



Proposition de thèse

Conception et réalisation d'un système laser reposant sur la combinaison cohérente d'un réseau d'amplificateurs fibrés pour applications en physique des hautes énergies

Lieu : Laboratoire Utilisation des Lasers Intenses , www.luli.polytechnique.fr, Ecole Polytechnique, Palaiseau

Financement : Bourse DGA – Ecole Polytechnique

Date limite de dépôt des candidatures : 7 Mai 2015

Encadrants :

Jean-Christophe Chanteloup

jean-christophe.chanteloup@polytechnique.edu; 01 69 33 53 95

Louis Daniault

louis.daniault@polytechnique.edu; 01 69 33 53 94

Condition particulière liée au financement : Nationalité issue de l'Union Européenne

Contexte : Cette thèse s'inscrit dans le cadre du programme de recherche XCAN faisant l'objet d'une coopération entre l'Ecole Polytechnique, Thales Research & Technology et Thales Optronique.



XCAN repose sur le concept de *Coherent Amplifying Network* (CAN), dont l'idée fondamentale est de faire fonctionner en parallèle un réseau constitué d'un grand nombre (jusqu'à des dizaines de milliers) d'amplificateurs laser à fibres, puis de les combiner de manière cohérente pour obtenir des performances inégalées simultanément en termes de puissance crête et de puissance moyenne.

Les objectifs scientifiques offerts par un laser CAN concernent l'accélération de particules, l'optique non-linéaire à très haute intensité, ou encore la physique nucléaire par laser. De tels systèmes lasers pourront être dimensionnés pour des applications dans les domaines de l'environnement avec la transmutation des déchets nucléaires, du médical avec la thérapie par électrons ou par protons, de la pharmacologie nucléaire avec la production d'isotopes, des industries de la microélectronique avec la photolithographie ou encore spatiale avec le traitement laser des déchets orbitaux.

Ces applications requièrent la production d'impulsions ultra-brèves énergétiques à niveau de récurrence élevé (>kHz) avec une efficacité à la prise très sensiblement supérieure à l'état de l'art actuel des lasers à forte puissance crête. Un laser CAN devrait permettre d'adresser simultanément ces besoins.

L'objet de la thèse est de concevoir et mettre au point un prototype laser reposant sur la combinaison cohérente de faisceaux amplifiés dans des fibres micro-structurées dopées Ytterbium. Ce système est dimensionné pour délivrer un train d'impulsions d'environ 300 fs transportant une énergie supérieure à 10 mJ à une cadence de 10 kHz. Une soixantaine de canaux amplificateurs seront activés simultanément. Ce nombre apparaît suffisant pour valider le dimensionnement des prototypes ultérieurs qui reposeront sur plusieurs centaines voire quelques milliers de fibres. Ce premier jalon atteint, il conviendra dans un second temps de capitaliser sur les connaissances et le savoir-faire acquis pour s'engager dans la construction d'un laser CAN permettant de donner accès aux vastes champs expérimentaux mentionnés précédemment et explorés par le programme IZEST de l'Ecole Polytechnique. Un Laser CAN dont les performances seraient de 30 J, 15 kHz, <300fs, >20% d'efficacité permettrait d'atteindre simultanément des puissances moyenne et crête inégalées : 0,5 MW et 100 TW ! Un tel point de fonctionnement n'est pas fortuit puisqu'il s'agit de celui requis pour atteindre les luminosités nécessaires à un collisionneur TeV pour la physique des particules.

La combinaison cohérente d'amplificateurs à fibre en régime femtoseconde a fait l'objet de nombreuses publications ces cinq dernières années, démontrant différentes méthodes de mise en phase et de recombinaison. La première, la plus simple à implémenter pour un nombre réduit de fibres, consiste à recombinaison les faisceaux par sommation d'amplitude dans un interféromètre (Mach-Zehnder, Sagnac,...). Les pionniers à valider cette méthode pour des impulsions ultra-brèves ont été les équipes du [LCF](#) à Palaiseau ainsi que celles de l'[IAP](#) à Jena (Allemagne), avec des méthodes de contrôle de phase distinctes. Elles ont notamment démontré de nouveaux records de puissance moyenne et crête, grâce à des expériences n'impliquant pas plus de 4 ou 8 canaux distincts.

D'autre part, la méthode de recombinaison la plus adaptée à un grand nombre de fibres (à partir de plusieurs dizaines) est différente de la précédente. Elle consiste en la reconstitution d'un front d'onde de grande taille par juxtaposition des faisceaux à combiner au sein d'une même pupille. La mise en phase des faisceaux ainsi qu'un remplissage contrôlé de la pupille permettent une recombinaison directe des faisceaux en champ lointain, par simple propagation en espace libre selon le principe de Huygens-Fresnel. La mise en phase d'un nombre conséquent (64) de fibres a déjà fait l'objet d'expériences de la part des partenaires impliqués dans ce travail de thèse (Thales et ONERA notamment), en régime continu et passif (pas d'amplification dans les canaux) à la longueur d'onde de 1.5 μm .

L'initiative XCAN se positionne à la suite de ces travaux, et vise la recombinaison d'un grand nombre de fibres (plusieurs dizaines, puis plusieurs centaines voire plusieurs milliers) opérant à 1 μm en régime femtoseconde (amplificateurs de puissance), afin d'accroître de manière substantielle le potentiel énergétique des sources laser ultra-brèves fibrées.

Objectifs et travaux de thèse :

Le principe général de la combinaison cohérente de N amplificateurs est représenté sur la figure 1. Les impulsions ultra-brèves d'un laser sont divisées en N impulsions cohérentes entre elles se propageant dans N canaux différents où elles sont amplifiées avant d'être finalement recombinaées. Un dispositif d'ajustement temporel est inséré sur N-1 canaux pour ajuster et stabiliser les longueurs des trajets optiques de canal à canal, et ce afin d'assurer *in fine* une interférence constructive de l'ensemble des N faisceaux amplifiés. En outre, un étireur et un compresseur sont ajoutés en amont et en aval du système afin d'amplifier des impulsions dont la fréquence présente la dérive temporelle (CPA) nécessaire à l'amplification d'impulsions brèves.

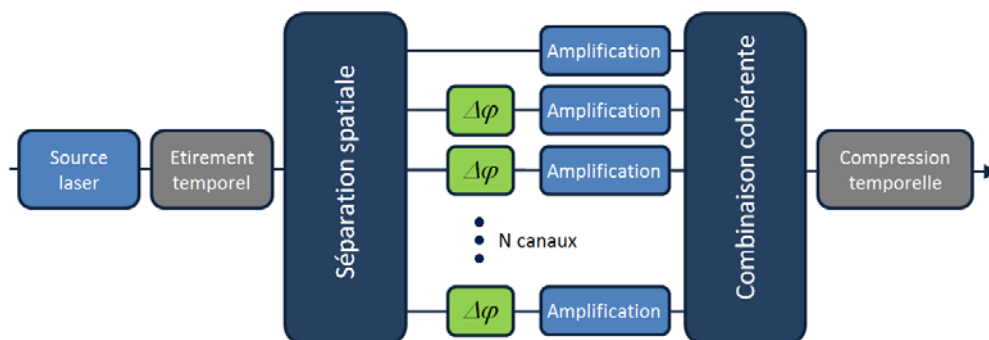


Figure 1. Synoptique du principe des **amplificateurs** lasers CAN qui reposent sur la combinaison **cohérente** de faisceaux amplifiés issu d'un **réseau** de fibres optiques. Les modules verts permettent d'assurer la mise en phase pour chaque canal.

Considérant un comportement identique de tous les canaux et une étape finale de recombinaison cohérente parfaite, la performance énergétique du système peut en principe être considérée comme évolutive avec N. Les amplificateurs à fibres sont des dispositifs de choix pour une telle architecture :

- l'amplification s'y effectuant en un unique passage, ils sont particulièrement adaptés pour un multiplexage spatial.
- l'excellente qualité spatiale des faisceaux issus des fibres et leur grande reproductibilité de fibre à fibre sont un gage d'efficacité pour l'étape de recombinaison cohérente en un unique faisceau très énergétique.

Le prototype de laser CAN, objet de la thèse, repose sur l'agencement de 61 fibres amplificatrices en un faisceau compact possédant la géométrie hexagonale illustrée sur la figure ci-dessous.

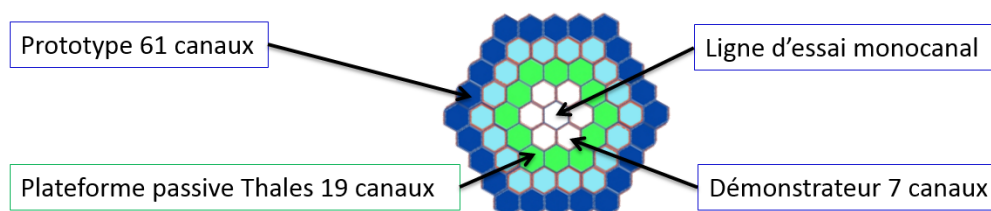


Figure 2. Vue axiale de la pupille finale des canaux à recombinaer.

Au démarrage de la thèse, l'étude expérimentale (performances énergétique, sensibilité à la courbure,...) d'une ligne d'essai monocanal aura été effectuée et les éléments d'un

démonstrateur à 7 canaux auront été approvisionnés. Il s'agira de fibres NKT 200/40 supportant un mode de 30 μm de diamètre. Son profil radial sera gaussien.

L'étudiant aura comme premier objectif de concevoir, implémenter puis étudier expérimentalement le système mécanique et optique le plus pertinent en terminaison des 7 fibres amplificatrices afin d'optimiser l'efficacité de combinaison cohérente. La mise en forme de la distribution transverse d'énergie en sortie de la fibre (gestion individuelle) ou du faisceau de 7 (gestion collective) pour remplir autant que faire se peut la pupille globale sera un axe directeur de ces travaux.

Cette première phase se déroulera en lien avec les travaux menés par l'équipe partenaire de Thales, travaillant sur la mise au point d'une plateforme de 19 fibres, qui se focalisera notamment sur la validation de la boucle de contre-réaction permettant gérer efficacement les dispositifs d'ajustement de la phase. Cette plateforme est simplifiée en ce sens qu'elle ne repose pas sur des amplificateurs laser. Il s'agit d'une expérience passive de recombinaison d'impulsions fs étirées se propageant dans des fibres standards.

Le second volet de la thèse portera sur le prototype à 61 canaux en tant que tel, dont l'architecture globale est donnée sur la figure 3. Le système d'étirement/compression temporel fera l'objet d'une étude spécifique dans la mesure où l'étireur reposera sur une technologie récente (fibre de Bragg à dérive de fréquence) qu'il s'agira de valider expérimentalement via une expérience à un ou sept canaux.

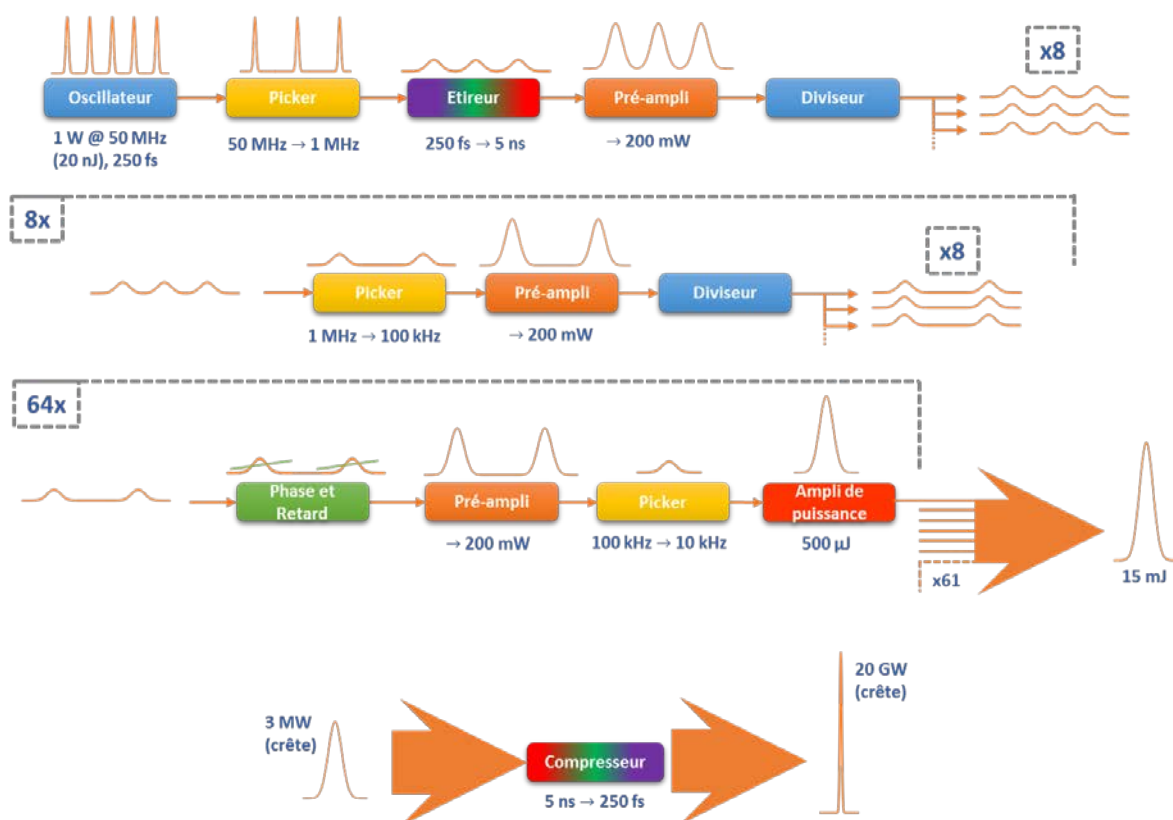


Figure 3. Synoptique de structure amplificatrice du prototype à 61 canaux.