - il a été démontré à la fois par simulations et expérimentations que la durée d'impulsion la plus courte peut être obtenue via la méthode TFC [1,2,4,8].

Ces résultats ouvrent la voie à l'intégration de cette technique dans les futures expérimentations d'interaction laser-matière, en particulier celles qui dépendent d'une plus grande intensité de crête. Les résultats de pointe obtenus lors de la campagne ELI-NP à 100

TW et 10 Hz ont été utilisés comme entrée pour étudier le potentiel de telles impulsions pour l'efficacité des électrons [9].

Le développement de modérateurs de neutrons compacts et la récente démonstration expérimentale, telle qu'une compression d'impulsion par un facteur 4 jusqu'à 6 fs, conduiront à une augmentation de l'intensité du laser, promettant ainsi des flux d'électrons élevés qui génèrent du rayonnement de freinage énergétique, augmentant ainsi le rendement en neutrons. Les simulations prévoient des flux de neutrons de crête réalisables autour de $10^{23} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ par tir avec la prochaine génération d'installations des lasers, permettant la production de doses médicales pertinentes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs, P.-G. Bleotu et K.-M. Sphor, remercient le soutien du projet ELI-RO LaluThe, financé par l'UEFISCDI, Roumanie.

REFERENCES

- [1] P.-G. Bleotu, A. Beluze, F. Mathieu, P. Audebert, D. Ursescu, J. Fuchs, G. Mourou, Spectral broadening for multi-Joule pulse compression in the APOLLON Long Focal Area facility, *High Power Laser Sci. Eng.* 10 (2022). <https://doi.org/10.1017/hpl.2021.61>.
- [2] P.-G. Bleotu, J. Wheeler, S.Yu. Mironov, V. Ginzburg, M. Masruri, A. Naziru, R. Secareanu, D. Ursescu, F. Perez, J. De Sousa, D. Badarau, E. Veuillot, P. Audebert, E. Khazanov, G. Mourou, Post-compression of high-energy, sub-picosecond laser pulses, *High Pow Laser Sci Eng* 11 (2023) e30. <https://doi.org/10.1017/hpl.2023.10>.
- [3] G.A. Mourou, N.J. Fisch, V.M. Malkin, Z. Toroker, E.A. Khazanov, A.M. Sergeev, T. Tajima, B. Le Garrec, Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications, *Optics Communications* 285 (2012) 720–724. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.10.089>.
- [4] G. Mourou, S. Mironov, E. Khazanov, A. Sergeev, Single cycle thin film compressor opening the door to Zeptosecond-Exawatt physics, *The European Physical Journal Special Topics* 223 (2014) 1181–1188. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2014-02171-5>.
- [5] Kawabata S. et al., Survival benefit from boron neutron capture therapy for the newly diagnosed glioblastoma patients. *Appl Radiat Isot.* 2009;67:S15–8.
- [6] V. Aleksandrov, G. Bleotu, L. Caratas, R. Dabu, I. Dancus, R. Fabbri, V. Iancu, M. Kiss, A. Lachapelle, L. Alexandru, M. Masruri, D. Matei, M. Merisanu, V. Mohanan, A. Naziru, D. Nistor, R. Secareanu, A.-M. Talposi, A. Toader, B.-C. Ispas, Upgrading design of a multi-TW femtosecond laser, *Romanian Reports in Physics* 72 (2020).
- [7] P.G. Bleotu, R. Udrea, A. Dumitru, O. Uteza, M.-D. Mihai, D.G. Matei, D. Ursescu, S. Irimiciuc, V. Craciun, Exploring fs-laser irradiation damage subthreshold behavior of dielectric mirrors via electrical measurements, *High Power Laser Science and Engineering* 12 (2024) e15. <https://doi.org/10.1017/hpl.2023.98>.
- [8] J. Wheeler, G.P. Bleotu, A. Naziru, R. Fabbri, M. Masruri, R. Secareanu, D.M. Farinella, G. Cojocaru, R. Ungureanu, E. Baynard, J. Demailly, M. Pittman, R. Dabu, I. Dancus, D. Ursescu, D. Ros, T. Tajima, G. Mourou, Compressing High Energy Lasers through Optical Polymer Films, *Photonics* 9 (2022) 715. <https://doi.org/10.3390/photonics9100715>.
- [9] V. Horný, P.G. Bleotu, D. Ursescu, V. Malka, P. Tomassini, Efficient laser wakefield accelerator in pump depletion dominated bubble regime, *Phys. Rev. E* 110 (2024) 035202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.110.035202>.