

LE LASER XCAN : FAÇONNER LA LUMIÈRE EN MODE DIGITAL

Jean-Christophe CHANTELOUP*, Ihsan FSAIFES

Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses, École Polytechnique, 91120 Palaiseau, France

*jean-christophe.chanteloup@polytechnique.fr



L'avènement des lasers à combinaison cohérente de multiples faisceaux est à l'origine d'un changement de paradigme dans le domaine de l'architecture laser. L'opérateur de ce nouveau type de source lumineuse se voit en effet offrir la possibilité d'agir canal par canal sur les caractéristiques des faisceaux lasers individuels afin de façonner la distribution d'énergie optimale du faisceau recombinaison requise pour l'application visée. Une telle approche digitale de la mise en œuvre d'une source cohérente très puissante (GW crête/kW moyen) ouvre un vaste champ applicatif.

<https://doi.org/10.1051/photon/202311835>



**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE
AU SERVICE DE L'INNOVATION**





LED UV

LED / MODULES LED / SOLUTIONS DÉDIÉES
SERVICE SUR MESURE / POUR PETITES À GRANDES SÉRIES

CARACTÉRISTIQUES
De 255nm à 405nm - Boîtier CMS ou traversant - Longues durées de vie
Différents angles de distribution optique disponibles

NOUVEAUTÉ
WICOP UVC forte densité mW/mm² - 275nm - CMS - Sans bonding
Dimensions : 0,96 x 0,60 mm - Large choix de modules standards
jusqu'à 820mW

APPLICATIONS

Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air
Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence
Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Société HTDS - info@htds.fr - www.htds.fr - Tel : +33 (0)1 64 86 28 28

XCAN est un programme de recherche en physique du laser ayant pour objectif de concevoir, intégrer et étudier de nouvelles architectures laser reposant sur des Réseaux d'Amplificateurs laser Cohérents (Coherent Amplification Network). Proposé par G. Mourou au milieu des années 2010 puis mis en œuvre conjointement par L'École Polytechnique (d'où l'acronyme XCAN) et la société Thales, il héberge un prototype opérant dans la gamme du kilowatt de puissance moyenne en régime sub-picoseconde dans l'infra-rouge proche ($1\mu\text{m}$). Le terme consacré dans la littérature scientifique pour décrire l'approche amplificatrice utilisée est la combinaison cohérente de faisceaux ou CBC (Coherent Beam Combination). Le projet XCAN fut mentionné la première fois dans ces colonnes par M. Antier dans son article sur la combinaison cohérente de fibres amplificatrices [1].

Ajuster la distribution de la lumière à des besoins expérimentaux ou industriels spécifiques est une quête aussi ancienne que l'ingénierie optique. Cependant, ce n'est qu'avec l'invention du laser en 1960 [2] qu'il a été possible de commencer à utiliser de la lumière cohérente à cette fin. Le développement des techniques de combinaison cohérente de multiples faisceaux laser a ouvert la voie à un changement de paradigme dans le domaine de l'architecture laser où la manipulation de la lumière s'effectue en amont et plus seulement en aval de la source lumineuse en tant que telle. Ainsi l'ingénieur opticien se voit offert la possibilité de façonner la source la plus pertinente pour son application. Nous présentons ici un prototype laser que nous qualifions de digital où amplitude et phase (et à terme polarisation) peuvent être ajustées à l'échelle d'un « pixel » (faisceau) élémentaire pour façonner une distribution de champ électrique source arbitraire pour un large champ applicatif.

P61, LE PROTOTYPE À 61 CANAUX

L'architecture

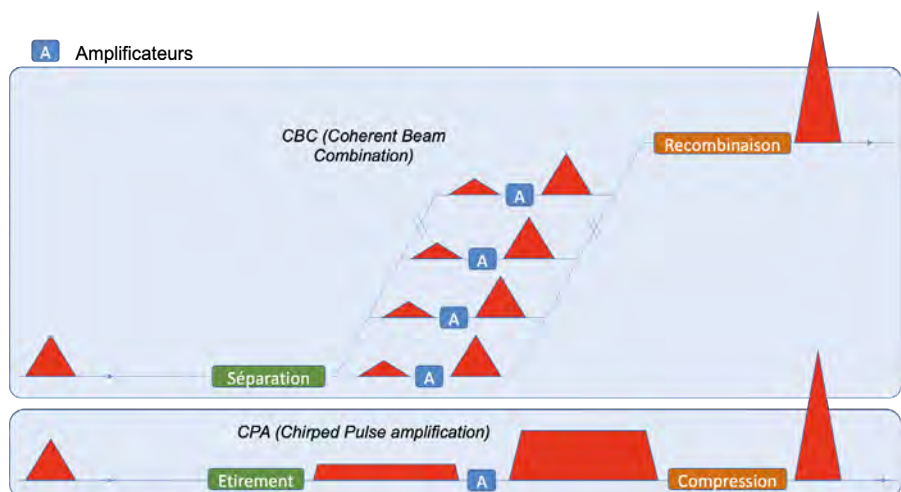
Bien que le premier laser à fibre ait été mis au point très vite dans les années 60 [3], il n'est apparu sur le marché que vers la fin des années 1980 concomitamment à l'amplification à dérive de fréquence. Cette technique connue sous son acronyme anglo-saxon CPA pour Chirped Pulse Amplification [4,5] permet l'amplification d'impulsions ultracourtes en les étirant temporellement, les amplifiant puis les recomprimant, s'affranchissant ainsi des effets délétères induits par la propagation d'impulsions très intenses dans les milieux laser à gain. La CBC peut être vue comme le pendant spatial de la CPA. Tandis qu'avec cette dernière méthode, l'énergie de l'impulsion est distribuée dans le temps (selon son axe de propagation), la CBC utilise quant à elle la distribution spatiale de la puissance vers plusieurs faisceaux pour un processus d'amplification parallélisé avant une addition cohérente finale comme illustré sur la figure 1. Le prototype P61 du projet XCAN [6] repose sur un train d'impulsions $\sim 300\text{fs}$ à haute cadence (de 300kHz à 55MHz) générées

initialement par un oscillateur laser unique. Elles sont, dans un premier temps, étirées temporellement sur quelques nanosecondes, puis les trains sont répliqués et séparés spatialement en 61 canaux d'amplification, pour être finalement recombinaison puis recomprimés. L'architecture est donc celle d'un laser CBC inséré dans un schéma CPA. Le système laser est quasi intégralement fibré jusqu'au niveau de la tête laser illustrée sur la figure 2. Les quatre fibres dopées à l'Ytterbium que l'on y aperçoit supportent un mode relativement large de $30\mu\text{m}$ de diamètre, leur conférant un potentiel amplificateur conséquent.

Les asservissements

Afin d'obtenir une bonne addition cohérente des 61 faisceaux, des contraintes spatiales et temporelles s'imposent. D'une part l'agencement des faisceaux les uns par rapport aux autres doit être extrêmement régulier avec un écartement constant au micromètre près et un positionnement angulaire relatif au milliradian près. La tête laser a été conçue dans cette logique à l'aide d'un empilement de manchons en zircone dans lesquels s'insèrent les fibres amplificatrices dotées d'une fêrulle de diamètre externe

Figure 1. Synoptiques de la Combinaison Cohérente de Faisceaux (CBC) et de l'Amplification à Dérive de Fréquence (CPA) illustrant les caractères spatiaux et temporels du même concept de réduction de la puissance crête avant amplifications puis additions finales spatiales et temporelles



YOUR EXPERT IN
PHOTONIC
INTEGRATION

SUPPLY
**HIGH HARMONICS
GENERATION SOURCES
AND BEAMLINES**

INTEGRATED DRIVING
BEAM **ALIGNMENT**
SYSTEM AND **XUV**
DIAGNOSTICS DEVICES

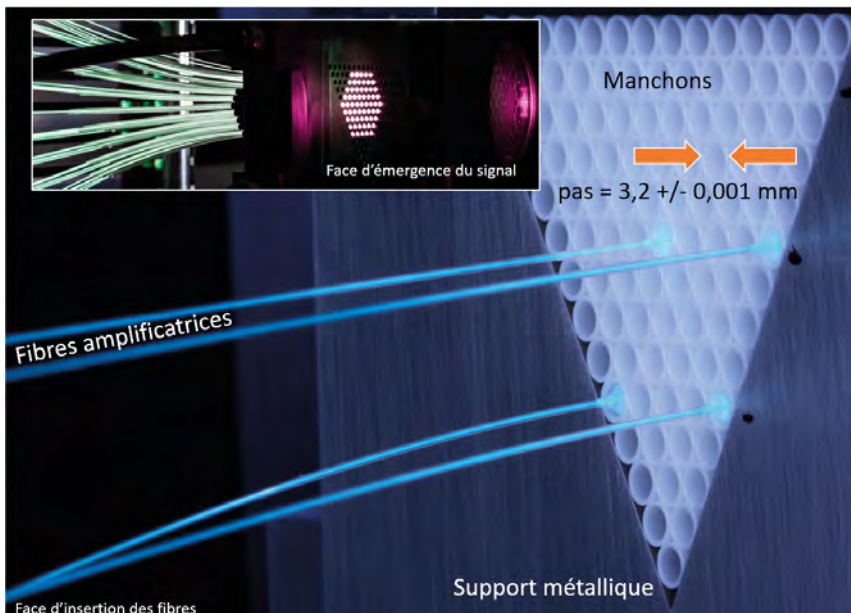


Figure 2. Vues des faces d'insertion des fibres amplificatrices et d'émergence du signal (encart) au niveau de la tête laser.

identique au diamètre interne des manchons. Les éléments métalliques de la tête laser ont été produits par fabrication additive (impression 3D de métal) permettant ainsi de les doter de multiples petits canaux internes maximisant le coefficient d'échange avec le fluide caloporteur (de l'eau) y circulant. Il y a en effet plus d'un kilowatt moyen de puissance lumineuse émergeant de cet ensemble de 61 fibres regroupées sur moins de 7 cm² de section globale au niveau de la tête.

D'autre part le positionnement temporel des trains d'impulsions les uns par rapport aux autres doit lui aussi être extrêmement précis avec une tolérance ne dépassant pas une fraction de femtoseconde. A cette fin, deux boucles d'asservissement principales sont mises en œuvre, toutes deux pilotées *via* l'analyse temps réel d'un interférogramme (figure 3, gauche) obtenu par interférence entre l'ensemble des 61 faisceaux (issus de la tête laser, puis collimatés par un réseau de lentilles collectif hexagonal) et un faisceau de référence issu d'une 62^{ème} fibre spécifiquement mise en place dans ce but.

Dans un premier temps, c'est le contraste des franges de chacune des 61 sous-pupilles qui est maximisé en agissant sur des lignes à retard (figure 4). La fibre

optique est sectionnée en amont de l'étage amplificateur, l'une des extrémités placée sur une platine motorisée. L'ajustement du chemin optique en espace libre ainsi créé permet d'ajuster en temps réel le recouvrement temporel des enveloppes énergétiques (gaussiennes rouges sur la figure) des impulsions laser. Le contraste des franges est maximum quand le recouvrement est optimal. Mais cette première étape n'est pas suffisante. En effet, quand bien même ces retards temporels relatifs des impulsions sont maintenant compensés, les franges bien contrastées de la figure interférentielle composite « défilent » les unes par rapport aux autres, illustration de la présence de légers déphasages relatifs des oscillations du champ électrique des ondes lumineuses sous leurs enveloppes respectives (sinusoïdes bleues). Et lorsque l'on focalise ce champ composite, la figure de tavelure du centre de la figure 3 est toujours visible. C'est alors qu'entrent en action des étireurs mécaniques de fibres optiques *via* une seconde boucle d'asservissement. Les trains d'impulsions se propagent en effet dans des fibres enroulées autour de cylindres en céramique piézo-électrique qui augmentent légèrement de diamètre lorsque soumis à une tension électrique. ●●●



LASER
PHOTOMETRY
RADIOMETRY
COLORIMETRY
SPECTROSCOPY

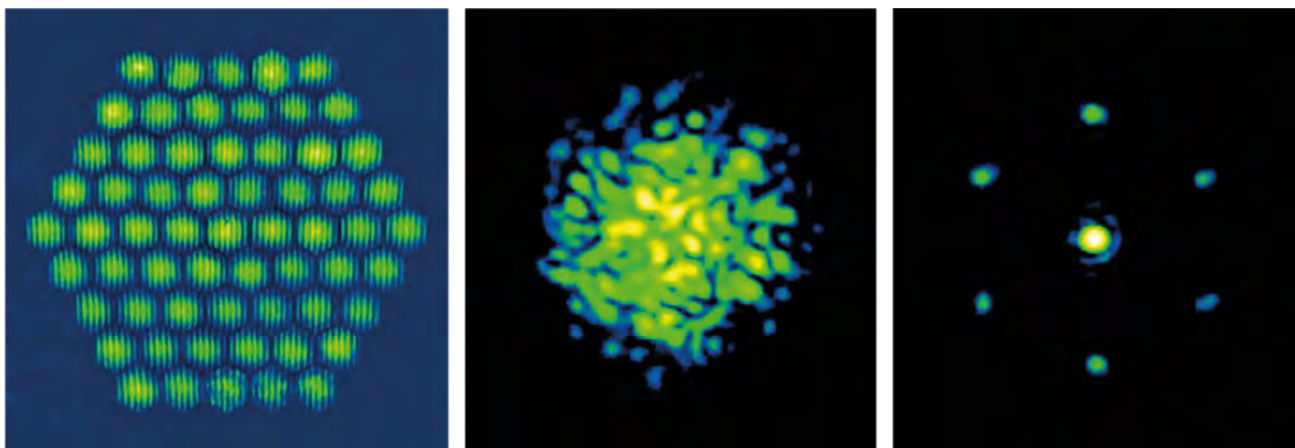


INTEGRATOR
PARTNER



SALES@ARDOP.COM
+33 1 69 64 36 09

www.ardop.com



Ces fibres de transport sont ainsi mécaniquement étirées avec une très grande précision qui permet de rephaser toutes les impulsions et ainsi de figer le champ proche interférentiel (gauche de la figure 3) et d'obtenir une distribution d'énergie en champ lointain telle qu'illustrée sur l'image de droite de cette figure. C'est une simple lentille de focalisation qui permet donc au final d'effectuer une combinaison cohérente des 61 faisceaux du prototype P61. Mais l'on vient de voir que les contraintes mécaniques et temporelles à satisfaire sont très strictes et elles doivent être satisfaites en continu. La notion de « temps réel » évoquée pour la bande passante des deux boucles de contre-réaction présentées signifie que les ajustements (retards et phases) doivent s'effectuer plus rapidement que les phénomènes physiques impliqués. Les principaux, le bruit thermique et les vibrations mécaniques/acoustiques surviennent heureusement sur des échelles de temps relativement lentes, de l'ordre de la milliseconde au maximum. D'autres phénomènes plus rapides (fluctuations du pompage des amplificateurs, effets non-linéaires,...) nécessiteraient une bande passante allant au-delà du kHz mais ils restent secondaires tout en contribuant au fait que l'efficacité globale de combinaison (puissance dans le lobe central du champ lointain de l'image de droite de la figure 3 ramenée à la puissance totale initiale) obtenue expérimentalement est de 50% pour une valeur théorique de 67%.

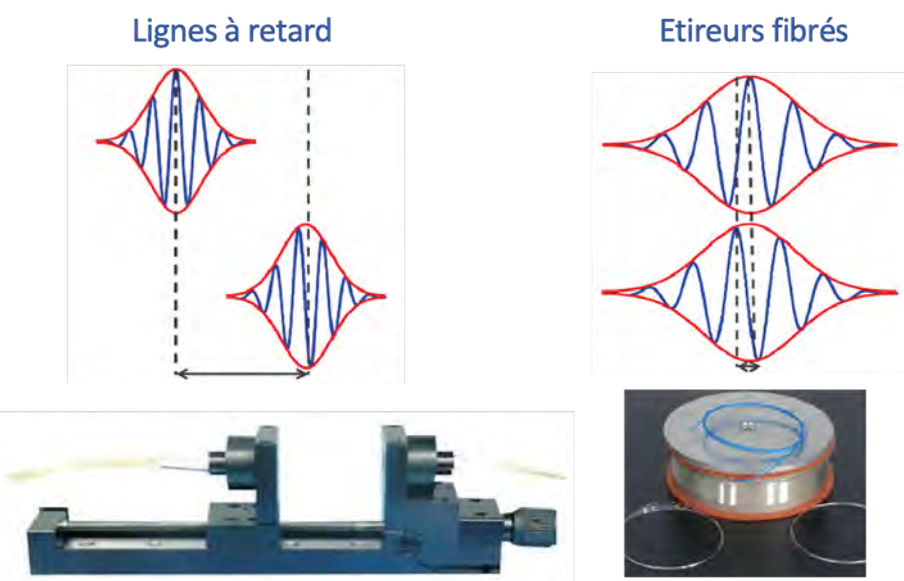
Figure 3. Champ proche interférentiel (gauche) puis champs lointains incohérent (centre) et cohérent (droite).

OPÉRATION EN MODE DIGITAL

L'on voit donc qu'avec ce laser, la mise en forme de la source lumineuse recherchée est intrinsèque à la source elle-même. Il n'est plus nécessaire d'avoir recours à des éléments optiques en aval de celle-ci, si ce n'est une simple lentille de focalisation. A titre d'illustration, considérons la génération de faisceaux laser à moment angulaire orbital (OAM). Ces

faisceaux sont porteurs de fronts de phase hélicoïdaux et possèdent une distribution transverse d'énergie toroïdale. De tels faisceaux ont une large gamme d'applications : de la manipulation optique, l'optique quantique et l'imagerie (comme en astronomie ou en caractérisation de l'écoulement des fluides) aux communications optiques et à la cryptographie. Il est également possible d'envisager des applications nécessitant une puissance beaucoup plus élevée, notamment la réduction de l'instabilité des microbunching dans les laser à électrons libres ou la

Figure 4. Dispositifs utilisés sur chacun des 61 canaux du prototype P61 du projet XCAN. À gauche la ligne à retard assurant le recouvrement énergétique des impulsions et à droite les étireurs mécaniques de fibre permettant la mise en coïncidence fine des oscillations du champ laser.



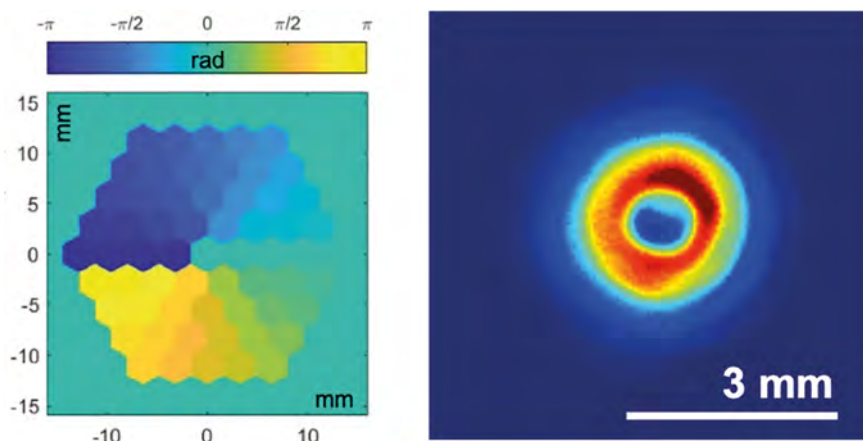


Figure 5. Valeurs des 61 phases appliquées aux 61 canaux (gauche) et champ lointain résultant.

propagation de faisceaux laser ultra-intenses (pour canaliser les éclairs ou détecter les polluants atmosphériques [7]). La figure 5 donne à gauche la distribution des pixels de phase appliqués et à droite le champ lointain résultant. La précision et la diversité des distributions permises augmentent logiquement avec le nombre de faisceaux pixels élémentaires disponibles [8].

CONCLUSION

La mise en œuvre imbriquée des techniques CPA et CBC au sein d'un même prototype laser est une innovation architecturale qui, combinée à l'utilisation de plusieurs douzaines de canaux

amplificateurs indépendants, ouvre l'ère des lasers digitaux. Le dernier paramètre manquant à l'appel (le contrôle individuel de la polarisation) achèvera d'offrir le contrôle total du champ laser pixelisé en amont de la combinaison. La génération de faisceaux aiguilles [9] sera par exemple possible. L'équipe XCAN y travaille. Les régimes de puissances/énergie associés (GW crête, kW moyen, mJ) offrent d'ores et déjà un champ applicatif intéressant que nous élargissons via l'ajout d'étages de post-compression pour atteindre 10 fs d'une part et l'exploration de techniques de combinaison permettant de s'approcher des 80% d'efficacité [10]. ●

RÉFÉRENCES

- [1] M. Antier *et al.*, *Photoniques* **77**, 41 (2015) <http://dx.doi.org/10.1051/photon/20157741>
- [2] T. H. Maiman, *Nature* **187**, 4736, 493 (1960)
- [3] C. J. Koester and E. Snitzer, *Appl. Opt.* **3**, 10, 1182 (1964)
- [4] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 3, 219 (1985)
- [5] C. Rouyer *et al.*, *Photoniques* **112**, 48 (2022) <https://doi.org/10.1051/photon/202211248>
- [6] I. Fsaifes *et al.*, *Opt. Express* **28**, 14 (2020)
- [7] A. Couairon and A. Mysyrowicz, *Phys. Rep.* **441**, 2, 47 (2007).
- [8] M. Veinhard *et al.*, *Opt. Lett.* **46**, 1, 25 (2021)
- [9] L. Turquet *et al.*, *Opt. Express* **26**, 21 (2018)
- [10] T. Zhou *et al.*, *Opt. Lett.* **43**, 3269 (2018)

PHOTOMATIQ®

from industrialization to production



Laser industrialiser la production

La production en série de lasers nécessite des compétences hautement spécialisées. Son automatisation permettra de monter en cadence plus facilement et améliorera le niveau de qualité. Produire en automatique avec répétabilité et à la cadence industrielle est maintenant possible avec Photomatiq®. Photomatiq® est la nouvelle plateforme d'assemblage 3D d'ISP System.

Photomatiq® combine les fonctions de micromanipulation d'optiques et leurs collages de précision. Un poste de vision 3D permet l'assemblage passif de composants à 20µm. Un banc optique configurable permet l'alignement actif des composants avec une sensibilité de 200nm. Elle est équipée de deux robots multi-axes configurables qui peuvent opérer conjointement dans un espace très réduit.

Photonsmart®, le logiciel de supervision assure la production en automatique à partir de gammes d'assemblage du logiciel et permet aux laséristes de créer ou d'optimiser les gammes d'assemblage des modules optiques sans compétence particulière en programmation.

Photomatiq® est flexible, elle permet également la production de PIC (Photonic Integrated Circuit), connecteurs à fibres optiques, Lidar, micro optiques...

www.isp-system.fr

contact@fr-ispgroup.com