

La combinaison cohérente de fibres amplificatrices

Marie ANTIER^{1,2}, Jérémie LE DORTZ², Jérôme BOURDERIONNET², Éric LALLIER², Christian LARAT², Arnaud BRIGNON²

¹Thales Optronique SA, Laser Solutions Unit, 2 avenue Gay-Lussac, 78995 Elancourt, France

²Thales Research and Technology, 1 avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex, France

Les propriétés intrinsèques des fibres amplificatrices en font des candidates idéales pour le développement de sources lasers de haute puissance. Ces sources trouvent de nombreuses applications dans des domaines aussi variés que l'industrie, la défense et la physique des particules. Dans ce dernier cas, des sources ultra-brèves et ultra-intenses permettent d'envisager l'accélération de protons pour la proton-thérapie ou encore le remplacement des synchrotrons actuels par des architectures ayant un rendement plus important et une meilleure compacité. Cependant, du fait du confinement de la lumière au cœur de la fibre, la puissance crête obtenue à partir d'une seule fibre amplificatrice reste limitée. La combinaison cohérente de plusieurs fibres amplificatrices en parallèle permet de s'affranchir de cette limitation.

Les lasers à fibre suscitent un grand intérêt dans des domaines allant de la découpe de métaux à la chirurgie en passant par les télécommunications. Cet intérêt se retrouve dans l'évolution de leur marché qui a doublé en 5 ans. Leur faisceau de bonne qualité spatiale, ainsi que leur compacité et leur robustesse, sont les atouts majeurs de cette technologie. Le faisceau restant guidé et confiné au cœur de la fibre, on peut ainsi fabriquer des systèmes compacts ne nécessitant aucune optique en espace libre, contrairement aux lasers « classiques » faisant appel à des cristaux, des verres, des jets de colorants ou des plasmas. Par ailleurs, le faible diamètre et la grande longueur de la fibre permettent un refroidissement optimal du milieu, condition indispensable à l'obtention de fortes puissances moyennes. Cependant, le confinement du faisceau dans le cœur de la fibre et l'apparition d'effets non-linéaires limitent la puissance crête en régime impulsionnel.

Or, les applications nécessitant simultanément de fortes puissances crêtes et moyennes sont nombreuses, comme la soudure, la découpe ou la photolithographie. On peut aussi citer des applications dans le domaine de la défense, comme la télémétrie (de 1 à 100 mJ en régime ns), la désignation de cible (de 10 mJ à quelques centaines de mJ en régime nanoseconde), les contre-mesures optiques ou encore les applications très hautes puissances destinées à créer des dommages structurels. Enfin, les lasers ultra-brèves et ultra-intenses sont directement impliqués en physique fondamentale dans l'étude des particules. En effet, dès 1979 avec la mise en évidence de nouveaux mécanismes d'accélération tels que l'accélération de sillage (*laser wakefield acceleration*) par Tajima et Dawson, de nouvelles applications dans le domaine de l'accélération des particules sont apparues. Ces sources ultra-intenses pourraient ainsi être utilisées pour la

acal bfi European leader in advanced technology solutions

LE PHOTON POUR VOCATION



EMETTRE


MODULER


FILTRER


SECURISER


DETECTER


ANALYSER


VISUALISER


Venez nous voir sur Enova Paris
22-24 septembre 2015

Hall 4 - Stand C26
T +33 (0)1 60 79 59 06 - photonique.fr@acalbfi.fr
www.acalbfi.fr

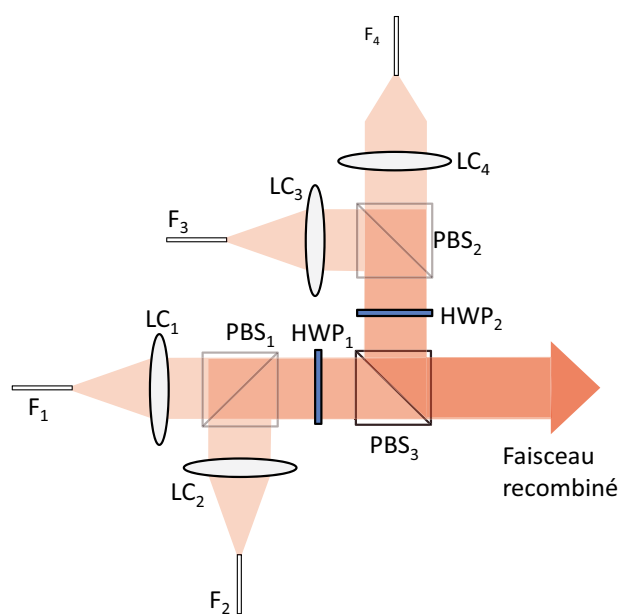
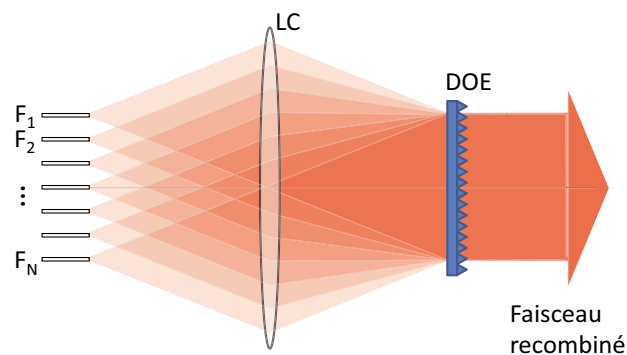


Figure 1. Techniques de recombinaison cohérente de faisceaux en « champ proche ». Si les phases relatives des faisceaux issus des fibres amplificatrices (F_1, \dots, F_N) sont parfaitement maîtrisées, il est possible de recombinaison spatialement les N faisceaux sur un seul au moyen de lames séparatrices ou de polariseurs (à gauche) ou au moyen d'un composant optique diffractif (en dessous). LC : lentille de collimation ; PBS : cube séparateur de polarisation ; HWP : lame demi-onde ; DOE : composant optique diffractif.



proton-thérapie ou pour le remplacement des synchrotrons actuels par des architectures moins encombrantes.

Actuellement, la physique des particules utilise des accélérateurs, comme les synchrotrons, les lasers à électrons libres ou encore le LHC (Large Hadron Collider) du CERN à Genève. Cependant, l'encombrement et la complexité de telles architectures sont considérables. La technologie laser propose déjà par ailleurs des solutions permettant d'atteindre des énergies de l'ordre du GeV. Ces architectures présentent l'avantage d'être plus compactes que les accélérateurs de particules conventionnels. On peut notamment citer le laser BELLA construit par Thales Optronique et livré à Berkeley en 2012, qui délivre une puissance de 1,3 péta-watt ($1,3 \times 10^{15}$ W). Ce type de laser utilise, comme milieu amplificateur, le saphir titane pompé par laser Nd:YAG doublé en fréquence. Le rendement énergétique d'une telle solution est très faible, ce qui limite fortement le taux de répétition (1 Hz pour BELLA) compte tenu de la puissance électrique généralement disponible. Les besoins grandissants en puissance crête, en taux de répétition et en rendement électrique/optique ne pourront pas être satisfaits en conservant cette technologie. L'amplificateur à fibre, qui permet un rendement énergétique élevé et une bonne gestion thermique, est ainsi une alternative crédible au saphir titane [1].

La combinaison cohérente

Une fibre optique amplificatrice est constituée d'un cœur dopé avec des ions terres rares tels que l'erbium (Er^{3+}), l'ytterbium (Yb^{3+}), le néodyme (Nd^{3+}) ou encore le thulium (Tm^{3+}). Le choix de l'élément terre rare fixe la longueur d'onde émise par le laser et la longueur d'onde de pompage.

Une puissance continue de 10 kW peut être obtenue avec ce type de milieu utilisé comme laser. Le seuil de dommage d'une fibre étant de quelques GW/cm^2 [2], la puissance crête extractible sans dommage d'une seule fibre monomode reste donc limitée à quelques kW pour les fibres dopées Yb^{3+} . Afin de dépasser cette limite, il est possible de combiner de manière cohérente plusieurs sources lasers [3]. Dans ce concept, l'amplification est répartie sur N fibres parallèles. Ainsi, chacune des voies laser reste en deçà des limitations intrinsèques des lasers à fibre tout en conservant les propriétés spatiales, spectrales et temporelles d'un faisceau laser unique. La combinaison cohérente de plusieurs sources nécessite par définition que les sources soient cohérentes entre elles. Cette condition est aisément satisfaite si toutes les sources laser procèdent d'une source unique, comme c'est le cas avec un réseau de fibres amplificatrices. Le point clef se trouve ainsi être la capacité à mettre en phase les différentes sources.

Ce concept générique, utilisable quel

que soit le choix du milieu laser, n'a pas de limite théorique quant au nombre maximal d'émetteurs pouvant être combinés. Le décalage des phases de chaque faisceau issu des sources élémentaires doit être contrôlé à une fraction de longueur d'onde (typiquement $< \lambda/20$, où λ est la longueur d'onde). Ces déphasages sont dus en premier lieu aux différences fixes de longueur entre les fibres. Viennent ensuite les perturbations environnementales, par essence fluctuantes au cours du temps, dues notamment aux fluctuations thermiques et aux éventuelles vibrations subies par les fibres. Enfin, un troisième type de perturbations résulte du bruit des diodes de pompage des amplificateurs [4].

En faisant l'hypothèse que les faisceaux issus des fibres amplificatrices sont cohérents entre eux et que leur phase relative est contrôlée au moyen d'une technique qui sera exposée plus loin, il est alors possible de les recombinaison spatialement. Il existe deux configurations de combinaisons cohérentes. Dans la première, la combinaison s'effectue par l'intermédiaire de combineurs de faisceaux (figure 1). Il peut s'agir de lames séparatrices, de polariseurs ou d'un composant diffractif (DOE en anglais pour *diffractive optical element*). Dans le deuxième type de configuration, les faisceaux élémentaires sont juxtaposés en champ proche. Lorsque les émetteurs, cohérents entre eux, ont une phase relative identique, la figure d'interférences

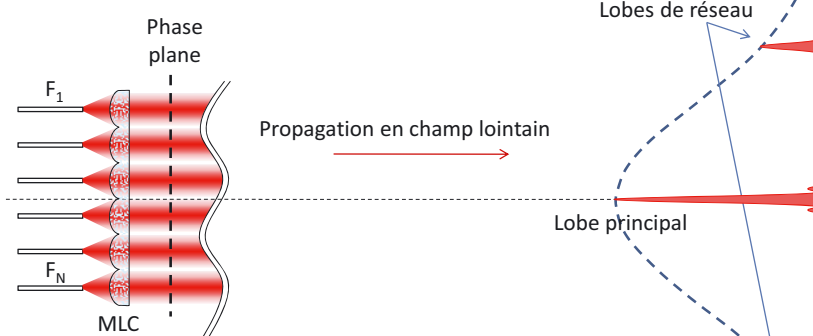
en champ lointain après propagation présente un lobe central intense qui cumule une partie importante de l'énergie totale (figure 2). La structure périodique du champ proche entraîne l'apparition de lobes secondaires qui peuvent néanmoins être considérablement réduite en optimisant le taux de remplissage de la pupille.

Mise en phase

Il est possible de classer en deux catégories les techniques qui vont permettre de maîtriser la phase relative entre les émetteurs : les techniques dites passives, c'est-à-dire ne nécessitant pas le calcul effectif de la phase de chaque canal, et les techniques dites actives, c'est-à-dire avec une mesure de la phase et une rétroaction électronique sur des modulateurs de phase placés en amont des fibres amplificatrices (figure 3). Malgré la simplicité des architectures passives qui ne nécessitent aucun contrôle, le nombre de voies qui peuvent être mises en phase est généralement limité à quelques dizaines de fibres.

Dans le cas d'une mise en phase active, la phase des faisceaux issus des fibres est mesurée et contrôlée à l'aide de modulateurs. Cette correction de phase s'effectue à une certaine cadence définie comme la fréquence d'échantillonnage. Celle-ci

Figure 2. Combinaison de faisceau en champ lointain. $F_1...F_N$: fibres amplificatrices ; MLC : matrice de lentilles de collimation.



doit être suffisante pour pouvoir suivre et corriger les variations de phase dues aux fluctuations environnementales et à l'amplification. Une fréquence d'échantillonnage comprise entre quelques centaines de Hertz et le kiloHertz est en pratique suffisante pour assurer un contrôle correct de la phase. Nous allons maintenant détailler différentes techniques de mesure de la phase.

Mesure de la phase

Une première méthode repose sur la détection hétérodyne. Elle consiste à mesurer le déphasage entre les faisceaux issus de chaque fibre et un faisceau de référence décalé en fréquence. Ce dernier

est généralement un faisceau supplémentaire issu de l'oscillateur-maître qui ne participe pas à la figure d'interférences en champ lointain. Le signal d'interférences entre les faisceaux issus de chaque fibre et le faisceau de référence est échantillonné puis analysé par détection hétérodyne. On peut ainsi remonter au déphasage de chacune des voies par rapport à la voie de référence. Cependant, un détecteur est nécessaire pour chaque fibre à combiner, et la complexité expérimentale de cette technique croît avec le nombre de fibres.

Au contraire de la détection hétérodyne, une méthode de diffusion itérative d'erreurs n'a besoin que d'un seul détecteur [5]. Celui-ci est placé à l'endroit où les faisceaux se superposent, soit en champ

Vous souhaitez suivre de près l'actualité de votre revue Photoniques ?

Inscrivez-vous à l'e-news

Tous les 15 jours, une e-news relaie les dernières informations

Faites votre inscription sur : www.photoniques.com



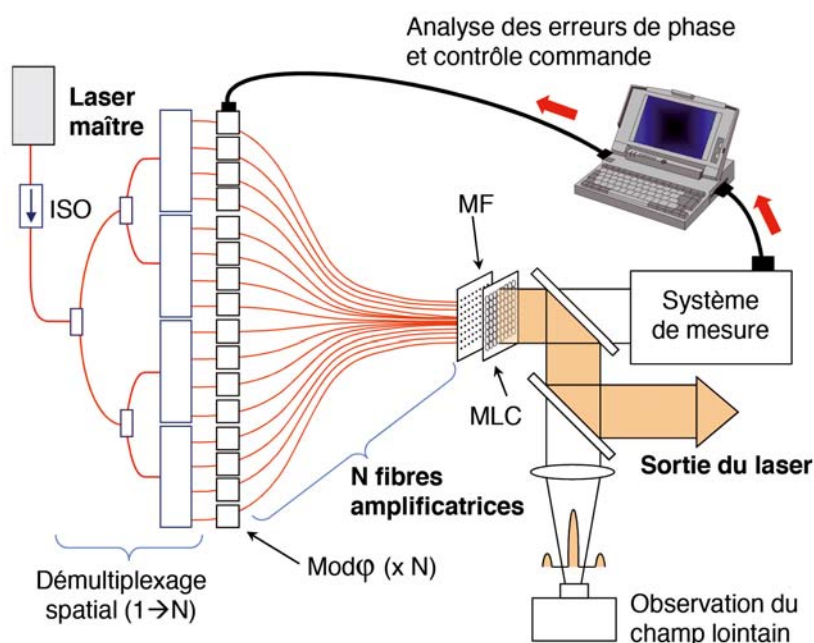


Figure 3. Principe de la mise en phase active pour la recombinaison cohérente de fibres amplificatrices. Il est à noter que ce schéma générique peut s'appliquer à tout type de milieu amplificateur. ISO : isolateur optique ; Mod ϕ : modulateurs de phase ; MF : matrice de fibres ; MLC : matrice de lentilles de collimation.

proche (figure 1), soit en champ lointain (figure 2). Dans ce dernier cas, un diaphragme est placé devant le détecteur afin de ne collecter que le lobe central de la combinaison. L'asservissement consiste en la maximisation de l'intensité reçue. Ce processus itératif se base sur un principe de diffusion d'erreurs. La limitation majeure de cette technique provient de l'algorithme utilisé qui a besoin de plusieurs itérations pour converger. Or, ce nombre d'itérations augmente directement avec le nombre de fibres combinées.

La technique du marquage en fréquence (LOCSET en anglais, pour *locking of optical coherence by single-detector electronic-frequency tagging*) ne nécessite également qu'un seul détecteur placé à l'endroit du faisceau recombinaison [4, 6]. Des modulateurs de phase sont utilisés pour chaque voie à une fréquence de modulation qui leur est propre. Cette technique de marquage permet donc de différencier les différentes voies. Un

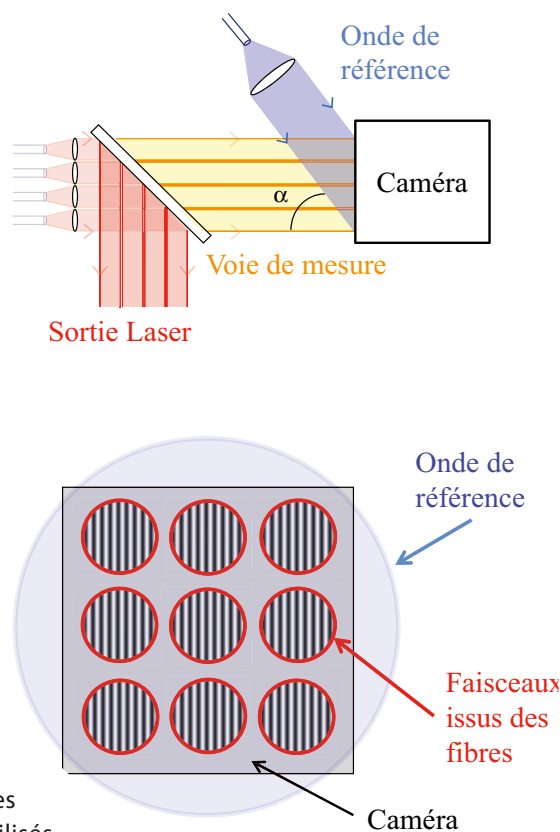


Figure 4. Principe de la mesure interférométrique de phase. La position relative des franges d'interférences entre les faisceaux permet de calculer le déphasage entre les fibres amplificatrices.

traitement du signal, comprenant une démodulation synchrone adaptée à la fréquence de chaque canal, permet de remonter au signal d'erreur pour chaque fibre. On cherche ensuite à le minimiser. Le facteur limitant de cette technique est le choix des fréquences de modulation qui doivent respecter certains critères afin de ne pas les confondre entre elles. On peut alors estimer à quelques centaines le nombre maximal de fibres pouvant être combinées avec cette technique.

La dernière technique de combinaison cohérente que nous présentons est la mise en phase par mesure interférométrique (figure 4). L'idée est de mélanger en champ proche les faisceaux issus de chaque fibre avec une référence commune. Après l'acquisition de cette figure d'interférences par une caméra, l'analyse de l'image permet de remonter au déphasage de chaque fibre. Le record du nombre de fibres (64) combinées est détenu avec cette technique [7]. Les dernières études expérimentales ont montré que la combinaison cohérente de 10 000 fibres est envisageable avec des composants disponibles sur le marché [8]. Cette architecture laser peut également être adaptée au régime femtoseconde haute cadence et sera mise en œuvre dans le cadre du projet collaboratif XCAN entre l'École polytechnique et Thales.

Pour en savoir plus

- [1] G. Mourou, B. Brocklesby, T. Tajima, J. Limpert, *Nature Photonics* **7**, 258 (2013)
- [2] C. Jauregui, J. Limpert, A. Tünnermann, *Nature Photonics* **7**, 861 (2013)
- [3] A. Brignon, *Coherent Laser Beam Combining*, Wiley-VCH, 481 p. (2013)
- [4] S. Augst, T. Fan, A. Sanchez, *Opt. Lett.* **29**, 474 (2004)
- [5] M.A. Vorontsov, V.P. Sivokon, *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 2745 (1998)
- [6] L. Danialt, M. Hanna, L. Lombard, Y. Zaouter, E. Mottay, D. Goular, P. Bourdon, F. Druon, P. Georges, *Opt. Lett.* **36**, 621 (2011)
- [7] J. Bourderionnet, C. Bellanger, J. Primot, A. Brignon, *Opt. Express* **19**, 17053 (2011)
- [8] M. Antier, J. Bourderionnet, C. Larat, E. Lallier, J. Primot, A. Brignon, *Selected Topics in Quantum Electronics (IEEE Journal)* **20**, 1 (2014)