



**HAL**  
open science

## COMBINAISON COHERENTE D'AMPLIFICATEURS A FIBRE EN REGIME FEMTOSECONDE

Louis Daniault, Marc Hanna, Laurent Lombard, Yoann Zaouter, Eric Mottay,  
Didier Goular, Pierre Bourdon, Frédéric Druon, Patrick Georges

► **To cite this version:**

Louis Daniault, Marc Hanna, Laurent Lombard, Yoann Zaouter, Eric Mottay, et al.. COMBINAISON COHERENTE D'AMPLIFICATEURS A FIBRE EN REGIME FEMTOSECONDE. Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG) 2011, Jul 2011, Marseille, France. JNOG\_1: Amplificateurs et lasers, p.28. hal-00609904

**HAL Id: hal-00609904**

**<https://hal.science/hal-00609904>**

Submitted on 20 Jul 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# COMBINAISON COHERENTE D'AMPLIFICATEURS A FIBRE EN REGIME FEMTOSECONDE

L. Daniault<sup>1</sup>, M. Hanna<sup>1</sup>, L. Lombard<sup>2</sup>, Y. Zaouter<sup>3</sup>, E. Mottay<sup>3</sup>, D. Goular<sup>2</sup>, P. Bourdon<sup>2</sup>, F. Druon<sup>1</sup>, P. Georges<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, UMR 8501 CNRS, Université Paris Sud, 91127 Palaiseau, France

<sup>2</sup>Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales, DOTA, Chemin de la Hunière, 91761 Palaiseau, France

<sup>3</sup>Amplitude Systèmes, 6 allée du Doyen Georges Brus, 33600 Pessac, France

[louis.daniault@institutoptique.fr](mailto:louis.daniault@institutoptique.fr)

## RÉSUMÉ

Nous décrivons la combinaison cohérente de deux amplificateurs à fibre, insérés dans un montage d'amplification à dérive de fréquence, à partir d'un oscillateur commercial. À l'aide d'une boucle de rétroaction utilisant un modulateur de phase électro-optique, une puissance moyenne de 7.2 W est obtenue avant compression avec une efficacité de recombinaison de 90 %. Les qualités spatiales et temporelles de l'oscillateur sont conservées, avec une durée d'impulsion finale de 325 fs. Cette démonstration de principe permet d'imaginer la montée en puissances crête / moyenne des sources fibrées femtoseconde.

**MOTS-CLEFS :** Lasers ultracourts, fibre, combinaison

## 1. INTRODUCTION

Les amplificateurs à fibre dopée ytterbium présentent de nombreux avantages pour générer et amplifier des impulsions femtoseconde à de hautes puissances moyennes. Cependant, pour de fortes puissances crêtes, le confinement du faisceau à l'intérieur de la fibre sur de grandes longueurs d'interaction induit inévitablement des effets non linéaires, qui dégradent notablement le profil temporel des impulsions amplifiées et limitent l'énergie accessible. L'une des solutions les plus prometteuses pour répondre à ce problème consiste à utiliser plusieurs amplificateurs en parallèle, injectés simultanément par une même source, et dont les sorties sont recombinaisonnées en espace libre de manière cohérente en un seul et unique faisceau. Cette technique, déjà utilisée en régime continu [1] et en régime nanoseconde [2], n'est a priori limitée en puissance que par le nombre de fibre à combiner. Nous rapportons ici la preuve de concept de la combinaison cohérente en régime femtoseconde pour deux amplificateurs à fibre, par un contrôle actif de la phase relative à l'aide d'un modulateur de phase électro-optique intégré [3].

## 2. MONTAGE

En régime continu, la différence de phase entre les faisceaux est contrôlée par une boucle de rétroaction. En régime femtoseconde, puisque les spectres des impulsions sont bien plus larges, toutes leurs composantes fréquentielles doivent être mises en phase. En d'autres termes, leur phase spectrale doit être contrôlée à tous les ordres (phase absolue, retard de groupe, dispersion de vitesse de groupe, etc.). Dans ce qui suit, pour des durées d'impulsion au-dessus de 100 fs, nous montrons qu'un ajustement statique du retard de groupe et de la dispersion de vitesse de groupe, avec une correction active de la phase absolue, est suffisant pour combiner efficacement les impulsions.

Notre montage expérimental, représenté figure 1, part d'un oscillateur femtoseconde générant des impulsions de 260 fs centrées autour de 1030 nm avec un taux de répétition de 35 MHz. Il est suivi d'un étireur, d'une lame demi-onde et d'un cube séparateur de polarisation afin de diviser le faisceau en deux bras. Le premier est composé d'un modulateur de phase LiNbO<sub>3</sub> fibré, suivi d'une fibre amplificatrice dopée Yb<sup>3+</sup> double-gaine à large aire modale 30/150 μm, à maintien de polarisation et de 1.2 m de long. Le deuxième bras contient une fibre monomode de 2.40 m, une ligne à retard en espace libre, et un autre amplificateur à fibre identique au premier. L'intérêt de la

fibre monomode, outre le retard grossier qu'elle introduit, est de faire correspondre la dispersion de vitesse de groupe dans les deux bras.

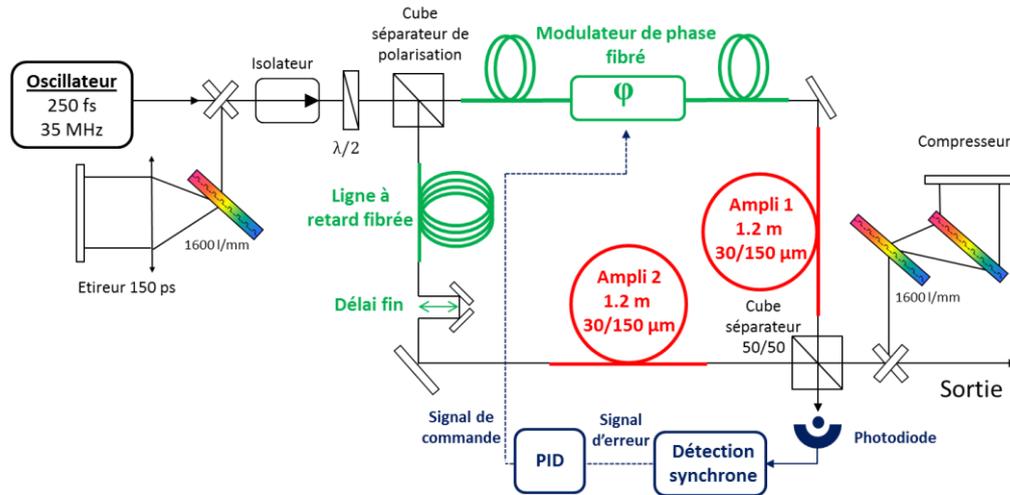


Fig. 1: Schéma expérimental de l'expérience de combinaison cohérente femtoseconde.

Les deux amplificateurs sont injectés par 100 mW de puissance moyenne et délivrent en sortie des puissances identiques de 4 W. La sortie constructive du cube séparateur va vers le compresseur, et la sortie destructive, que l'on doit minimiser, est suivie d'une photodiode. La différence de phase entre les impulsions est contrôlée à l'aide de la technique décrite dans référence [1]. La photodiode est connectée à une détection synchrone, suivie d'un système électronique de contrôle PID, qui adapte le signal au modulateur. La bande passante la boucle complète est d'environ 1 kHz, et est déterminée par l'intégration du contrôleur PID.

### 3. RESULTATS

Le signal de la photodiode en fonction du temps est représenté figure 2, en régime libre et régime verrouillé. Dans le premier cas, le signal évolue arbitrairement dans le temps entre les états constructifs et destructifs, ce qui détermine un contraste  $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$  de 84 %, et permet d'estimer l'efficacité de recombinaison maximale théorique de  $I_{\max} / (I_{\max} + I_{\min})$  à 92%. En réalité, la puissance de sortie est de 7.2 W, indiquant une efficacité globale de 90 %.

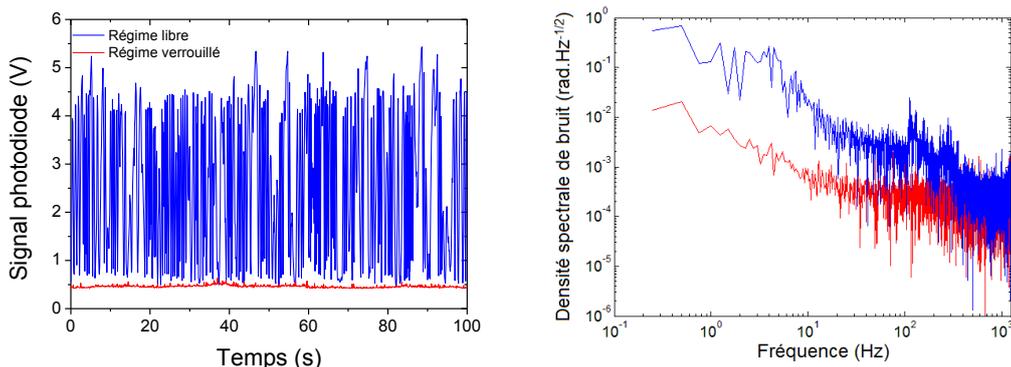


Fig. 2: (gauche) puissance détectée par la photodiode sur 100s, (droite) densité spectrale de bruit de phase ; en boucle ouverte (bleu) et en régime verrouillé (rouge).

En boucle fermée, les fluctuations résiduelles de l'intensité correspondent à une valeur RMS du bruit de phase de  $\lambda/40$ , en supposant que le bruit d'intensité est négligeable. Aucun réajustement de la ligne à retard n'est nécessaire pour maintenir la phase verrouillée au fil des heures. On constate sur le spectre que la plupart du bruit se trouve en dessous de 1 kHz, la bande passante du système est donc ici suffisante. Cependant, tout écart entre les fronts d'ondes, comme la

défocalisation ou l'inclinaison, ou dans les profils d'intensité, comme la position du maximum de puissance ou l'ellipticité du faisceau, se traduit par une chute importante de l'efficacité de combinaison. Les profils d'intensité de chaque bras séparé et du faisceau combiné sont indiqués figure 4. Les profils individuels ne présentent pas exactement la même forme, et le faisceau recombiné est intermédiaire. Cette légère différence spatiale implique une efficacité globale plus faible que celle attendue théoriquement à partir du contraste.

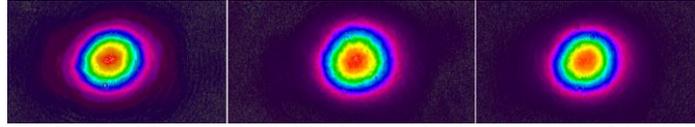


Fig. 3: Profils d'intensité des faisceaux individuels (gauche, centre) et du faisceau recombiné (droite).

Sur la figure 5, les autocorrélations de chaque bras seul et de la recombinaison présentent un très bon recouvrement avec la forme temporelle  $\text{sech}^2$ . Les durées d'impulsion initiales sont de 315 fs et 335 fs, ce qui indique un léger écart de dispersion de vitesse de groupe, et l'impulsion recombinée a une durée moyenne de 325 fs. Le spectre recombiné est également très similaire à ceux des amplificateurs isolés, et le spectre recombiné est une fois encore entre les deux spectres initiaux, avec une largeur moyenne de 4.3 nm FWHM. Les qualités temporelle et spectrale sont donc très bien conservées après recombinaison.

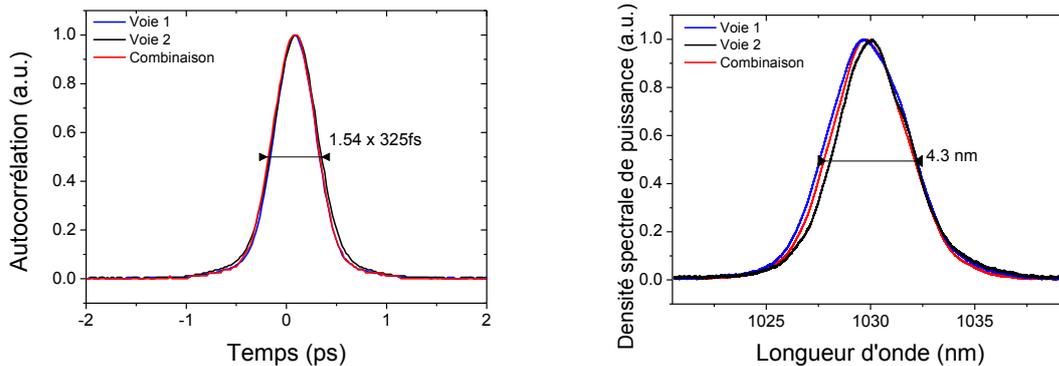


Fig. 4: (gauche) autocorrélation (droite) spectres optiques ; pour chaque bras indépendant (bleu et noir) et pour le faisceau recombiné (rouge).

## CONCLUSION

Nous démontrons la combinaison cohérente de deux amplificateurs à fibre femtoseconde, en recombinant 7.2 W de puissance (4.3 W compressés) avec 90 % d'efficacité. L'erreur de phase résiduelle est de  $\lambda/40$  RMS et la durée d'impulsion finale est de 325 fs, avec de bonnes qualités spatiale et temporelle. Des considérations théoriques indiquent que cette méthode peut être adaptée à un grand nombre de fibre. Cela peut enfin permettre la réalisation de systèmes amplificateurs fibrés générant de fortes puissances moyennes et crêtes simultanément. Les auteurs remercient particulièrement le RTRA Triangle de la Physique pour son soutien (contrat 2009-026T).

## REFERENCES

- [1] T. M. Shay, V. Benhem, J. T. Baker, A. D. Sanchez, D. Pilkington, C. A. Lu, "Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays," IEEE J. Select. Top. Quant. Elec. 13, 480-486 (2007).
- [2] L. Lombard, A. Azarian, K. Cadoret, P. Bourdon, D. Goular, G. Canat, V. Jolivet, Y. Jaouën, and O. Vasseur, "Coherent beam combination of narrow-linewidth 1.5 $\mu\text{m}$  fiber amplifiers in a long-pulse regime," Opt. Lett. 36, 523-525 (2011).
- [3] L. Daniault, M. Hanna, L. Lombard, Y. Zaouter, E. Mottay, D. Goular, P. Bourdon, F. Druon, and P. Georges, "Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers," Opt. Lett. 36, 621-623 (2011).