



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **IN305 V1**

Date de publication :
10 octobre 2017

Techniques de combinaison de sources laser

Cet article est issu de : **Électronique - Photonique | Optique Photonique**

par **Pierre BOURDON**

Mots-clés

laser | cohérence |
combinaison

Résumé Cet article présente les principales techniques permettant de combiner des sources laser afin d'accroître leur puissance. En effet, il existe des méthodes adaptées pour additionner efficacement, c'est-à-dire avec les pertes les plus faibles possibles, les puissances de plusieurs sources laser. Les techniques de combinaison de lasers sont classées en deux grandes familles: les configurations incohérentes procédant par simple superposition de faisceaux, et les configurations cohérentes utilisant les interférences optiques entre faisceaux laser identiques pour les combiner. Toutes ces techniques sont décrites ici, ainsi que leur potentiel pour la montée en puissance des sources laser.

Keywords

laser | coherence | combining

Abstract This article presents the main techniques used to combine laser sources and increase their joint power. There are appropriate techniques to sum the powers from multiple laser sources efficiently, i.e. with low losses. Laser combining techniques fall into two main classes: incoherent setups based on simple overlap of laser beams, and coherent setups involving optical interferences between identical laser beams to combine them. All these techniques are described, and their potential to power-scale laser sources is assessed.

Pour toute question :

Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com

Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **23/02/2020**

Pour le compte : **7200029571 - univ mouloud mammeri tizi ousou // bu01 SNDL // 193.194.82.178**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Techniques de combinaison de sources laser

par **Pierre BOURDON**

*Chargé de mission « Laser de puissance pour la défense »
Département d'Optique
Onera – The French Aerospace Lab, Palaiseau, France*

Les lasers sont des sources de puissance lumineuse extrêmement intenses, utilisées couramment pour déposer de l'énergie à distance, que ce soit pour effectuer des mesures de paramètres physiques comme la distance, la vitesse d'un objet ou la concentration d'une molécule, ou pour interagir avec un matériau afin de modifier son état physique en le fondant ou le brûlant (par exemple pour la découpe de pièces métalliques par laser dans l'industrie automobile). Certaines applications militaires comme les armes laser utilisent un faisceau laser pour échauffer fortement une cible à distance dans le but de l'endommager ou même de la détruire. Quelle que soit l'application, la portée d'action du laser, la vitesse d'interaction ou la sensibilité et la précision pour les applications liées à la mesure peuvent être améliorées en utilisant des lasers plus puissants. Aussi cherche-t-on souvent à accroître la puissance émise par les sources laser.

Les lasers les plus puissants, les plus compacts et les plus efficaces aujourd'hui sont les lasers solides, ainsi appelés car le milieu générant la puissance lumineuse est sous forme solide : généralement un barreau cylindrique ou une plaque parallélépipédique. Les fibres optiques dopées constituent également des milieux solides de choix pour réaliser des sources laser compactes, robustes et efficaces. Cependant, ces milieux solides s'échauffent lorsqu'ils sont mis en œuvre, et leurs performances se dégradent si l'échauffement devient trop important, limitant ainsi leur montée en puissance. Dans les lasers à fibres où ces effets thermiques sont toutefois beaucoup moins limitants que dans les lasers solides à barreaux ou à plaques, des effets non linéaires viennent s'ajouter et limiter aussi la montée en puissance.

Le lecteur trouvera en fin d'article un glossaire des termes utilisés.

Points clés

Domaine : Électronique – Photonique

Degré de diffusion de la technologie : Croissance

Technologies impliquées : Laser, optique, électronique

Domaines d'application : Développement de sources laser et montée en puissance.

Contact : pierre.bourdon@onera.fr

1. Contexte

Afin de dépasser les limites en puissance et de continuer à augmenter les performances des systèmes mettant en œuvre ces lasers solides, il est possible de parvenir à additionner la puissance émise simultanément par plusieurs lasers, et de dépasser les limites intrinsèques de montée en puissance d'un seul laser. On appelle ces **procédés d'addition de puissance de plusieurs lasers** unitaires des techniques de combinaison de sources laser. Ils se distinguent les uns des autres par leur efficacité, puisque certains procédés induisent des pertes qui ne permettent pas toujours de disposer, après combinaison, de 100 % de la puissance additionnée des lasers. On vise bien évidemment à atteindre cette efficacité maximale et à ne pas perdre de puissance laser lors de la combinaison mais, selon la technique employée, cela n'est pas toujours possible.

Les techniques qui ont été développées et testées au fil des années sont nombreuses : mélange incohérent en polarisations croisées, mélange par multiplexage en longueurs d'ondes, addition cohérente de sources laser, combinaison cohérente par couplage par ondes évanescentes, combinaison cohérente par contrôle actif de la phase ou encore combinaison cohérente par conjugaison de phase. On peut les regrouper en deux grandes familles que l'on décrira plus loin : les **méthodes incohérentes** et les **méthodes cohérentes de combinaison**, selon, respectivement, que les lasers se combinent sans interférence en se superposant simplement, ou que les lasers interfèrent quand on les additionne, générant un profil spatial de faisceau modulé par des franges d'interférence. On peut aussi distinguer les techniques purement passives, où les lasers se combinent sans action externe de l'utilisateur sur leurs paramètres d'émission (ces méthodes passives conduisent à des systèmes dits auto-organisés) et les techniques actives où certains paramètres d'émission des lasers sont contrôlés en temps réel par une boucle d'asservissement, afin d'optimiser l'efficacité de combinaison en permanence.

Dans cet article, nous décrivons les principes d'opération des principales techniques de combinaison de lasers, celles qui ont conduit aux gains en puissance les plus élevés, puis nous analysons les points durs technologiques de mise en œuvre de ces procédés, ainsi que les limitations en montée en puissance que ces points durs technologiques induisent. On essaie pour chaque technique de chiffrer ces limitations en fournissant, soit un nombre maximum de sources laser combinables, soit un niveau maximum de puissance laser supporté.

2. Techniques de combinaison incohérente

Le principe fondamental de la combinaison de lasers repose sur l'addition des puissances émises par plusieurs sources laser unitaires. La première approche à considérer est donc une **addition par superposition de faisceaux laser** où sont alignés plusieurs faisceaux laser, afin qu'ils illuminent la même zone d'une cible ou d'un objet, ou encore de l'environnement que l'on veut mesurer. La puissance totale additionnée des lasers est alors égale, en théorie, à la somme des puissances émises par chaque laser.

Cependant, ce raisonnement n'est vrai que si les faisceaux laser n'interfèrent pas dans le plan où ils se recouvrent. Or, de nombreux faisceaux laser sont très cohérents, c'est-à-dire que tous les photons émis par une source laser unitaire partagent une même longueur d'onde, une même polarisation et une même phase. Si toutes les sources laser sont identiques, elles partagent également cette même longueur d'onde et cette même polarisation. De ce fait, elles interféreront en se superpo-

sant et généreront une figure d'interférences composée de lobes clairs où l'intensité lumineuse résultante est forte, et de lobes sombres où l'intensité lumineuse s'annule.

Pour parvenir à additionner par superposition des puissances laser sans modifier la répartition d'intensité lumineuse dans le faisceau, il faut donc que les sources soient peu ou pas cohérentes et n'interfèrent pas.

La **combinaison incohérente** de faisceaux laser est donc une superposition additive sans interférence de ces faisceaux, donc sans modification de la répartition d'intensité lumineuse dans le faisceau.

Pour quantifier la performance des techniques de combinaison de lasers, on utilise la grandeur **efficacité de combinaison**, qui correspond à la fraction de puissance résultant de la combinaison, rapportée à la puissance totale additionnée des N sources combinées.

Un paramètre souvent associé à l'efficacité de combinaison est le **facteur de qualité** d'un faisceau laser noté M^2 .

En effet, un faisceau laser n'est jamais parfaitement directif, il diverge et sa **divergence minimale** est impactée par la qualité spatiale de la source laser émettrice et par le diamètre des optiques utilisées pour mettre en forme et renvoyer ce faisceau. La divergence minimale d'un faisceau laser, si sa qualité spatiale est optimale, est inversement proportionnelle au diamètre de l'optique qui le met en forme ou le renvoie.

Le facteur M^2 traduit la qualité du faisceau laser et l'écart à la divergence minimale, à cette limite de diffraction par un facteur multiplicatif.

M^2 vaut 1 pour un faisceau parfait qui aura exactement la divergence minimale : on parle de **faisceau limité par diffraction**. Pour un faisceau de qualité moindre, M^2 est supérieur à 1 et la divergence minimale du faisceau est multipliée par ce facteur M^2 . Par exemple, un faisceau de $M^2 = 2$ sera 2 fois plus divergent que le faisceau parfait limité par diffraction.

Nous allons maintenant examiner les différentes techniques permettant de parvenir à effectuer la combinaison incohérente de faisceaux laser par superposition sans interférences.

2.1 Combinaison par superposition de polarisations

Une première technique de combinaison incohérente, la plus simple, est de superposer deux faisceaux laser dont les polarisations sont croisées.

On appelle **polarisation** d'un faisceau laser la direction de son champ électrique. Cette polarisation est le plus souvent transverse, c'est-à-dire perpendiculaire à la direction de propagation du faisceau laser. De nombreux laser émettent des faisceaux dont la polarisation est constante dans le temps : on parle de **polarisation linéaire** ou de faisceaux polarisés linéairement.

Quand on superpose deux faisceaux laser linéairement polarisés dont les directions de polarisation sont croisées (c'est-à-dire perpendiculaires), les faisceaux ne peuvent pas interférer et

additionneront simplement leurs profils spatiaux et donc leurs puissances dans le plan de superposition.

Par contre, pour qu'il n'y ait pas d'interférence entre les faisceaux, les deux conditions précédentes sont indispensables afin que les **directions de polarisation instantanées des lasers soient perpendiculaires**. Cette condition d'orthogonalité des polarisations limite donc cette technique à la combinaison de 2 sources laser au maximum.

Cette technique de combinaison est néanmoins couramment employée pour multiplier par 2 la puissance émise par certains lasers de forte puissance, comme par exemple des diodes laser de puissance. Les diodes laser émettent généralement un faisceau laser polarisé linéairement, perpendiculairement à la jonction émettrice dans le matériau semi-conducteur qui les constitue. On profite de cette propriété de polarisation linéaire pour utiliser cette méthode très simple de combinaison afin de coupler 2 par 2 les modules de diodes laser de puissance et réaliser des systèmes de diodes laser encore plus puissants. La figure 1 montre comment superposer de la sorte deux faisceaux, le faisceau du laser polarisé horizontalement représenté en rouge, et le faisceau du laser polarisé verticalement en bleu (les flèches placées à côté des axes de propagation indiquent les polarisations des deux faisceaux).

Les composants optiques utiles pour effectuer cette superposition sont des polariseurs. N'importe quel polariseur peut être utilisé pour ce faire, puisqu'un polariseur permet de séparer deux composantes de polarisation croisées. Utilisé en sens inverse, il superposera donc deux composantes croisées de polarisation. On peut ainsi utiliser aussi bien les prismes polariseurs (figure 1), par exemple les prismes de Glan, que les lames polarisantes recouvertes d'un traitement multi-couches diélectriques séparateur de polarisations.

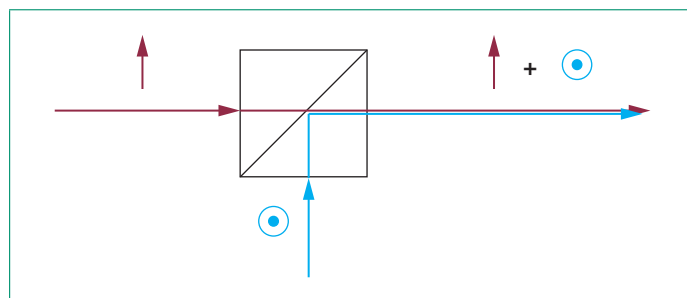


Figure 1 – Schéma de principe (vue de dessus) de la combinaison par superposition de polarisation

Il est possible dans certains cas d'**étendre la technique de combinaison par polarisation à un nombre plus élevé de sources laser**, en ajoutant des dispositifs de rotation de polarisation et en procédant de proche en proche « en cascade ». On superpose les lasers 2 par 2, en ajoutant à chaque étape un faisceau laser superposé (figure 2). Toutefois, cela n'est possible que dans le cas particulier où les lasers sont très cohérents (fins spectralement) et sont mis en phase, par exemple par un contrôle actif de la phase. En effet, la polarisation résultante de la combinaison de deux faisceaux polarisés linéairement n'est pas forcément, quant à elle, polarisée linéairement. La direction de son champ électrique peut fluctuer dans le temps au gré des fluctuations de phase indépendantes des deux sources laser qui ont été superposées.

Si les deux lasers sont cohérents et mis en phase, par contre, la résultante de leur combinaison par polarisation est un laser linéairement polarisé à 45° de chacune des polarisations croisées initiales (figure 2). On peut donc envisager ensuite de combiner de nouveau ce faisceau polarisé linéairement par polarisation croisée, et construire ainsi un schéma de combinaison par polarisation « en cascade », soit en ajoutant une lame demi-onde pour tourner de 45° la polarisation avant le second prisme combineur (figure 2), soit en tournant de 45° le second prisme combineur et son axe sélectif en polarisation.

L'expérience montre cependant que cette approche en cascade est limitée en nombre de sources combinées, à la fois par les difficultés d'alignement de ce type de dispositif, mais surtout par les pertes de puissance à chaque étage de combinaison. Ainsi, l'institut Friedrich Schiller de Jena (Allemagne), qui a tenté de combiner de la sorte plusieurs lasers femtoseconde, a dû se limiter à en combiner 4 [1]. Au-delà de ce nombre, il ne s'est pas avéré possible de limiter les pertes de puissance suffisamment pour maintenir une efficacité de combinaison de 100 %. Selon cette équipe, quelle que soit l'application, le seuil rédhibitoire en matière de pertes induites par le composant de combinaison, conduisant à une dégradation trop importante des faisceaux laser combinés et une baisse d'efficacité de combinaison inacceptable, est estimé à 8 sources laser combinées.

2.2 Combinaison par superposition spatiale

Quand on dispose de lasers émettant un spectre très large, leur cohérence temporelle est suffisamment faible pour que le contraste des franges d'interférence obtenues en les superposant spatialement soit très réduit. On peut donc superposer **des lasers très larges spectres** (plusieurs nanomètres de largeur spectrale) sans risque que les interférences soient sensibles et qu'elles perturbent le profil spatial du faisceau laser combiné résultant.

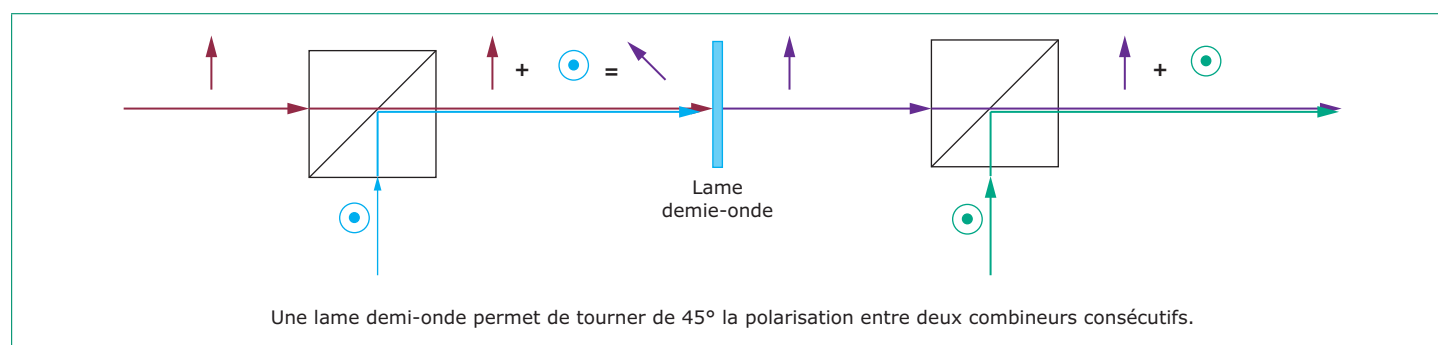


Figure 2 – Combinaison par superposition de polarisation en cascade

La technique de combinaison incohérente la plus simple, dans le cas de ces sources très larges spectralement, qu'il s'agisse de diodes laser ou de lasers à fibres de forte puissance, est donc d'utiliser des dispositifs d'alignement et de pointage des faisceaux laser permettant de superposer spatialement dans un plan donné tous les faisceaux. Les faisceaux ne pouvant pas interférer efficacement vont simplement additionner leurs profils spatiaux (et donc leurs puissances) dans le plan où ils se superposent.

Cette approche a été mise en œuvre pour réaliser **trois démonstrateurs d'armes laser anti-structures** ; des systèmes laser militaires de très forte puissance, de l'ordre de 50 kW, destinés à détruire à distance (plusieurs kilomètres) des drones en les brûlant par échauffement laser.

2.2.1 Configurations optiques

Deux configurations optiques ont été retenues pour co-aligner les faisceaux laser sur leur cible dans ces démonstrateurs d'armes laser.

La première consiste à **utiliser un télescope pour pré-aligner les faisceaux laser** et les superposer (figure 3) : les faisceaux laser, représentés en rouge, sont introduits en couronne dans le télescope et leurs directions pré-alignées pour qu'ils soient superposés au foyer en champ lointain, à grande distance.

Une autre approche consiste à **utiliser des dispositifs de pointage séparés** et à aligner plusieurs faisceaux laser sur un même point de la cible en demandant à chaque dispositif de pointage de viser le même point et d'assurer ainsi le co-alignement et la superposition des faisceaux sur cible. Évidemment, cette approche est un peu plus complexe à aligner, mais elle fonctionne également.

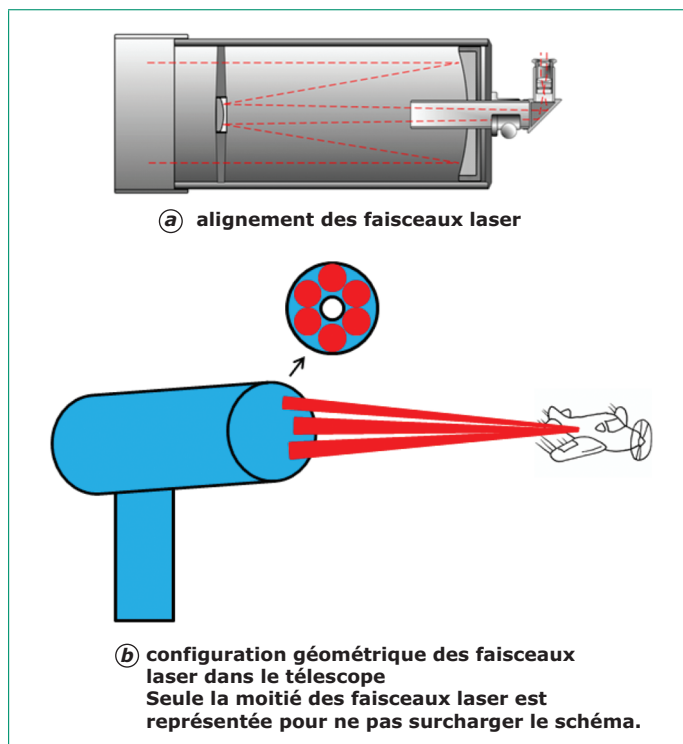


Figure 3 – Principe de superposition de faisceaux laser par télescope

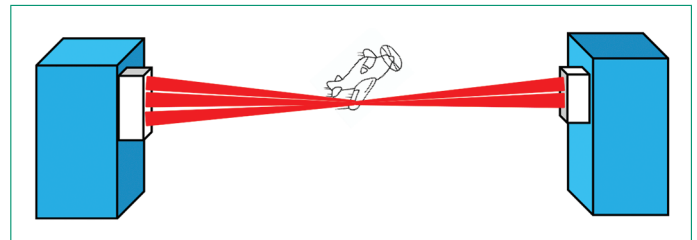


Figure 4 – Schéma du démonstrateur d'arme laser Rheinmetall

Les démonstrateurs d'armes laser anti-structures ainsi développés sont :

- le système LaWS (*Laser Weapon System*) aux États-Unis par l'US Navy, composé de 6 lasers à fibres 8 kW IPG Photonics superposés à l'aide d'un télescope pour une puissance totale de 50 kW [2] [3] (figure 3b) ;
- un démonstrateur 50 kW en Allemagne par Rheinmetall composé de 5 lasers à fibres 10 kW IPG Photonics superposés sur cible à l'aide de 2 stations au sol, l'une pointant 3 des faisceaux laser (pré-alignés dans la tourelle de la station sol) et l'autre assurant le pointage des 2 autres faisceaux laser [4] (figure 4) ;
- un démonstrateur 40 kW en Allemagne également, mais par MBDA, composé de 4 lasers à fibres 10 kW IPG Photonics, superposés grâce à un télescope comme dans le système LaWS [5].

Des campagnes d'essais de tirs sur des objets cibles variés ont été conduites avec ces démonstrateurs pour démontrer leur létalité. Les objets visés représentaient les cibles potentielles de ces systèmes d'armes, à savoir des drones ou des munitions explosives (obus, roquettes...).

Outre sa simplicité, l'intérêt de cette technique de combinaison est de permettre d'utiliser des sources laser fibrées disponibles commercialement (lasers à fibres 10 kW large bande spectrale et limités par diffraction fabriqués par la société IPG Photonics Inc. aux États-Unis), ainsi que des tourelles de pointage standard pour les faisceaux laser.

2.2.2 Limitation des performances

Cependant, comme l'erreur de pointage ou d'alignement de chaque faisceau laser s'additionne à celle de tous les autres, cette approche conduit à un diamètre de zone éclairée par le rayonnement laser d'autant plus grand que le nombre de lasers superposés augmente. De ce fait, la portée des démonstrateurs développés reste limitée, entre quelques centaines de mètres et 1 à 2 km, en raison de l'efficacité limitée de cette technique simple à garder la puissance laser concentrée à longue distance. Et comme la létalité d'une arme laser repose sur sa capacité à déposer une densité de puissance élevée sur sa cible (la **densité de puissance** correspond au rapport entre la puissance laser et la surface de la zone éclairée par laser), la baisse de densité de puissance induite par les erreurs de pointage ou d'alignement des faisceaux laser, qui doivent tous ensemble pointer très précisément le même point de la cible, limite les performances de ces démonstrateurs.

Le Naval Research Laboratory (NRL) a conduit une étude de faisabilité pour essayer d'optimiser cette densité de puissance en utilisant des **dispositifs de micro-pointage individuels supplémentaires** sur chacun des faisceaux laser [6]. Cette solution permet une optimisation en temps réel, faisceau par faisceau, du pointage et de l'alignement des lasers sur un même point de la cible. Malgré cela, l'étude du NRL montre que compte tenu de l'impact de la propagation atmosphérique des

lasers, des défauts de pointage des dispositifs opto-mécaniques et de l'instabilité de pointé intrinsèque d'un faisceau, la portée maximale d'une arme laser utilisant cette technique de combinaison par superposition optimisée est de 2 à 3 km seulement.

La technique de combinaison par superposition spatiale de faisceaux brille donc par sa simplicité de mise en œuvre et sa compatibilité avec n'importe quelle source laser large bande spectrale, mais reste **limitée quant à la densité de puissance laser combinée** qu'elle permet d'atteindre. L'étalement de la zone éclairée par le laser limite le nombre de sources que l'on peut combiner à une dizaine environ.

2.3 Combinaison par superposition spectrale

La **combinaison spectrale**, encore appelée **combinaison par multiplexage en longueur d'onde**, consiste à superposer spatialement à l'aide d'un réseau diffractif, les faisceaux de plusieurs lasers dont les spectres optiques sont légèrement décalés.

Un exemple de configuration de combinaison spectrale est présenté en figure 5. Les 3 faisceaux sont superposés sur le réseau de diffraction, mais ont des angles d'incidence différents et adaptés, compte tenu de leurs longueurs d'onde respectives, pour que les 3 faisceaux laser soient diffractés dans la même direction par le réseau. Dans cet exemple, les directions d'incidence des 3 faisceaux laser combinés sont **générées à l'aide d'une lentille convergente**, en décalant chaque faisceau laser du centre de la lentille pour qu'il ressorte de la lentille avec l'angle d'incidence approprié sur le réseau de diffraction. On aurait aussi pu utiliser 3 miroirs distincts, un par faisceau laser, pour superposer les faisceaux sur le réseau avec les angles d'incidence adéquats.

On notera que la combinaison spectrale est bien un processus d'« addition » de faisceaux laser, comme on peut le constater en observant le spectre lumineux diffracté par le réseau (figure 5b) qui est l'addition des 3 spectres individuels des lasers.

Ce multiplexage en longueur d'onde est utilisé couramment, dans le domaine des télécommunications par fibres optiques par exemple, afin d'additionner des signaux numériques véhicu-

lant de l'information, et d'augmenter ainsi le débit des liaisons téléphoniques ou internet.

Ici, on considère non pas l'intérêt de ce multiplexage pour additionner des signaux numériques, mais pour additionner des puissances laser en utilisant un procédé identique.

2.3.1 Technique expérimentale

La combinaison spectrale repose toujours sur un composant multiplexeur : un **réseau diffractif**. Le principe de fonctionnement d'un réseau diffractif est simple : la direction dans laquelle le réseau renvoie la lumière varie avec la longueur d'onde et la direction d'incidence de la lumière sur le réseau. Un exemple de réseau diffractif est le réseau gravé sur lequel des stries rectilignes parallèles et périodiques sont inscrites mécaniquement ou optiquement. Il s'agit alors de réseaux holographiques avec inscription du réseau périodique sous forme d'hologramme, en volume ou sur une faible épaisseur en surface ; le réseau est donc présent en volume dans le matériau constituant le composant holographique.

On peut montrer que la loi de diffraction en réflexion d'un réseau gravé de la sorte est la suivante (figure 6a) :

$$\sin \theta_{r,m} + \sin \theta_i = \frac{m \lambda}{d}$$

avec d période du réseau de traits gravés,

θ_i angle d'incidence sur le réseau,

$\theta_{r,m}$ angle de réflexion définissant la direction dans laquelle le réseau diffracte la lumière à la longueur d'onde λ et pour l'ordre de diffraction m du réseau (m étant un entier).

Sur un tel réseau où le pas d est fixé lors de sa fabrication, on peut donc trouver, pour chaque longueur d'onde, un angle d'incidence qui permet de renvoyer un faisceau laser à cette longueur d'onde dans une direction donnée. Si on se fixe une direction de renvoi, on arrive au schéma de la figure 5, où chacune des 3 longueurs d'onde arrive sur le réseau avec un angle d'incidence bien choisi pour être diffractée par le réseau dans la même direction que les 2 autres longueurs d'onde. On superpose ainsi en sortie de réseau de diffraction tous les faisceaux laser. Le spectre résultant est un **peigne de longueurs d'onde**, constitué de l'addition des spectres individuels des lasers combinés.

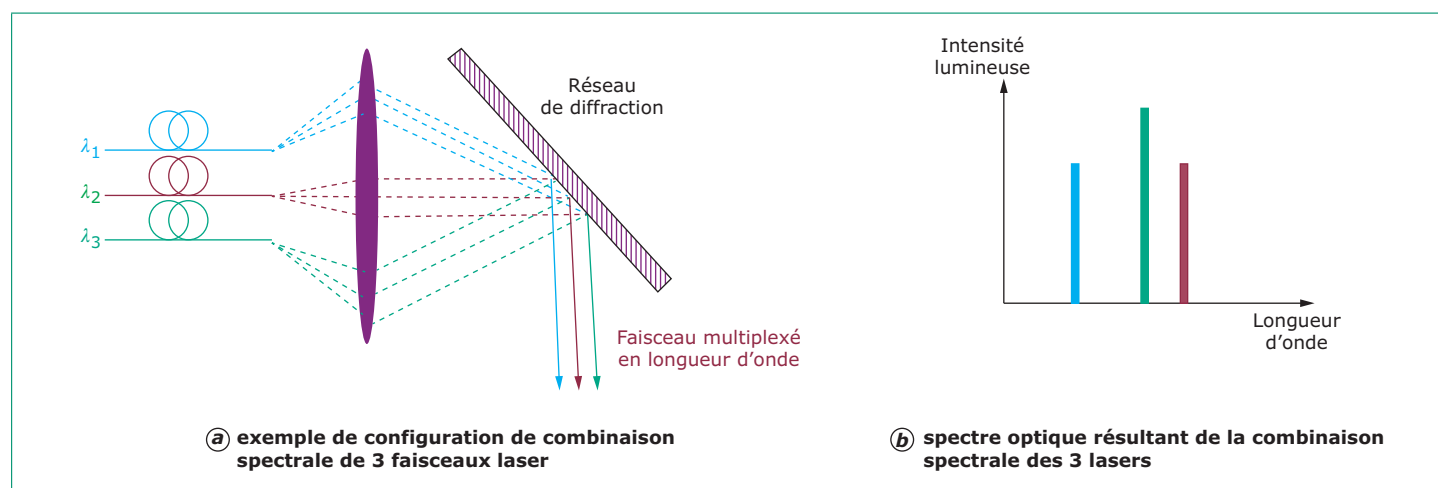


Figure 5 – Schéma de principe de la combinaison spectrale

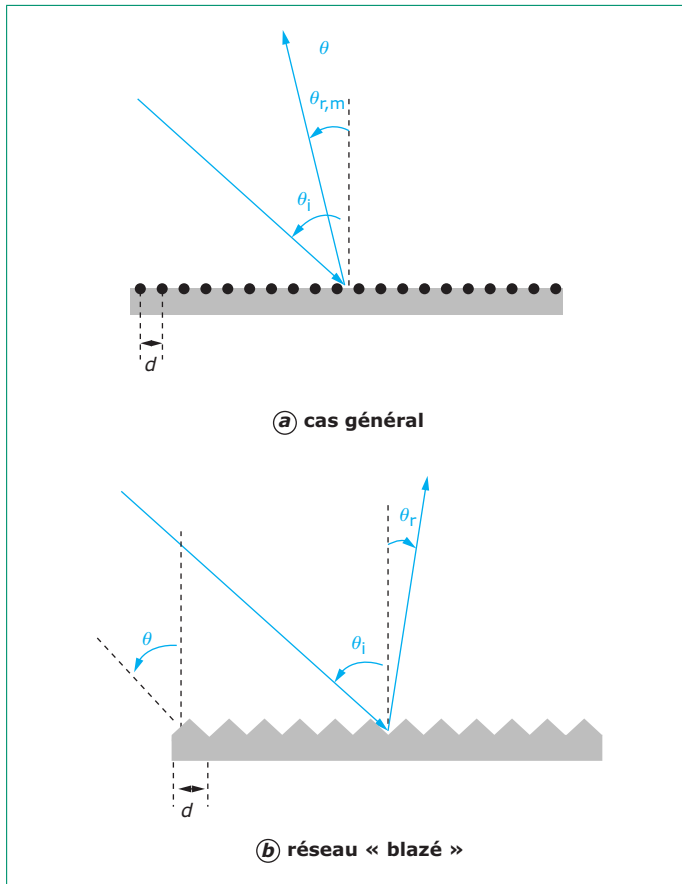


Figure 6 – Diffraction d'ordre m par un réseau gravé

Néanmoins, même si une fraction importante de la lumière est renvoyée dans un ordre appelé **ordre principal du réseau**, la lumière est aussi renvoyée dans une moindre proportion dans d'autres ordres et dans d'autres directions. La direction de renvoi de la lumière n'est donc pas unique. C'est pourquoi on utilise aussi très souvent des réseaux dits « blazés » où, au lieu d'inscrire de simples traits en surface du réseau, on inscrit des zones planes inclinées en « marches d'escaliers » appelées **échelettes**, et dont l'inclinaison peut être optimisée pour rendre maximale la diffraction du réseau dans son ordre principal (figure 6b). On obtient ainsi des réseaux qui diffractent plus de 90 % de la lumière dans un seul ordre et dans une direction unique associée à cet ordre, définie par $\theta_r = 2\theta - \theta_i$ où θ est l'**angle de « blaze »**, c'est-à-dire l'inclinaison des échelettes. On retiendra qu'un réseau à échelette est optimisé pour fonctionner pour des valeurs de θ_i proches de θ et qu'il faut donc privilégier une direction incidence perpendiculaire au plan des échelettes.

Il existe d'autres types de réseaux inscrits, non pas en surface, mais en profondeur dans un matériau.

Les **réseaux multi-couches diélectriques** sont gravés sur une faible profondeur en surface d'un substrat, par dépôt de couches successives d'indices de réfraction variables. Le traitement multi-couches diélectriques est déposé sous vide par des techniques de dépôt chimique en phase vapeur : on dépose couche par couche des matériaux diélectriques différents choisis en fonction de leurs indices de réfraction respectifs. La struc-

ture par couches d'indices de réfraction variables est pré-calculée pour générer le bon filtre spectral en réflexion ou en transmission.

Les **réseaux de Bragg** en volume sont similaires aux réseaux de traits gravés décrits plus haut, mais sont inscrits en profondeur, par holographie, dans le volume d'un verre photosensible.

De la même façon qu'un réseau gravé en surface d'un matériau, les réseaux multi-couches diélectriques et les réseaux de Bragg en volume vont renvoyer la lumière (c'est-à-dire la diffracter), dans une direction qui dépend de la direction d'incidence de la lumière et de sa longueur d'onde.

La technique de combinaison spectrale a été particulièrement développée pour monter en puissance les lasers au début des années 2000, tout d'abord pour accéder à **des puissances laser combinées de quelques centaines de watts**. Les deux records principaux de l'époque, en combinaison spectrale, sont détenus :

- par la société Aculight Corporation qui a démontré la combinaison de 2 lasers à fibres dopées ytterbium continus avec une puissance totale de 260 W [7], un M^2 de 1,05 et une efficacité de conversion de 93 % (ce qui signifie que 93 % de la puissance totale des 2 lasers est concentrée dans le faisceau réfléchi par le réseau de diffraction multi-couches diélectriques) ;

- par le laboratoire CREOL de l'université centrale de Floride, qui a combiné 2 faisceaux émis par des lasers à fibres dopées ytterbium continus grâce à un réseau de Bragg inscrit dans un verre inorganique photo-thermo-réfractif (PTR) avec une efficacité de 75 %, pour une puissance combinée de 125 W [8].

Plus récemment, les niveaux de puissance obtenus par combinaison spectrale ont atteint des niveaux record. Les principaux records de puissance de la combinaison spectrale sont :

- l'IAP Jena (Allemagne) avec 2,3 kW pour un $M^2 = 1,5$ [9] obtenus en combinant 4 lasers à fibres de $M^2 = 1,2$, qui poussés à leur puissance maximum de 2 kW chacun permettent d'obtenir 8,2 kW combinés, pour un $M^2 = 4$ [10], soit une perte d'un facteur 2,8 en densité de puissance ; l'efficacité de combinaison obtenue est de 99 % ;

- Lockheed Martin Aculight avec 3,1 kW obtenus [11] en combinant 12 lasers à fibres 280 W, le M^2 initial des faisceaux est de 1,1, et la combinaison spectrale conserve une bonne qualité de faisceau combiné avec un M^2 final de 1,35 ; l'efficacité de combinaison est de 92 %.

On constate au passage, sur ces deux records, que la combinaison spectrale brille par son **efficacité de combinaison** qui reste supérieure à 90 %, ce qui est excellent. De par sa nature incohérente, cette technique de combinaison permet également de préserver la qualité de faisceau laser mieux que d'autres.

2.3.2 Limites de la méthode

Cependant, jusqu'à très récemment, ces records de montée en puissance par combinaison spectrale ont été limités par trois facteurs.

■ Une première limite des techniques de combinaison spectrale est liée au fait qu'elle met en œuvre une configuration où l'un des composants optiques employés, le **réseau de diffraction, est exposé à l'intégralité de la puissance laser combinée**. De plus, comme il se trouve en sortie de laser où les faisceaux combinés ont peu divergé, il reçoit en général cette puissance sur un petit diamètre de seulement quelques millimètres, accentuant encore sa vulnérabilité au flux laser.

Cependant, ce n'est jamais le seuil de dommage du matériau qui conduit à la limite en puissance combinée, mais plutôt les

conséquences critiques de l'**échauffement de ce composant** sous fort flux laser. Ainsi, les tests expérimentaux menés sur la combinaison spectrale ont montré qu'au-delà de 2 à 3 kW, l'échauffement induit dans le composant critique dégrade le plus souvent de façon importante l'efficacité de combinaison :

- l'échauffement peut dégrader le faisceau laser lui-même par les aberrations thermiques subies dans le composant critique, qu'il soit utilisé en réflexion ou en transmission [12] ;
- l'échauffement peut aussi modifier les propriétés spectrales de ce composant, par exemple en décalant en longueur d'onde la courbe de sélectivité spectrale du réseau de diffraction, limitant par là même les performances du réseau aux longueurs d'onde laser considérées [13].

Cette dégradation de performances peut se produire pour les deux technologies de réseaux de diffraction, réseau gravé en surface et réseau de Bragg en volume. En effet, même si l'optimisation de leurs techniques de fabrication a permis de réduire considérablement l'absorption intrinsèque de ces réseaux (par exemple, une absorption extrêmement faible de $6 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$ seulement pour les réseaux de Bragg en volume inscrits dans les verres photo-thermo réfractifs (PTR) de l'université Centrale de Floride), cette absorption résiduelle génère des **gradients thermiques locaux rédhibitoires sous éclaircissement laser forte puissance**. En pratique, cela limite autour de 750 W la puissance totale combinée dans le cas des réseaux de Bragg en volume dans les verres PTR. Si on expose le réseau de Bragg à une puissance totale combinée dépassant ce niveau, le faisceau laser est fortement dégradé, souvent de façon critique pour son utilisation pratique [12]. Quelle que soit la technologie retenue pour fabriquer les réseaux de diffraction, on observe le plus souvent des difficultés à dépasser 2 kW de puissance totale tout en obtenant un faisceau laser combiné de bonne qualité.

■ Une seconde limite de la combinaison spectrale tient au **besoin de pureté spectrale des lasers individuels** quand on souhaite combiner un grand nombre de sources laser. En effet, une condition essentielle pour une combinaison spectrale efficace est que les spectres des lasers individuels ne se recouvrent pas (figure 7). On comprend donc aisément que plus le nombre de lasers à combiner devient grand, plus fin devra être le spectre de chaque laser pour qu'il ne se recouvre pas avec le spectre d'un autre laser combiné.

Cela explique aussi le **recours aux lasers à fibres**, qui possèdent une plage de gain large, c'est-à-dire une plage de longueur d'onde d'émission laser étendue, en général sur plusieurs dizaines de nanomètres (par exemple, les lasers à fibres dopés ytterbium peuvent émettre n'importe quelle longueur d'onde

comprise entre 1 030 et 1 080 nm environ). On peut donc trouver de nombreuses longueurs d'onde d'émission distinctes à l'intérieur de la plage d'émission des lasers à fibres.

■ Une troisième limite de la combinaison spectrale tient à la **sensibilité angulaire des réseaux de diffraction**. Cette sensibilité varie peu d'une technologie de fabrication à une autre et ces réseaux ont des acceptances angulaires très faibles, nécessitant des précisions d'alignement angulaires meilleures que le microradian. Cela induit des limites en stabilité opto-mécanique des configurations de combinaison spectrale. On observe aussi des limites en puissance liées aux déviations angulaires induites par l'échauffement de certains composants lors de la montée en puissance. Ainsi, Lockheed Martin Aculight n'a pu dépasser 3,1 kW combinés dans son record précédemment cité, en raison d'un échauffement du composant servant à maintenir l'extrémité des fibres de puissance, en amont du réseau de diffraction. Cet échauffement conduit à un **défaut d'alignement des fibres sur le réseau** et à une chute d'efficacité de combinaison.

Cette problématique a cependant depuis été résolue et Lockheed Martin détient aujourd'hui le record absolu de puissance par combinaison spectrale : 30 kW obtenus en combinant 96 lasers à fibres de 330 W chacun à l'aide d'un réseau multicouches diélectriques [14].

L'alignement d'un tel système reste cependant très complexe et la tenue dans le temps de cet alignement discutable. Il apparaît dans ce résultat que la technologie de réseau de diffraction multicouches diélectriques est une approche très robuste et dont on peut réduire suffisamment l'absorption intrinsèque pour qu'elle supporte 30 kW de puissance laser sans voir les propriétés spectrales du réseau sensiblement dégradées.

■ La technique de combinaison spectrale à l'aide d'un réseau de diffraction multicouches diélectriques est donc **l'une des techniques les plus prometteuses** pour la montée en puissance des lasers, sous réserve que l'on n'ait pas besoin d'une source laser fortement cohérente (c'est-à-dire à spectre fin et mono-fréquence), car le spectre émis par combinaison spectrale est l'addition des spectres des lasers combinés. Ce spectre est donc d'autant moins fin et d'autant moins pur que l'on combine un grand nombre de lasers.

Le nombre maximal de lasers combinables dans des conditions raisonnables de contraintes et de stabilité d'alignement est d'environ 50, même si une réalisation récente particulièrement ambitieuse d'une centaine de sources laser combinées a pu être démontrée.

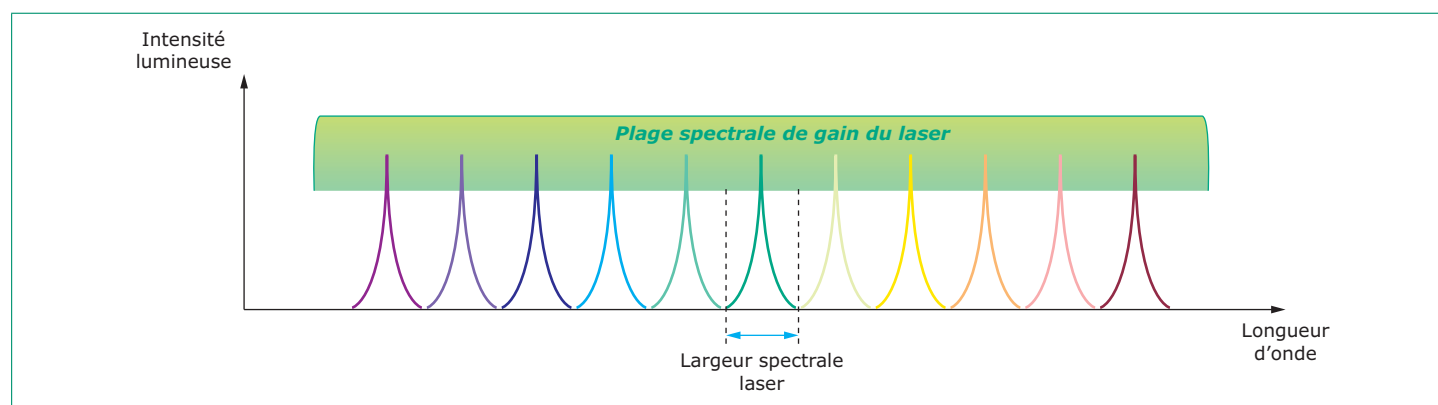


Figure 7 – Espaceur minimal des spectres laser pour une combinaison spectrale efficace

3. Techniques de combinaison cohérente

Une deuxième approche pour additionner les puissances émises par plusieurs sources laser unitaires est une **addition par interférences optiques**. Compte tenu de la cohérence de la plupart des sources laser, c'est même souvent la seule option envisageable, puisque la superposition de faisceaux laser fortement cohérents provenant de lasers identiques (même longueur d'onde et même polarisation) conduit inmanquablement à la création d'une figure d'interférence entre ces faisceaux. Le profil spatial lisse du faisceau laser, le plus souvent gaussien à l'émission, devient alors modulé par les lobes clairs de la figure d'interférence où l'intensité lumineuse résultante est forte, et les lobes sombres où l'intensité lumineuse s'annule.

Deux grandes configurations géométriques sont possibles pour les faisceaux laser dans ce cas (figure 8) :

- soit on **superpose les faisceaux en cascade**, les ajoutant un par un à l'aide de lames de mélange ;
- soit on **juxtapose les faisceaux laser en les plaçant côte à côte**, et on les laisse se propager librement et se superposer au loin (en champ lointain) compte tenu de leur divergence naturelle.

La géométrie de la figure d'interférence obtenue est différente dans ces 2 cas, avec, dans le cas de la superposition en cascade, une figure d'interférence à symétrie de révolution constituée d'un lobe central d'interférence circulaire entouré d'anneaux et, dans le cas de la juxtaposition, un réseau périodique en 2 dimensions de lobes d'interférences, inscrit dans une enveloppe qui suit la forme du profil spatial d'un faisceau laser unitaire pris dans le même plan de propagation.

Dans le schéma de la figure 8, la géométrie des faisceaux à courte distance de propagation (c'est-à-dire juste en sortie de la dernière optique de superposition, ou juste en sortie des optiques juxtaposées, selon le cas considéré) est appelée **champ proche**. La figure d'interférence générée après propagation sur une distance suffisamment longue (les interférences optiques n'apparaissent qu'après propagation des

faisceaux superposés sur une distance suffisante) est assimilée à ce que l'on appelle le **champ lointain**. Dans la figure 8, les profils spatiaux (sections) des faisceaux et des lobes d'interférence sont schématisés par des ronds rouges, mais sont en réalité des profils gaussiens. La divergence naturelle des faisceaux n'est pas schématisée en haut à gauche de la figure 8.

La **combinaison cohérente** de faisceaux laser est donc une superposition additive par interférence de faisceaux partageant une même longueur d'onde et une même polarisation. Elle conduit à une nouvelle répartition de la puissance additionnée des sources laser dans les différents lobes de la figure d'interférence générée.

De même qu'en combinaison incohérente, on quantifie la performance des techniques de combinaison cohérente de lasers par la grandeur **efficacité de combinaison**. Il existe toutefois différentes définitions possibles de cette efficacité. Quelle que soit la définition retenue, l'efficacité correspond toujours à la fraction de puissance résultant de la combinaison dans une partie de la figure d'interférence (la partie utile de la figure d'interférence pour l'application visée), rapportée à la puissance totale additionnée des N sources combinées. La partie de figure d'interférence considérée n'est cependant pas toujours la même puisqu'elle dépend de l'usage qui sera fait de la puissance laser contenue dans cette figure.

Ainsi, le plus souvent, l'efficacité de combinaison correspond à la fraction de puissance **concentrée dans le lobe central de la figure d'interférence**, mais on peut aussi considérer des zones circulaires de diamètre donné (lié ou non à la diffraction par les optiques employées) centrées dans la figure d'interférence, ou encore utiliser l'ensemble des lobes d'interférence ou partie d'entre eux et définir l'efficacité comme la fraction de puissance **concentrée dans un groupe de lobes d'interférence**, selon le besoin et l'application visée.

On reviendra un peu plus loin sur les critères d'efficacité usuels des techniques de combinaison cohérente.

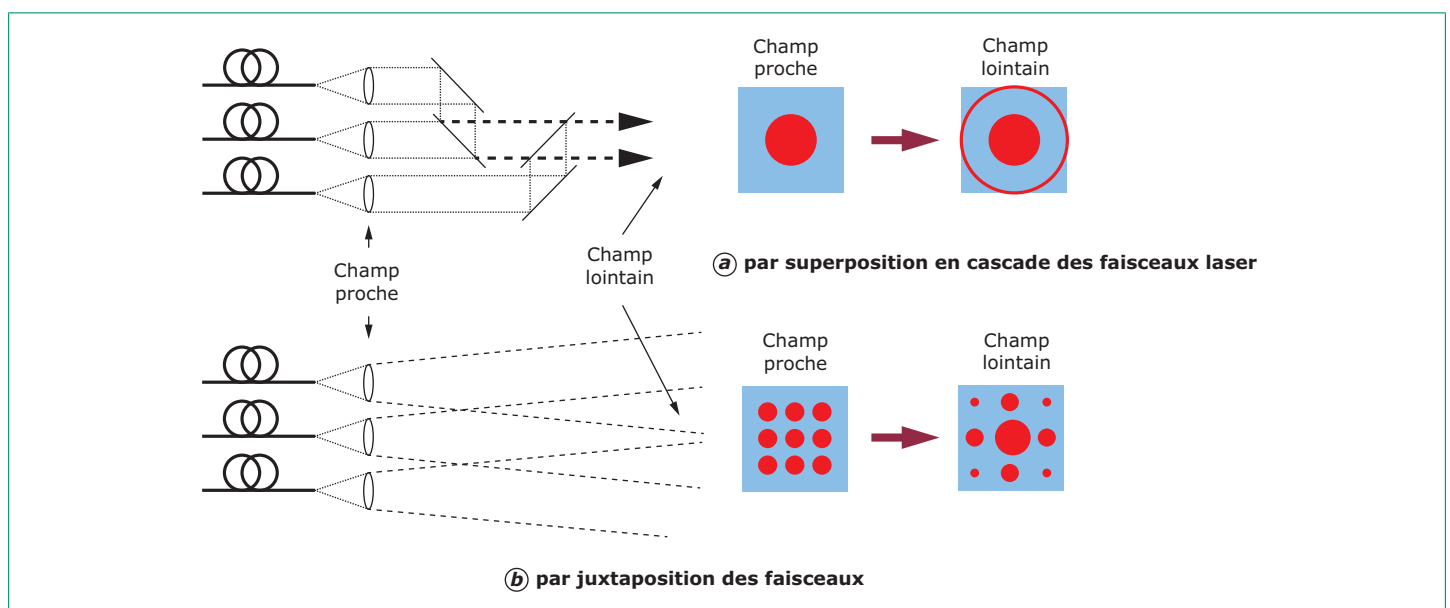


Figure 8 – Configurations géométriques de combinaison cohérente

Il est certain, que la figure d'interférence est un instantané de l'interférence et, les phases des lasers combinés fluctuant librement, cette figure d'interférence ne sera pas stable en position et les lobes d'interférence se déplaceront au gré de ces fluctuations. La puissance laser ne restera donc pas concentrée à l'intérieur d'une zone circulaire fixe, et en moyenne, la fraction de puissance confinée dans une zone circulaire centrée sur l'axe de propagation lumineuse pourra être extrêmement faible, ce qui sera dommageable pour de nombreuses applications où on cherche à envoyer un maximum de puissance laser vers un point fixe donné.

Pour cette raison, la plupart des critères d'efficacité de la **combinaison** cohérente mesurent la fraction de puissance concentrée en moyenne dans le temps dans une zone circulaire fixe de diamètre défini par l'utilisateur.

Le temps sur lequel on moyenne la puissance laser pour estimer l'efficacité dépend aussi de l'application visée : il correspond le plus souvent à la durée pendant laquelle l'application requiert un pointage laser stable sur un point fixe.

Pour maintenir la figure d'interférence et tous ses lobes en position fixe, il est nécessaire de s'assurer que tous les lasers partagent la même phase, soit parce qu'ils s'auto-organisent pour rester en phase, soit parce qu'on contrôle leurs phases en temps réel.

Nous allons maintenant détailler ces deux modes de mise en phase de lasers et de combinaison cohérente efficace.

3.1 Combinaison cohérente passive

Une première technique pour forcer la mise en phase des sources laser en combinaison cohérente consiste à utiliser un composant optique pour coupler les faisceaux laser et forcer, par un couplage approprié, le **partage d'une phase commune par tous ces faisceaux laser**.

3.1.1 Combinaison par cavité commune

La méthode de couplage la plus simple et sans doute la plus efficace est de lier les cavités des lasers eux-mêmes par un miroir commun (figure 9).

Chaque cavité injecte ainsi sa phase dans les autres cavités par le biais des modes de cavité. Une cavité laser est un résonateur optique de longueur donnée qui force les ondes à effectuer des allers-retours dans un milieu à gain, le milieu laser. Les ondes optiques sont amplifiées fortement au fil des multiples allers-retours dans la cavité et des multiples passages dans le milieu laser amplificateur.

Dans l'exemple de la figure 9, cette technique de combinaison cohérente passive permet d'additionner le gain des 4 milieux laser, et donc les puissances que l'on obtiendrait des 4 lasers pris séparément.

Cependant, comme les ondes optiques sont cohérentes, elles interfèrent dans la cavité et une cavité laser possède donc des fréquences préférentielles qui sont celles qui interfèrent constructivement sur un aller-retour dans la cavité et les seules à voir leur puissance amplifiée efficacement dans le milieu laser. On appelle ces fréquences des **modes de cavité** et ils correspondent au peigne des fréquences qui subissent un déphasage multiple de 2π sur un aller-retour dans la cavité laser.

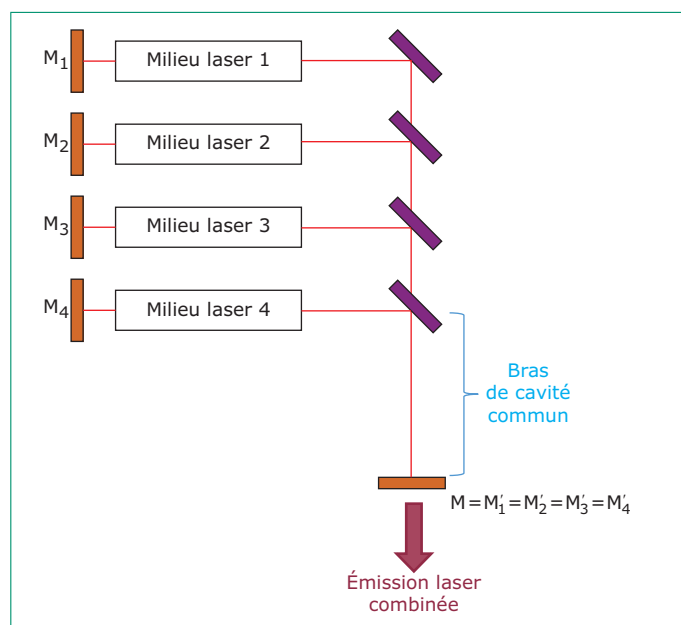


Figure 9 – Combinaison cohérente passive de 4 milieux laser en fermant les 4 cavités laser par un miroir de sortie commun

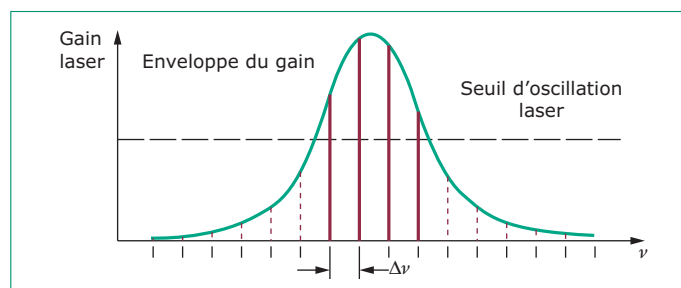


Figure 10 – Spectre d'émission d'un laser composé des modes de cavité répartis dans l'enveloppe du gain laser

Si on mesure avec une résolution suffisamment fine le spectre d'un laser, on vérifie que le spectre est la convolution du spectre de gain du laser et de ce peigne de modes de cavité, limité toutefois aux modes qui bénéficient du gain maximum et se situent au-dessus du seuil d'oscillation laser (figure 10).

Quand on couple des cavités laser comme décrit figure 9, on répartit le gain laser entre tous les milieux laser couplés, et de ce fait, seuls les modes de cavité communs à toutes les cavités couplées sont amplifiés avec un gain maximum. Comme le gain d'un laser provient de l'inversion de population du milieu, c'est-à-dire de l'excitation d'un nombre limité d'atomes du milieu, le milieu laser a une « réserve » de gain qui s'épuise au fur et à mesure qu'il amplifie des photons. Les modes de cavité amplifiés les plus fortement utilisés ont donc préférentiellement le gain laser et laissent peu de cette « réserve » de gain pour les autres modes de cavités qui sont donc minoritaires et, en général, insuffisamment amplifiés pour se distinguer du bruit de photons ambiant.

Même, si ce processus de compétition de modes est en réalité beaucoup plus complexe, on peut retenir que pour ce type de couplage, on n'amplifie efficacement que les modes de cavités qui sont communs à toutes les cavités couplées.

La **combinaison cohérente passive** consiste donc à coupler par un élément optique approprié plusieurs milieux à gain laser afin de les forcer à **s'auto-organiser** pour additionner efficacement leurs gains laser et donc leurs puissances.

Cela conduit à une première limitation importante quant au nombre maximal de lasers combinables de la sorte. En effet, on peut mathématiquement démontrer que le problème consistant à trouver un mode commun de cavité à N cavités de longueurs distinctes n'admet de solution que si $N < 20$ [15] [16].

Ce résultat se confirme d'ailleurs quand on essaie de résoudre par modélisation numérique les équations couplées de l'amplification laser dans les N cavités couplées, cela afin d'appréhender dans toute leur complexité les processus de compétition des modes de cavités et de couplage des milieux laser.

Ainsi, l'équipe de l'Université du Michigan Ann Harbor (États-Unis) a procédé à cette résolution numérique et comparé les résultats obtenus avec des résultats expérimentaux [17]. Dans cette publication, deux valeurs ont été estimées : celle de l'**efficacité de combinaison** d'une part, et celle de la **fluctuation de puissance laser pic-pic**, pour un nombre de sources laser combinées croissant de 1 à 16 d'autre part. Les résultats expérimentaux et théoriques concordent et démontrent une baisse de l'efficacité de combinaison : cette efficacité reste supérieure à 95 % pour 2 à 4 lasers, diminue à 80 % pour 10 lasers et à seulement 55 % pour 16 lasers. En prolongeant par continuité la courbe ainsi obtenue, on peut estimer l'efficacité de combinaison pour 20 sources laser à environ 20 %.

Cependant, le résultat le plus dommageable est celui des fluctuations de puissance laser combinée qui croissent au cube du nombre de lasers combinés. Si ces fluctuations restent tout à fait acceptables pour la combinaison de 2 à 4 lasers (fluctuations inférieure à 5 %), elles montent à plus de 15 % pour 10 lasers et à plus de 55 % pour 16 lasers, ce qui est rédhibitoire en matière d'instabilités de puissance laser.

Néanmoins, un premier record de puissance pour cette méthode a été obtenu en 2006 par l'équipe du Hugues Research Lab aux États-Unis, qui a couplé 2 lasers en utilisant des miroirs partiellement réfléchissants, combinant ainsi 200 W de puissance laser [18]. Aucune autre tentative de montée en puissance n'a été envisagée, tout du moins par superposition en cascade de plusieurs lasers (figure 8a), sans doute en raison de la sensibilité aux dommages du dernier miroir partiellement réfléchissant qui est exposé à l'intégralité de la puissance laser combinée. Ce miroir peut donc, tout comme le réseau utilisé pour la combinaison spectrale, s'échauffer et dégrader la qualité des faisceaux laser, réduisant considérablement l'efficacité de combinaison. Le risque de dommage irréversible sur ce dernier miroir est aussi très élevé, compte tenu de la présence d'une cavité laser et des fortes concentrations de flux lumineux souvent nécessaires à l'intérieur des cavités laser pour optimiser l'amplification laser.

3.1.2 Combinaison par juxtaposition de lasers

La géométrie en champ proche où les faisceaux laser sont juxtaposés (figure 8b) peut être utilisée en combinaison cohérente passive. Elle s'avère **plus avantageuse et moins limitée**, car l'augmentation de la puissance laser s'accompagne d'une augmentation de surface totale d'émission laser, et la densité de puissance n'atteint que très rarement des seuils critiques dans cette géométrie. Elle a donc été mise en œuvre également (figure 11) et permet de réaliser la combinaison cohérente passive sans contrainte de seuil de dommage de l'optique de couplage, comme l'ont montré les équipes d'XLIM

en France [19] et d'AcuLight et Northrop Grumman aux États-Unis [20].

Dans cette configuration, la réinjection dans les amplificateurs laser d'une fraction du signal d'interférence en sortie des N sources laser ferme les cavités qui sont ici très longues et entièrement fibrées. La réinjection du signal passe par une fibre (en vert), une ré-amplification laser et un isolateur optique.

Un record de 710 W par combinaison de 4 lasers à fibres a pu être atteint avec cette technique par cette seconde équipe [20].

Néanmoins, la limite en nombre de sources combinables ($N < 20$), si on ne veut pas induire de trop fortes instabilités de puissance combinée, s'applique aussi dans cette configuration de faisceaux laser juxtaposés avec réinjection couplant plusieurs cavités laser.

Une configuration proposée récemment par une équipe d'XLIM (France) permet toutefois de repousser cette limite [21] [22] : elle consiste à ajouter un degré de liberté au problème du choix du mode de cavité commun aux N cavités laser, en insérant dans la boucle de **réinjection un masque de contraste de phase** qui transpose les variations de phase des lasers et les réinjecte dans chaque amplificateur sous forme de variations d'intensité lumineuse.

Ce nouveau format de réinjection permet d'impacter, non seulement la fréquence du mode de cavité réinjecté préférentiellement, mais aussi le niveau de puissance réinjecté dans chaque amplificateur laser, selon la relation de phase entre les différents faisceaux laser. Ce degré de liberté supplémentaire introduit de nouvelles solutions au problème d'auto-organisation des sources laser combinées. Cela permet de combiner un plus grand nombre d'amplificateurs laser sans induire pour autant d'instabilités de puissance rédhibitoires. L'efficacité de combinaison est aussi fortement améliorée, puisqu'elle reste supérieure à 80 %, même si on cherche à combiner 20 sources laser par cette technique [22].

On peut estimer que la mise en œuvre de cette configuration nouvelle permettra de combiner jusqu'à une cinquantaine de lasers par combinaison cohérente passive. Elle reste cependant beaucoup plus complexe à mettre en œuvre que la configuration classique.

On peut retenir que la combinaison cohérente passive est une technique simple à mettre en œuvre et bien adaptée pour un faible nombre de laser combinés, jusqu'à une dizaine de lasers maximum. La mise en œuvre de configurations plus complexes peut permettre d'étendre cette technique à la combinaison de quelques dizaines de lasers.

3.2 Combinaison cohérente par contrôle actif de la phase

Une seconde technique, pour forcer la mise en phase des sources laser en combinaison cohérente, consiste à utiliser des composants optiques permettant de moduler et donc de modifier la phase des lasers en temps réel. On construit alors une boucle de rétroaction pour piloter ces modulateurs de phase, contrôler chacune des phases en temps réel et maintenir en permanence les lasers en phase.

La **combinaison cohérente par contrôle actif de la phase** consiste donc à combiner par interférences optiques plusieurs lasers, tout en contrôlant en temps réel leurs phases, afin de maintenir en permanence des interférences constructives et de maximiser la densité de puissance contenue dans le lobe central d'interférence ou dans une zone fixe du champ lointain.

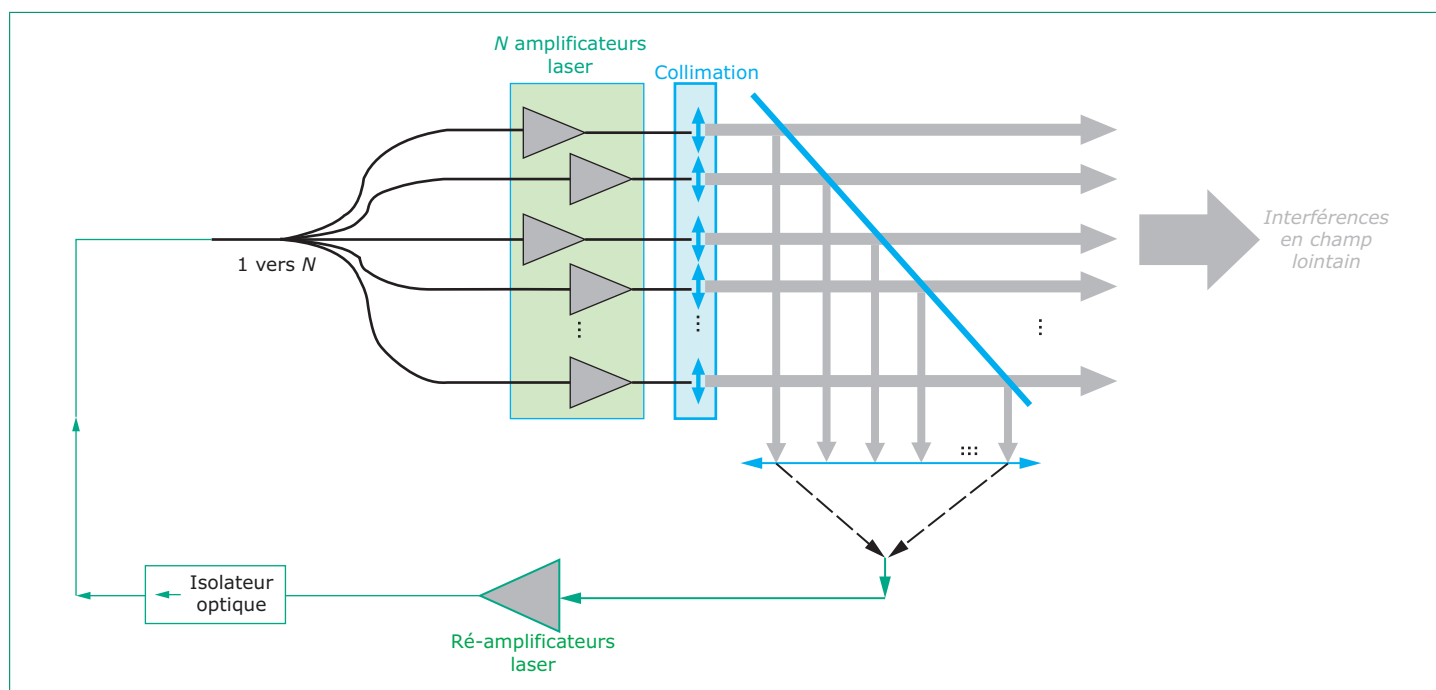


Figure 11 – Combinaison cohérente passive de lasers à fibres en configuration faisceaux laser juxtaposés

Le principe de cette technique est présenté figure 12 ; les imagettes illustrent la coupe transverse du champ proche et du champ lointain dans le cas de la combinaison de 4 faisceaux laser placés en carré.

Un laser d'injection faible puissance est amplifié séparément par N étages amplificateurs de puissance. L'analyse du signal d'interférence entre les N faisceaux laser amplifiés permet de recueillir une information sur la phase de chaque voie. On peut alors piloter en temps réel les N phases, voie par voie, grâce à des modulateurs de phase, afin de rendre égales en permanence les phases de toutes les voies. Du fait que les N voies sont mises en phase, le signal d'interférence en champ lointain reste stable en position et présente un maximum d'intensité lumineuse en son centre.

La géométrie en champ proche où les pupilles laser sont juxtaposées (figure 8) est le plus souvent adoptée pour la combinaison cohérente par contrôle actif de la phase. Certaines démonstrations à faible puissance peuvent privilégier la superposition des faisceaux en champ proche (figure 8a), mais il est très difficile d'aller au-delà de 4 sources combinées dans cette géométrie, sans voir l'efficacité de combinaison chuter de par les pertes induites par les composants optiques utilisés pour superposer les faisceaux laser. De plus, la conception et la réalisation des lames séparatrices utiles dans ce cas sont d'autant plus complexes que l'on augmente le nombre de sources combinées : l'optimisation du contraste de la figure d'interférence résultant de la superposition des faisceaux laser impose d'équilibrer les niveaux de puissance entre les différents lasers combinés, et d'utiliser comme première lame une lame 50/50 (transmission/réflexion), comme lame suivante une lame 33/66, puis une lame 25/75, 20/80 etc. Précisons également que même en superposition, pour additionner efficacement les puissances, il faut contrôler activement les phases des lasers, afin de les égaliser pour maximiser la puissance concentrée dans le lobe principal de la figure d'interférence obtenue en final. Sinon,

si les phases fluctuent librement, chaque lame répartira en moyenne le même flux lumineux sur chacun des 2 bras sortants.

Les réalisations optimales en matière de combinaison cohérente par contrôle actif de la phase sont donc toutes obtenues en configuration de faisceaux laser juxtaposés en champ proche (figure 12).

N chaînes amplificatrices laser sont donc mises en parallèle pour générer de fortes puissances laser, en amplifiant le rayonnement faible puissance émis par un oscillateur maître (ou injecteur) qui sert de référence commune de phase. Ces sources laser sont ensuite combinées en superposant en champ lointain, après divergence, les N faisceaux laser. Ces rayonnements laser très cohérents vont interférer en se superposant. Si ces interférences sont constructives, une part importante de la puissance laser des N amplificateurs additionnés sera concentrée dans le lobe central de la figure d'interférence, générant une très forte densité de puissance dans ce lobe central. Bien évidemment, la complexité de cette méthode est forte, car il faut disposer d'un moyen de mesurer les différences de phase entre amplificateurs laser et de les compenser en temps réel.

3.2.1 Méthodes de commande en temps réel de la phase

Deux types d'actuateurs de phase sont principalement mis en œuvre pour ces techniques :

- des **modules de translation piézoélectriques**, qui permettent de modifier la longueur du chemin optique (c'est-à-dire la distance de propagation) des faisceaux laser avec une résolution fine, induisant un déphasage de l'onde proportionnel à l'allongement de son chemin optique ;

- des **modulateurs de phase utilisant l'effet électro-optique** dans un matériau non linéaire structuré en guide d'onde, l'effet électro-optique permet, en appliquant une ten-

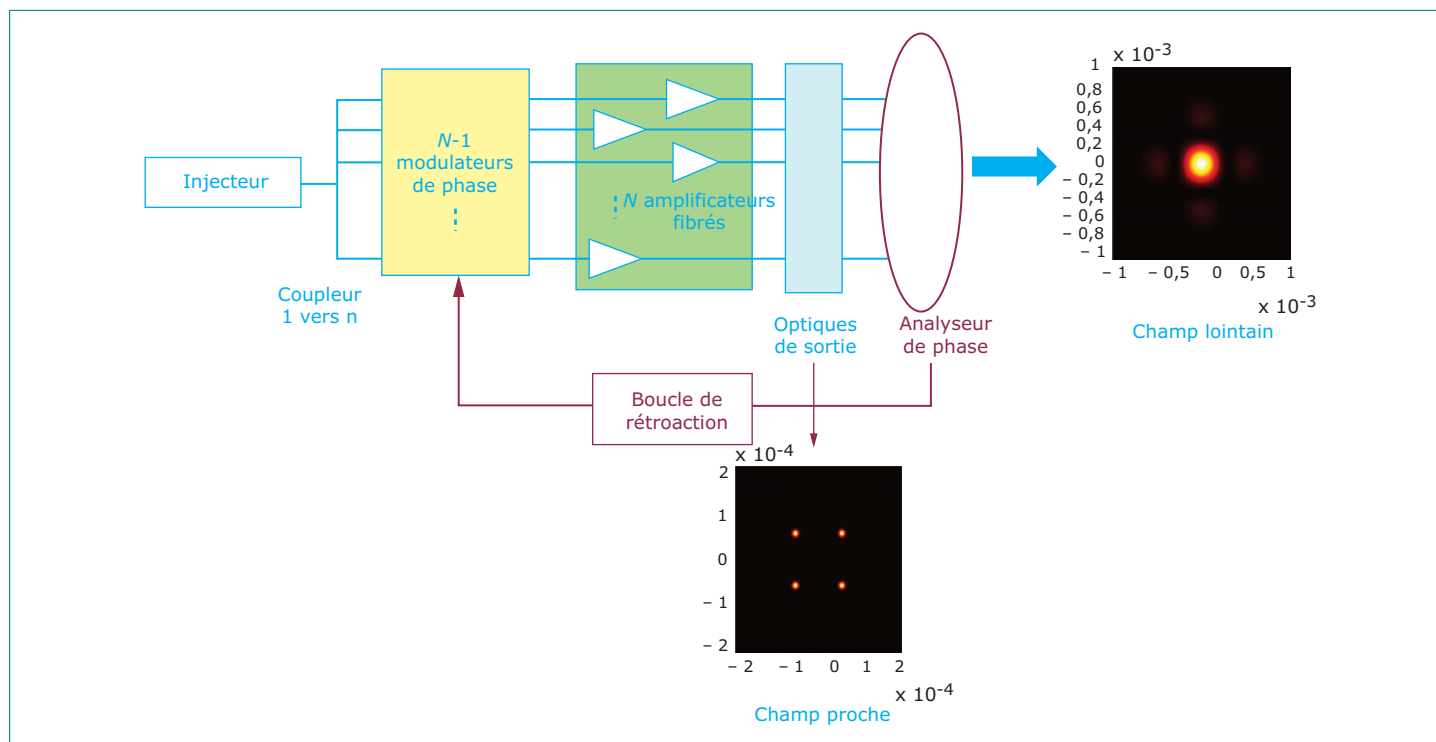


Figure 12 – Schéma de principe de la combinaison cohérente par contrôle actif de la phase avec une géométrie en champ proche de pupilles laser juxtaposées

sion électrique sur le guide d'onde, d'induire sur l'onde qui le traverse un déphasage proportionnel à cette tension et à la longueur du guide.

■ Les **modules piézoélectriques de translation** peuvent être utilisés de deux façons. Tout d'abord, ils permettent d'agir sur une fibre optique en étirement et de modifier ainsi très légèrement sa longueur, induisant une différence de chemin optique et donc un déphasage proportionnel à l'allongement de la fibre. Cette approche ne fonctionne bien que pour les architectures laser à fibres, fournissant divers composants sur lesquels appliquer cet étirement sans compromettre la durée de vie des amplificateurs laser (l'étirement d'une fibre amplificatrice laser a un impact sensible sur sa durée de vie).

Une solution alternative est d'utiliser les modules de translation piézoélectriques pour déplacer un composant optique, par exemple un miroir de renvoi, **afin d'allonger ou de raccourcir la distance effectivement parcourue par le faisceau laser**, induisant ainsi un déphasage sur ce faisceau. Les ordres de grandeur des déplacements à induire sont très faibles, car dans l'air un déplacement égal à la longueur d'onde du laser correspond à un déphasage induit de 2π déjà très grand.

Les modules piézoélectriques souffrent d'un effet d'hystérésis qui rend délicate leur utilisation, puisque le déplacement induit par une tension donnée appliquée sur la céramique piézoélectrique est différent en allongement et en contraction.

Enfin, les fréquences de coupure des matériaux piézoélectriques sont basses, quelques dizaines de kilohertz seulement, ce qui limite la dynamique temporelle de ces composants. Ces derniers permettent donc le contrôle actif de la phase, tant que les fluctuations de phase à compenser sont lentes (< 1 kHz), mais rendent difficile leur utilisation à plus grande vitesse.

■ Les **modulateurs de phase électro-optiques**, quant à eux, sont des composants qui peuvent être complètement intégrés dans un boîtier fibré. Ils offrent donc une forte compacité et une intégrabilité aisée, ainsi qu'une grande robustesse pour un système laser à fibre.

Ces composants, développés au départ pour les télécommunications par fibre optique, ont vu leur bande passante optimisée et ils offrent l'avantage de pouvoir être très rapides. Leur bande passante maximale est de 40 GHz. De tels modulateurs se pilotent avec des tensions pouvant monter jusqu'à 12 V. Cependant, si le besoin en bande passante est moindre, il est possible de réaliser des modulateurs avec une bande passante plus faible, mais néanmoins déjà conséquente, 150 à 200 MHz, pour des tensions maximales de fonctionnement de 3 à 5 V.

Une limitation de ces modulateurs, du fait de leur structure guide d'onde, est leur tenue au flux laser limitée. Ils ne supportent pas des puissances lumineuses bien supérieures au watt, d'où leur positionnement en amont des étages d'amplification laser de puissance (figure 12), ce qui permet de rester compatible avec cette limite en tenue au flux laser.

■ Mentionnons enfin une dernière méthode de pilotage de la phase en temps réel : il est possible de moduler le gain laser **en modulant la puissance de pompe du laser**. Le déphasage dans ce cas provient à la fois de la modulation du gain laser lui-même, mais aussi de la modification du chemin optique dans le milieu laser induite par la légère différence de température du milieu résultant de la variation de la puissance de pompe absorbée dans le milieu.

Notons que le déphasage induit par variation du gain laser, provient de la relation de Kramers-Krönig entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'indice de réfraction du milieu laser.

Dans un milieu laser actif, la partie réelle de l'indice de réfraction impacte le chemin optique des ondes et donc leur phase, et la partie imaginaire de l'indice correspond aux pertes et au gain dans le milieu laser : il y a donc un lien direct entre gain laser et déphasage induit lors de l'amplification laser.

Les calculs et les tests expérimentaux montrent cependant que cette méthode n'offre pas une sensibilité suffisante en différence de phase induite pour le besoin de la mise en phase (on a besoin d'une sensibilité de l'ordre de $\pi/15$).

3.2.2 Méthodes de mesure des relations de phase entre les lasers

Il existe trois méthodes pour analyser en temps réel les relations de phase entre les lasers que l'on cherche à combiner, afin de parvenir à réaliser le contrôle de phase :

- l'analyse collective de la phase ;
- l'optimisation de la densité de puissance en champ lointain par méthode itérative ;
- le marquage en fréquence.

3.2.2.1 Méthodes collectives de mesure de phase

Les méthodes d'analyse collective de la phase ont été étudiées de façon approfondie par le MIT aux États-Unis [23] et par TRT en France [24].

Cette technique est basée sur l'analyse de la matrice de figures d'interférence des N pupilles laser avec une onde plane de référence issue de l'oscillateur maître (figure 13).

L'analyse de phase se fait sur la figure d'interférence obtenue en **prélevant**, en champ très proche, alors qu'ils sont encore séparés spatialement, **une petite fraction de puissance de la matrice de faisceaux laser** combinés. On mélange cette fraction de puissance prélevée sur la matrice de pupilles laser juxtaposées en champ proche avec une onde plane de référence issue de l'oscillateur maître. On visualise cette matrice de pupilles laser avec une caméra rapide permettant de mesurer la position des franges d'interférences dans chaque pupille laser (à titre d'exemple, en bas de la figure 13, le format d'image obtenu sur la caméra dans le cas de 3×3 pupilles laser). Cette mesure de position et de déplacement des franges d'interférences dans chaque pupille laser permet de calculer la **différence de phase de chaque laser avec l'oscillateur maître**.

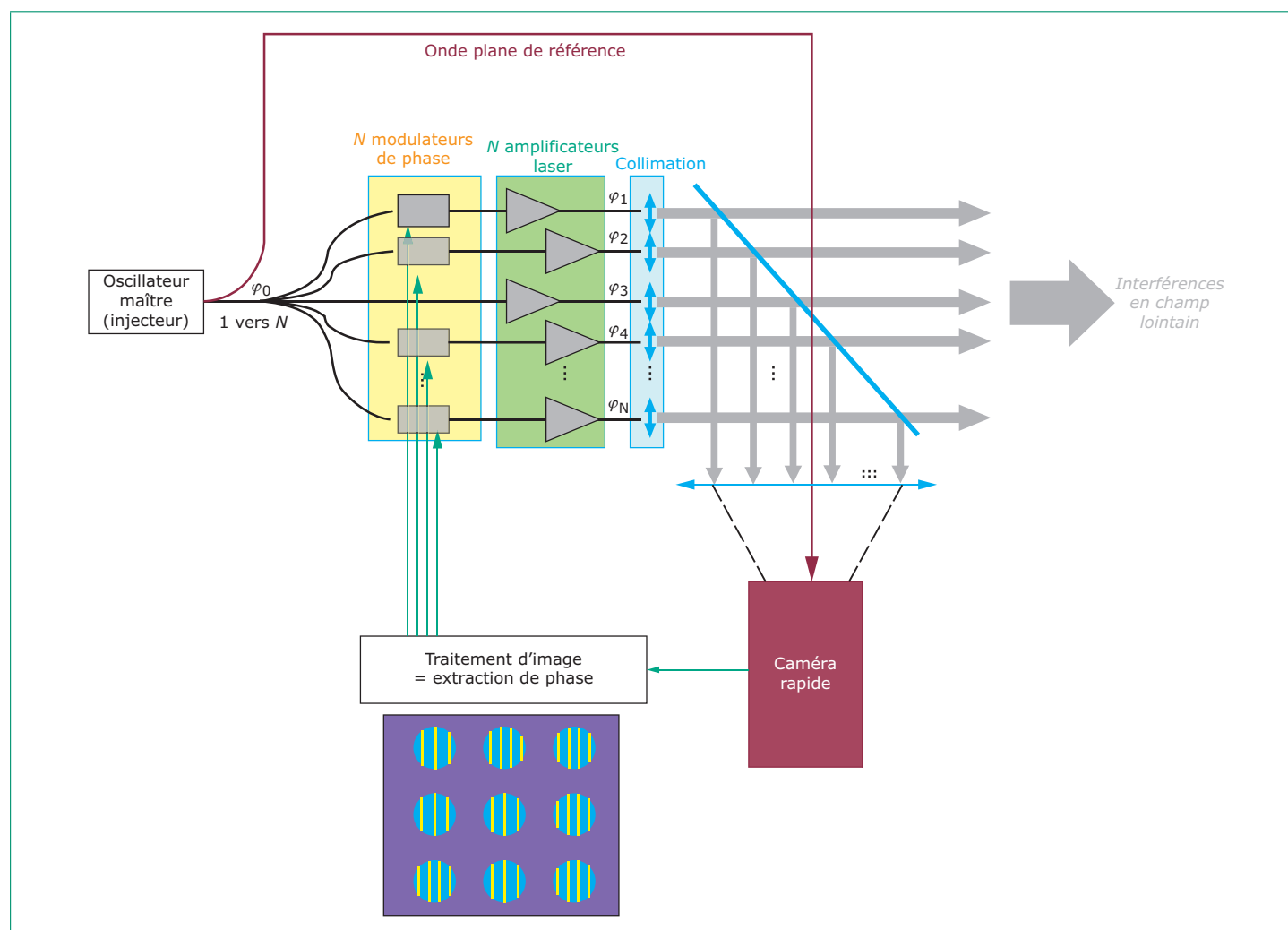


Figure 13 – Combinaison cohérente par contrôle actif de la phase avec analyse de phase par une méthode collective

Comme la matrice de figures d'interférences est obtenue en champ très proche, il y a deux limites principales à cette méthode d'analyse de la phase. D'une part, elle ne fonctionne bien que si les **faisceaux sont peu divergents**, car la mesure de position des franges d'interférences ne peut se faire que si les faisceaux sont encore séparés spatialement. Il faut donc générer les figures d'interférence suffisamment près de la sortie des sources laser, là où les faisceaux laser n'ont pas encore eu le temps de beaucoup diverger. Elle ne fonctionne pas pour des faisceaux complètement superposés ou des faisceaux très divergents commençant à se chevaucher très tôt dans leur propagation. D'autre part, la mesure de la phase nécessite de **visualiser sur une caméra l'intégralité de la matrice de pupilles laser**, avec une résolution suffisamment fine des franges d'interférences contenues dans chaque pupille pour observer leurs déplacements. Cette mesure nécessite donc une caméra avec une résolution et un nombre de pixels élevés, ce qui conduit inévitablement à un temps de lecture long des nombreux pixels de la caméra pour obtenir une image. À ce temps de lecture long des franges d'interférence, s'ajoute le temps de traitement nécessaire pour interpréter numériquement l'image et obtenir la mesure de phase. Le taux de rafraîchissement des phases, pour cette technique de combinaison par analyse collective, est donc forcément limité par ce délai incompressible d'analyse et de traitement de l'image de la matrice de franges d'interférence.

Faire fonctionner cette méthode à grande vitesse nécessite un investissement conséquent en matière de caméra d'analyse, et, selon la vitesse d'analyse escomptée, il n'est même pas toujours certain de pouvoir trouver une caméra adaptée au besoin.

3.2.2.2 Optimisation itérative de la relation de phase

La technique d'optimisation itérative de la densité de puissance en champ lointain utilise pour le pilotage des phases laser le même type d'algorithme que l'optique adaptative emploie pour contrôler les miroirs déformables. L'un des plus fréquents est l'**algorithme SPGD** (*Stochastic Parallel Gradient Descent*).

Ce type d'algorithme recherche, par itérations successives, le jeu de N déphasages laser qui permet d'optimiser l'efficacité de combinaison. Le critère d'optimisation de l'efficacité est la puissance au centre du lobe central d'interférence en champ lointain [25], mesurée par le niveau du signal laser rétro-diffusé par la cible. Quand ce signal rétro-diffusé est maximal, la densité de puissance sur cible est supposée maximale et l'efficacité de combinaison optimale.

La technique consiste donc à mesurer le signal laser rétro-diffusé par la cible lointaine avec un photo-détecteur, et à maximiser ce signal en testant itérativement tous les jeux possibles des N phases laser, jusqu'à trouver le jeu de phases optimal (figure 14).

Malgré la présence du terme « parallèle » dans le nom de l'algorithme SPGD, cet algorithme, comme tous les algorithmes

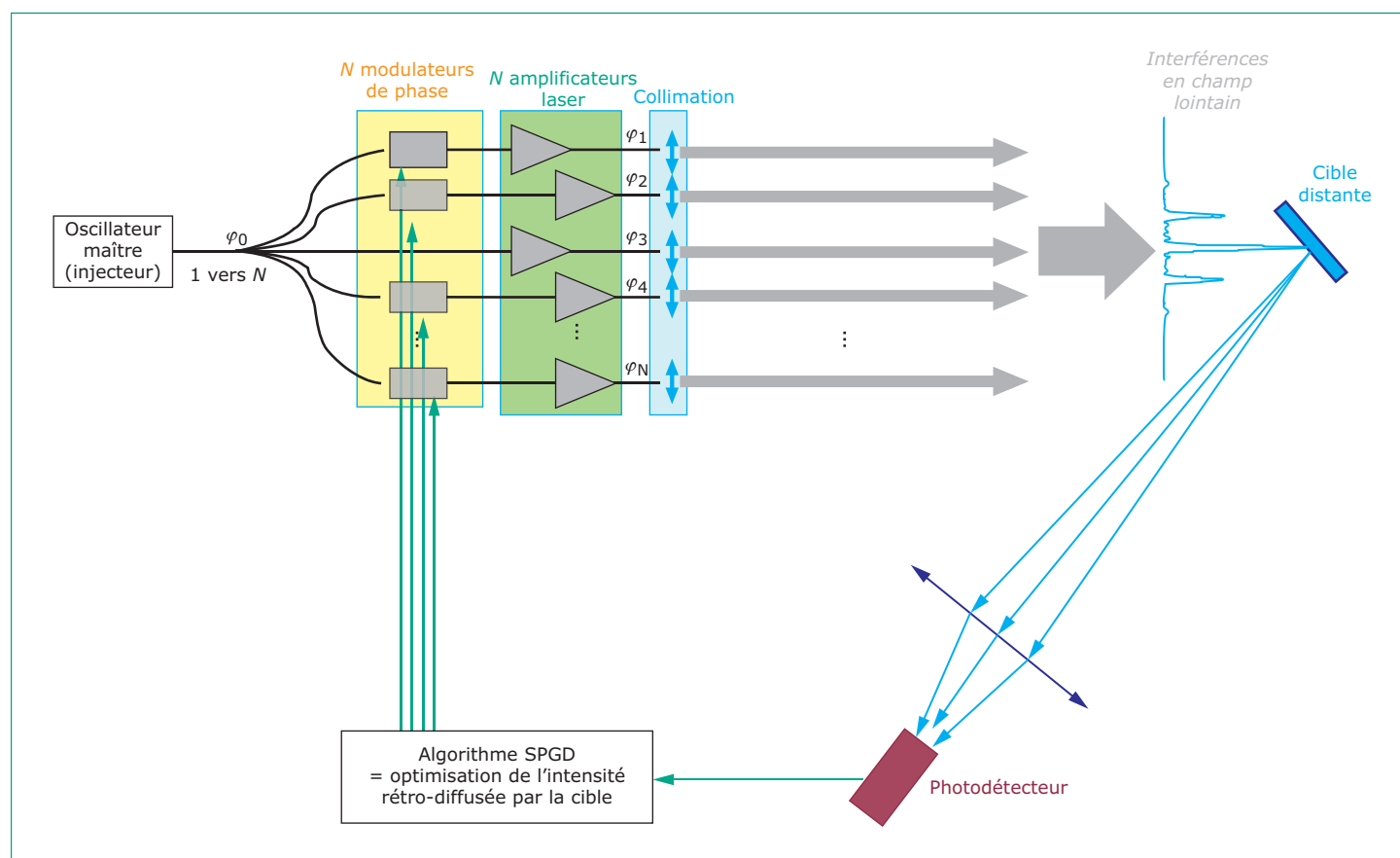


Figure 14 – Combinaison cohérente par contrôle actif de la phase avec analyse de phase par optimisation itérative de la densité de puissance en champ lointain

itératifs, est séquentiel dans son mode de test des jeux de N phases. Le terme « parallèle » est utilisé dans la dénomination de l'algorithme, car on n'optimise pas la phase voie par voie, mais l'ensemble des voies en simultanée (figure 14). Il faut donc suffisamment d'itérations de jeux de phases différents pour trouver le jeu de phases optimal. De ce fait, cette technique séquentielle est limitée en vitesse de rafraîchissement des phases, par le nombre minimal d'itérations nécessaire à chaque passe pour optimiser le jeu des N phases laser.

Mentionnons aussi que le contrôle de l'efficacité de combinaison par le critère de densité de puissance maximisée dans le lobe central d'interférence en champ lointain est beaucoup moins précis qu'une optimisation directe par mesure de phase (comme dans le cas d'une analyse collective de la phase), car il offre une sensibilité et une précision moindres en différence de phase. Ce critère est également incapable de distinguer si une fluctuation d'intensité du lobe central d'interférence est provoquée par une fluctuation d'intensité ou par une variation de phase d'un des lasers.

3.2.2.3 Marquage en fréquence de la phase

La combinaison cohérente par contrôle actif de la phase peut également être réalisée en utilisant la méthode du marquage en fréquence. Elle consiste à profiter de la présence d'un actuateur de phase sur chacune des voies laser pour ajouter sur chaque voie une **modulation de phase à une fréquence spécifique**. Ce marquage en fréquence permet ensuite de retrouver l'information de phase spécifique à la voie i par démodulation du signal d'interférence entre les N voies à la fréquence de marquage ν_i spécifique à cette voie (figure 15) [26]. Le marquage en fréquence permet d'extraire l'information de phase spécifique à une des voies du signal d'interférence qui mélange toutes ces informations.

Chaque voie optique est marquée par une modulation de phase sinusoidale à une fréquence spécifique, à l'exception d'une d'entre elles, la voie de référence qui n'est pas contrôlée en phase et fluctue librement. Chaque voie est équipée d'une électronique individuelle comprenant une détection synchrone chargée de démoduler le signal d'interférence entre les N voies pour extraire un signal d'erreur et une boucle d'asservissement de la phase qui maintient le signal d'erreur nul. L'ensemble des signaux d'erreur des différentes voies ne s'annule que si toutes les phases sont maintenues égales à la phase de la voie de référence par l'ensemble des $N - 1$ électroniques d'asservissement.

En effet, le signal d'erreur extrait sur chaque voie (à l'exception de la voie de référence non modulée) est une combinaison linéaire des sinus des différences de phase des voies prises 2 à 2. Sur chaque voie, un asservissement PID est programmé pour amener ce signal d'erreur à zéro. La seule façon pour que l'ensemble de ces $N - 1$ signaux d'erreur soient nuls, c'est que toutes les phases des voies laser soient égales (et donc suivent en temps réel les fluctuations de phase de la voie de référence).

L'ensemble des électroniques d'asservissement contribuent donc en synergie à maintenir les N lasers en phase, mais chacune d'entre elles travaille indépendamment, en parallèle des autres.

La combinaison par marquage en fréquence possède l'avantage de fonctionner, même si les faisceaux laser divergent fortement et se recouvrent très vite ou s'ils sont complètement superposés. De plus, il s'agit d'une architecture complètement parallélisée, où les $N - 1$ cartes électroniques traitent en parallèle un même signal (le signal d'interférence complexe en champ lointain), mais en extraient chacune l'information pertinente pour commander la phase d'une seule voie laser. Comme dans le domaine logiciel, ce traitement parallèle de l'information

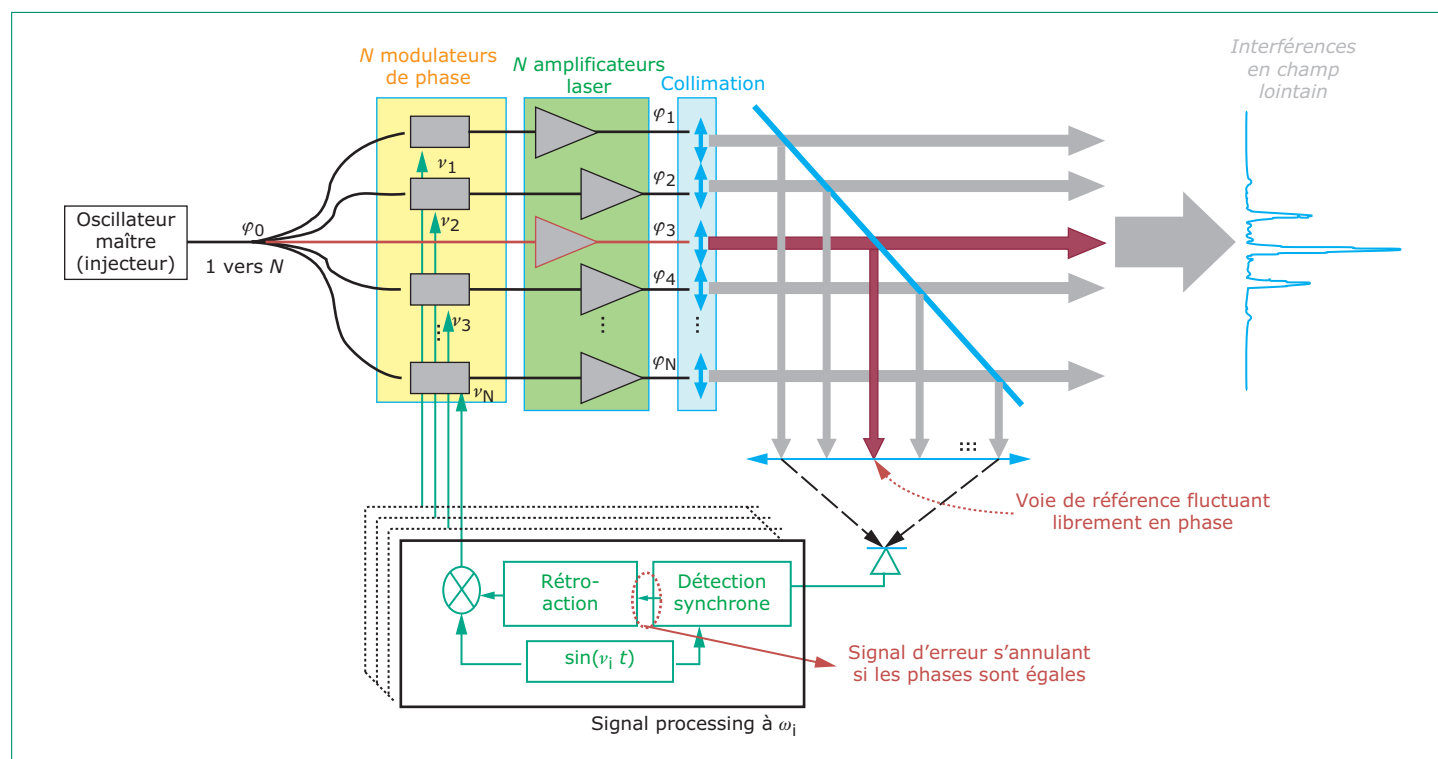


Figure 15 – Combinaison cohérente par contrôle actif de la phase avec analyse de phase par marquage en fréquence

permet d'accéder aux vitesses de contrôle de la phase les plus élevées, puisque l'électronique d'asservissement de chaque voie fonctionne indépendamment des autres et n'a pas à synchroniser ses commandes de phase avec les autres voies. La synergie entre les voies provient de l'exploitation d'un signal d'interférence commun par chacune des électroniques d'asservissement des différentes voies laser.

Un autre avantage est le transfert d'une partie de la complexité de cette architecture de sa partie optique vers sa partie électronique. Mais, comme les vitesses concernées, même au plus rapide, restent de l'électronique basse fréquence (< 10 GHz et le plus souvent < 100 MHz), les composants électroniques utilisés sont extrêmement simples et peu onéreux. Le coût d'une telle architecture a donc de grandes chances d'être beaucoup plus bas que celui d'une architecture à base d'analyse collective de la phase, car le prix de la caméra rapide nécessaire à l'analyse de la phase grèvera le budget, à grand nombre de sources combinées.

3.2.2.4 Limite de performance de la combinaison cohérente

Une limite de la combinaison cohérente s'avère incontournable, quelle que soit la méthode d'analyse de phase retenue. Cette limite est liée à la géométrie en champ proche qui, compte tenu des faisceaux laser circulaires, ne peut offrir un taux de remplissage en champ proche supérieur à 60 %. Comme la fraction de puissance concentrée dans le lobe central d'interférence en champ lointain est dimensionnée par ce taux de remplissage champ proche, on ne peut espérer mieux que 80 % de puissance concentrée (et même 63 % seulement, quand on utilise des faisceaux laser à profil spatial gaussien), ce qui n'est pas une très bonne efficacité de combinaison. Mais de ce fait, il ne s'agit pas d'une limite spécifique au marquage en fréquence, mais d'une limite commune à toutes les techniques d'analyse de phase, car elle provient de la géométrie champ proche où les pupilles laser sont juxtaposées.

3.2.3 Efficacité de combinaison

Comme indiqué en introduction au paragraphe 3, l'efficacité de combinaison est loin d'avoir une unique définition dans ce contexte où est générée une figure d'interférence en champ lointain.

Différents critères d'efficacité sont utilisés pour traduire le gain en densité de puissance obtenu par combinaison. Tout d'abord, le critère le plus classique est le rapport de Strehl, qui traduit l'intensité lumineuse au centre de la figure d'interférence en champ lointain. Cependant, on trouve aussi d'autres critères d'efficacité dans la littérature : **le taux de combinaison** (fraction de puissance dans le lobe central de la figure d'interférence) et **le MEP** (*Mask Encircled Power*), inspiré du BPF (*Beam Propagation Factor*), critère proposé par la DARPA et rendant compte de la fraction de puissance contenue dans un disque de diamètre fixé au niveau de la figure d'interférence en champ lointain [27]. Le choix du critère d'efficacité approprié dépend vraiment de l'application visée pour la source laser combinée.

Il existe toutefois un critère de performance de la combinaison cohérente, qui permet de comparer les résultats obtenus dans n'importe quelle configuration. Il s'agit de la mesure de **différence de phase résiduelle** après combinaison cohérente, qui est l'erreur quadratique moyenne de la différence de phase entre une voie contrôlée en phase et la voie de référence, exprimée en chemin optique équivalent sous la forme λ/M (λ est la longueur d'onde laser et M un nombre).

Quand la mise en phase est active, cette différence de phase résiduelle tend vers zéro et présente des valeurs très faibles, mais néanmoins représentatives de l'efficacité de combinaison.

Quand on parcourt les travaux des différentes équipes ayant testé expérimentalement la combinaison cohérente par contrôle actif de la phase, on retrouve une valeur typique de différence de phase résiduelle correspondant à une combinaison de très bonne efficacité qui est $\lambda/30$. On considère en général que la combinaison fonctionne bien quand M dépasse 15, une différence de phase résiduelle de $\lambda/15$ ou $\lambda/20$ correspondant à une bonne efficacité de combinaison, sans plus. Enfin, quand M descend en dessous de 15, on considère en général que la combinaison cohérente ne fonctionne plus correctement, car le rapport de Strehl est alors diminué de plus de 10 % par rapport au rapport de Strehl maximal obtenu grâce à la combinaison.

3.2.4 Performances obtenues

La combinaison cohérente par contrôle actif de la phase a permis d'obtenir d'excellents résultats, que ce soit en matière de nombre de sources laser combinées ou de puissance totale.

Pour la combinaison cohérente active par analyse collective de la phase, le record en nombre de lasers combinés, détenu par TRT [24], est de 64 sources fibrées.

Avec la méthode d'optimisation itérative de la densité de puissance en champ lointain, le MIT détient le record « toutes catégories » avec 210 diodes laser combinées [25]. Le point commun de ces 2 records en nombre de sources combinées est la faible puissance des sources laser, puisque le record de TRT a été obtenu pour des sources laser fibrées faible puissance (< 63 mW par laser), et le record du MIT pour des diodes laser de puissance individuelle inférieure à 200 mW.

Un autre record, cette fois-ci en puissance, détenu toujours par le MIT avec cette même technique de combinaison par optimisation itérative, est de 4 kW obtenus en combinant 8 sources laser fibrées du commerce [28]. L'efficacité de combinaison exprimée comme la fraction de puissance dans le lobe central d'interférence est de 58 %, proche du maximum théorique pour des faisceaux circulaires, et le M^2 estimé du faisceau résultant est de 1,25.

Enfin, pour la combinaison cohérente active par marquage en fréquence (baptisée LOCSET aux États-Unis), l'équipe de l'AFRL Albuquerque détient les records de puissance combinée, avec 5 amplificateurs fibrés de 145 W pour une puissance totale combinée de 725 W en 2008 [29], et 16 amplificateurs pour un total de 1,4 kW en 2011 [30].

En pratique, battre un record de puissance représente un coût financier élevé en matière de matériel nécessaire. Il en est de même des records en nombre de sources combinées. Cela explique que personne n'a pour l'instant eu le budget nécessaire pour battre simultanément le record en puissance totale et en nombre de sources laser combinées.

3.2.5 Nombre de lasers combinables

3.2.5.1 Dynamique de contrôle actif de la phase

Toutes ces techniques de combinaison par contrôle actif de la phase nécessitent une électronique rapide pour rafraîchir suffisamment régulièrement les phases des voies optiques combinées. Mais quelle doit être la vitesse de ce contrôle actif ?

Cette vitesse dépend de la nature des fluctuations de phase à compenser lors de la mise en phase. La plupart de ces fluctuations sont d'origine thermique et évoluent lentement, avec des dynamiques temporelles inférieures à 500 Hz.

Des fluctuations de phase peuvent être induites par les vibrations acoustiques jusqu'à une dynamique temporelle de 20 kHz

environ, mais la mesure des fluctuations de phase d'origine acoustiques montrent qu'elles sont principalement localisées sous les 10 kHz.

Un contrôle de phase en temps réel n'aura donc que très rarement besoin de compenser des fluctuations de phase plus rapides que 10 kHz. Dans la majeure partie des cas, compte tenu que la stabilité en puissance d'un laser dépend aussi de l'isolation vibratoire de ses optiques, les vibrations d'origine acoustique seront fortement amorties par l'opto-mécanique du laser, et seules les fluctuations thermiques resteront à compenser [31]. Cela signifie que, dans la plupart des cas, une bande passante de 100 à 500 Hz sera suffisante pour compenser la majeure partie des fluctuations de phase des lasers et mettre en phase les sources efficacement.

3.2.5.2 Comparaison des différentes approches de mesure de phase

L'évaluation du nombre maximal de sources laser combinables par contrôle actif de la phase est un peu plus complexe que pour les techniques présentées auparavant.

Nous limitons toutefois ici cette analyse à l'utilisation du marquage en fréquence, car c'est cette solution technologique qui offre le plus fort potentiel en nombre de sources combinables. En effet, la technique d'optimisation itérative de la densité de puissance en champ lointain par algorithme SPGD a besoin d'une fréquence de modulation proportionnellement croissante avec N . Compte tenu que les électroniques utilisées, ainsi que les modulateurs de phase, ne peuvent pas fonctionner au-delà de 10 GHz, la technique SPGD est fondamentalement plus limitée en nombre de sources combinables que la technique de marquage en fréquence. Quant à la technique de mesure collective de la phase, elle est intrinsèquement limitée par le délai d'analyse et de traitement de l'image de la matrice de franges d'interférence, délai qui croît avec N . Le marquage en fréquence offre une architecture électronique parallélisée qui permet *a priori* l'asservissement de phase le plus rapide parmi les 3 méthodes d'analyse de phase.

3.2.5.3 Espacement minimum des fréquences de marquage

L'évaluation du nombre maximal de sources laser combinables par marquage en fréquence repose sur l'espacement minimum requis des fréquences de marquage, pour parvenir à une démodulation appropriée du signal d'interférence optique.

La technique de marquage en fréquence utilise sur chaque voie des électroniques indépendantes fonctionnant en parallèle, ce qui lui confère une robustesse inégalée. Le bruit électronique n'augmente pas avec le nombre de voies et des fréquences voisines peuvent être utilisées pour marquer par modulation chacune des voies [27]. La seule limite est de pouvoir trouver suffisamment de fréquences de marquage différentes, compte tenu de quelques règles devant être respectées entre ces différentes fréquences pour que la démodulation fonctionne correctement.

On note v_i la fréquence de marquage de la i^{e} voie laser. Le signal d'interférence complexe obtenu en champ lointain, une fois les N faisceaux laser superposés, est démodulé par une détection synchrone qui consiste, pour la i^{e} voie, en un multiplieur par une modulation sinusoïdale à la fréquence v_i suivi d'un filtre passe-bas et d'un amplificateur de signal électronique.

Les paramètres de modulation et de filtrage passe-bas doivent respecter certaines relations pour que les termes issus des différentes modulations ne se brouillent pas entre eux, et que le courant en sortie de détection synchrone soit bien un

signal d'erreur utilisable, c'est-à-dire un signal qui garantit l'égalité des phases des différentes voies laser si on le ramène à zéro.

Les notations utilisées sont v_{fluct} pour la fréquence maximale des fluctuations de phase que l'on souhaite corriger et v_{pb} pour la fréquence de coupure du filtre passe-bas de la détection synchrone de la voie i (cette fréquence doit être supérieure à v_{fluct} pour ne pas filtrer des variations de phase à des fréquences que l'on souhaite corriger). De la même façon, l'intervalle successif Δv entre chaque fréquence de modulation v_i doit être supérieur à v_{pb} pour éviter de mélanger l'information issue de 2 voies distinctes. Enfin, la plus basse fréquence de modulation v_1 doit être supérieure à $N - 1$ fois l'intervalle de fréquence Δv pour éviter le recouvrement de l'information utile avec les termes d'inter-modulation. De même, la deuxième raie de Bessel de la modulation de plus basse fréquence, qui se situe à $2 v_1 - v_{\text{fluct}}$, doit être à une fréquence supérieure à la fréquence v_i de la première raie de Bessel des autres modulations. Cette condition est d'ailleurs automatiquement remplie si la condition précédente est vérifiée.

On obtient au final le jeu de contraintes suivant entre les différentes fréquences caractéristiques et les fréquences de modulation des voies laser :

$$v_{i+1} = v_i + \Delta v \quad (1)$$

$$v_{\text{pb}} \gg v_{\text{fluct}} \quad (2)$$

$$\Delta v \gg v_{\text{pb}} \quad (3)$$

$$v_1 - v_{\text{fluct}} \gg (N - 1) \Delta v \quad (4)$$

$$2 v_1 - v_{\text{fluct}} \gg v_1 + (N - 1) \Delta v \quad (5)$$

3.2.5.4 Quantification du nombre maximal de lasers combinables

On considèrera pour le calcul qu'un facteur multiplicatif minimal de 10 correspond aux conditions supérieures des contraintes (2) à (5).

Une possibilité pour la modulation est d'utiliser des électroniques de télévision numérique qui permettent de générer des fréquences de modulation entre 100 et 200 MHz. On choisit donc à titre d'exemple $v_1 = 100$ MHz.

On peut considérer que $v_{\text{fluct}} = 10$ kHz, ce qui permet de compenser par la combinaison cohérente, la majorité des fluctuations de phase d'origine thermique, acoustique et vibratoire. Ainsi, si on se limite à des fréquences de modulation < 10 GHz (pour rester dans la bande passante des modulateurs électro-optiques et éviter le domaine des hyperfréquences), la contrainte (4) (la contrainte (5) est alors automatiquement vérifiée) impose que $N \Delta v + v_{\text{fluct}}$ soit au moins 10 fois plus faible que v_1 (on considère N grand), c'est-à-dire que $N \Delta v$ soit inférieure à 100 MHz, compte tenu que v_{fluct} sera négligeable devant $N \Delta v$.

D'après (2) et (3), on a $\Delta v > 100 v_{\text{fluct}}$, donc $\Delta v > 1$ MHz. En couplant cette condition avec la condition $N \Delta v < 100$ MHz, on obtient $N < 100$.

Bien évidemment, si on diminue un peu la bande de fréquence que l'on souhaite corriger par la combinaison cohérente en réduisant v_{fluct} , ou si on accepte de complexifier un peu l'électronique en augmentant la valeur maximale des fréquences de modulation, on peut accroître cette limite sur N d'un facteur 2 à 5.

À partir de ce calcul, nous pouvons établir une formule approchée donnant le nombre maximal de sources combinables par la technique de marquage en fréquence :

$$N_{\max} = \frac{\nu_1}{1\,000 \nu_{\text{fluct}}}$$

Si on considère que la première fréquence de modulation ν_1 (qui correspond à la gamme de fréquence de modulation choisie, ici < 10 GHz) est un multiple de 100 MHz avec $\nu_1 = 100 b$ MHz, et que la fréquence maximale des fluctuations de phase compensées par la combinaison cohérente s'exprime en kHz sous la forme $\nu_{\text{fluct}} = a$ kHz, N_{\max} vaut :

$$N_{\max} = \frac{100 b}{a}$$

Quelques exemples d'applications numériques :

- pour un module au voisinage de 5 GHz et une compensation des fluctuations de phase jusqu'à 10 kHz, $b = 50$ et $a = 10$, donc $N_{\max} = 500$;
- pour un module au voisinage de 200 MHz et une compensation des fluctuations de phase jusqu'à 1 kHz, $b = 2$ et $a = 1$, donc $N_{\max} = 200$;
- pour un module au voisinage de 500 MHz et une compensation des fluctuations de phase jusqu'à 5 kHz, $b = 5$ et $a = 5$, donc $N_{\max} = 100$;
- pour un module au voisinage de 2 GHz et une compensation des fluctuations de phase jusqu'à 1 kHz, $b = 20$ et $a = 1$, donc $N_{\max} = 2\,000$.

L'ordre de grandeur est donc de quelques centaines à quelques milliers de sources potentiellement combinables par la technique de marquage en fréquence. Notons aussi que des techniques de multiplexage additionnelle peuvent être mises en œuvre afin d'accroître encore ce nombre maximal de sources laser combinées.

Les techniques de combinaison cohérente par contrôle actif de la phase, et en particulier avec marquage en fréquence, sont bien celles qui présentent **le plus fort potentiel en nombre de sources laser combinables**, puisqu'elles sont les seules à offrir la possibilité de combiner jusqu'à plusieurs centaines voire plusieurs milliers de lasers.

4. Techniques alternatives et applications secondaires de la combinaison laser

Nous venons de présenter les principales techniques de combinaison de sources laser, celles qui permettent de monter en puissance les lasers de façon optimale.

Il existe d'autres techniques de combinaison, évaluées et étudiées par le passé, mais moins souvent mises en œuvre que les techniques précédentes.

Les techniques présentées jusqu'ici ont été utilisées essentiellement pour combiner des sources laser émettant en continu. De nombreux lasers émettent des impulsions courtes, dont la durée peut être dans la gamme nanoseconde (1 à 500 ns), picoseconde (1 à 500 ps) ou femtoseconde (10 à 500 fs). La combinaison de lasers impulsionnels représente en général un défi plus important que la combinaison de lasers continus, et nous examinerons aussi ici l'applicabilité des techniques de combinaison à ces sources impulsionnelles.

Enfin, nous montrerons comment certaines techniques de combinaison de lasers peuvent être exploitées pour mettre en

forme le front d'onde d'un laser et compenser, par exemple, les turbulences atmosphériques.

4.1 Techniques alternatives de combinaison de sources laser

Nous avons vu plus haut que certains composants optiques structurés périodiquement en surface ou en profondeur possèdent des propriétés optiques très spécifiques et diffractent la lumière : c'est le cas des **réseaux de diffraction** qui renvoient la lumière dans une direction différente selon sa longueur d'onde et sa direction d'incidence.

4.1.1 Réseau de Dammann

Il existe d'autres structures périodiques que celles décrites au paragraphe 2.3 que l'on peut inscrire par gravure ou par photo-inscription, en surface ou en volume, dans un matériau substrat. Un composant intéressant est le réseau de Dammann qui possède la propriété optique de séparer un faisceau laser en N faisceaux répartis symétriquement en direction (figure 16a). Si on l'utilise en sens inverse, un réseau de Dammann devient un combineur $N \rightarrow 1$ capable de superposer N faisceaux incidents en 1 seul faisceau laser (figure 16b). On peut donc utiliser un tel réseau de Dammann comme combineur optique, sous réserve d'être capable d'envoyer sur ce composant les N faisceaux laser que l'on veut combiner dans les bonnes directions, pour qu'ils soient parfaitement superposés en sortie de ce composant diffractif.

Une des principales limites des composants diffractifs de type réseau de Dammann utilisés comme combineurs optiques est **leur faible acceptation angulaire** : ils s'avèrent extrêmement sensibles aux directions d'incidence des faisceaux laser (une précision angulaire inférieure au microradian peut s'avérer nécessaire) et, de ce fait, l'alignement initial et le maintien dans le temps de cet alignement initial pour un tel combineur restent délicats. Si on n'oriente pas parfaitement les directions d'incidence des faisceaux laser, une partie de la puissance laser sera dissipée latéralement hors du faisceau combiné.

En pratique, l'évaluation de l'efficacité de combinaison d'un composant diffractif de type réseau de Dammann impose la mesure de la fraction de puissance incidente totale retrouvée effectivement dans le faisceau central combiné, en sortie de cette optique diffractive. Une partie de la puissance incidente est en effet dissipée, à la fois par réflexion sur la face d'entrée du composant, et par diffraction hors axe.

Les propriétés théoriques des composants diffractifs $1 \rightarrow N$ sont connues depuis longtemps [32]. Selon la structure périodique employée (1D ou 2D, continue ou binaire), les réseaux de Dammann peuvent permettre d'atteindre une efficacité comprise entre 80 et plus de 95 %. L'efficacité maximale théorique dépend

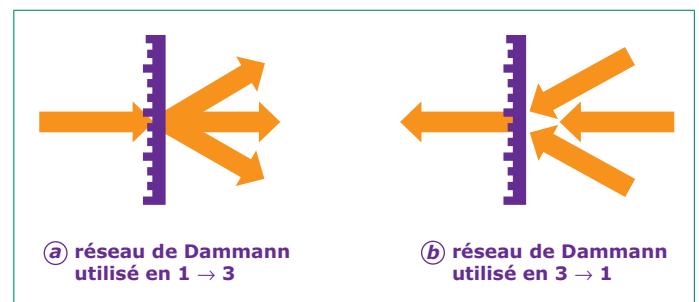


Figure 16 – Propriétés diffractives d'un réseau de Dammann et utilisation comme combineur de faisceaux laser

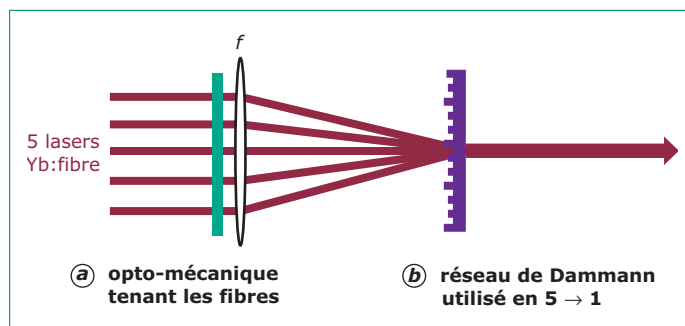


Figure 17 – Combinaison de 5 lasers à fibres forte puissance par réseau de Damman 5 → 1

également du nombre de faisceaux laser combinés, et atteint généralement des valeurs optimales uniquement si on combine au moins 5 faisceaux. Un maximum d'efficacité théorique est atteint pour les réseaux 1D quand on combine entre 5 et 10 faisceaux laser.

Tout comme les réseaux de diffraction multi-couches diélectriques utilisés pour la combinaison spectrale, il est possible de réaliser des réseaux de Damman **complètement transparents** et n'absorbant pas le rayonnement laser. Ces composants peuvent donc être exposés à de très forts niveaux de puissance laser sans subir ni dommages optiques, ni changement sensible de leurs propriétés diffractives par échauffement.

De tels réseaux ont été mis en œuvre, tout d'abord à basse puissance [33], puis plus récemment à forte puissance par les équipes du MIT Lincoln Lab et de Northrop Grumman.

Une puissance combinée de 1 kW a ainsi pu être obtenue en additionnant 5 lasers à fibres dopées ytterbium, avec une efficacité de combinaison de 90 % [34]. Ce critère chute à plus forte puissance, non pas en raison d'une absorption et d'un échauffement du réseau de Damman, mais en raison d'un échauffement de l'opto-mécanique qui maintient les extrémités des 5 fibres de sortie des lasers. L'échauffement de cette opto-mécanique conduit à un déplacement des extrémités des fibres devant la lentille qui les réfracte dans les directions d'incidence appropriées sur le composant diffractif (figure 17). L'échauffement conduit donc à un léger changement de direction d'incidence des faisceaux qui fait chuter à 75 % l'efficacité de combinaison quand la puissance combinée monte à 2 kW [34].

4.1.2 Couplage par ondes évanescentes

Outre les composants diffractifs de type réseau de Damman, il existe d'autres composants optiques permettant d'assurer le couplage entre les faisceaux laser et la combinaison de faisceaux.

Il a été démontré la faisabilité de **coupler par ondes évanescentes** plusieurs faisceaux laser se propageant dans des guides d'onde suffisamment rapprochés les uns des autres (< 10 μm de distance) pour que les ondes évanescentes présentes en bord de guide d'onde transfèrent suffisamment de puissance laser pour assurer le couplage entre les guides.

Ainsi, une fibre optique comprenant plusieurs cœurs juxtaposés peut permettre de combiner des faisceaux laser injectés dans chacun des cœurs [35] [36]. On obtient en sortie de la fibre un « supermode » de très bonne qualité spatiale (M^2 voisin de 1) emportant la puissance véhiculée dans l'ensemble des cœurs.

L'amplification dans des fibres multi-cœurs de ce type est particulièrement étudiée pour la montée en puissance des lasers impulsions ultra courts femtoseconde.

4.1.3 Couplage par conjugaison de phase

Une fibre optique fortement non linéaire peut aussi servir de **miroir non linéaire par conjugaison de phase** (un effet non linéaire qui conduit à une réflexion lumineuse automatiquement alignée sur le faisceau incident et en opposition de phase avec ce faisceau). On peut utiliser une telle fibre comme miroir à conjugaison de phase pour coupler et combiner plusieurs lasers [37].

Ces deux dernières techniques de couplage, par ondes évanescentes et par conjugaison de phase, restent pour l'instant des études de laboratoire rarement mises en application en pratique et limitées en puissance.

4.2 Combinaison de sources laser impulsionsnelles

Les sources laser impulsionsnelles et leurs applications sont nombreuses, mais elles présentent des **caractéristiques d'émission sensiblement différentes** de celles des lasers continus.

En particulier, la notion de phase d'un laser continu monofréquence est bien établie, alors que, par transformée de Fourier, une source impulsionsnelle n'est jamais purement monofréquence, et définir la phase d'une source impulsionsnelle est plus complexe.

Les techniques incohérentes comme la combinaison spectrale s'appliquent sans distinction, aussi bien aux lasers continus qu'aux lasers impulsionsnels. Par exemple, la combinaison de lasers impulsionsnels a permis de battre des records de puissance crête (c'est-à-dire de puissance instantanée, la puissance crête d'un laser impulsionsnel est le quotient de l'énergie moyenne de ses impulsions par leur durée moyenne ; cette puissance crête est donc d'autant plus élevée que la durée des impulsions est courte). La combinaison spectrale en régime impulsionsnel nanoseconde de 2 faisceaux a été réalisée pour la première fois par l'IAP Jena (Allemagne) en 2008 [38] avec 47 kW de puissance crête totale et un M^2 résultant de 1,18.

Avec des fibres rigides très gros cœurs (fibres dites *rod-type*), l'IAP Jena a même atteint 1,7 MW crête de puissance combinée, en additionnant 4 faisceaux laser impulsionsnels de durée 2,2 ns pour un M^2 de 1,3 dans la direction verticale et de 2,3 dans la direction horizontale [39].

De même, des réalisations de combinaison cohérente passive impulsionsnelle ont été démontrées, en particulier par une équipe chinoise [40] et une équipe israélienne [41].

La combinaison cohérente par contrôle actif de la phase est quant à elle plus délicate à appliquer aux lasers impulsionsnels, car la vitesse des boucles de rétroaction n'est pas suffisante pour permettre le contrôle de la phase pendant une impulsions laser, même nanoseconde : les impulsions laser, même les plus longues, sont trop brèves.

4.2.1 Cas des lasers nanoseconde

Le cas des lasers impulsionsnels nanoseconde est cependant assez proche de celui des lasers continus, car l'élargissement spectral est faible et les lasers nanoseconde fins spectralement peuvent être à peu de choses près, considérés comme monofréquence. Leur phase est donc bien définie.

Néanmoins, une impulsions de 1 à 500 ns est beaucoup trop brève pour disposer d'une électronique suffisamment rapide pour le contrôle des fluctuations de phase éventuelles se produisant pendant l'impulsions.

Dans de nombreux lasers, cependant, ces fluctuations de phase sont négligeables et il est possible de combiner efficacement des lasers nanoseconde en contrôlant la phase, non pas pendant les impulsions, mais entre les impulsions.

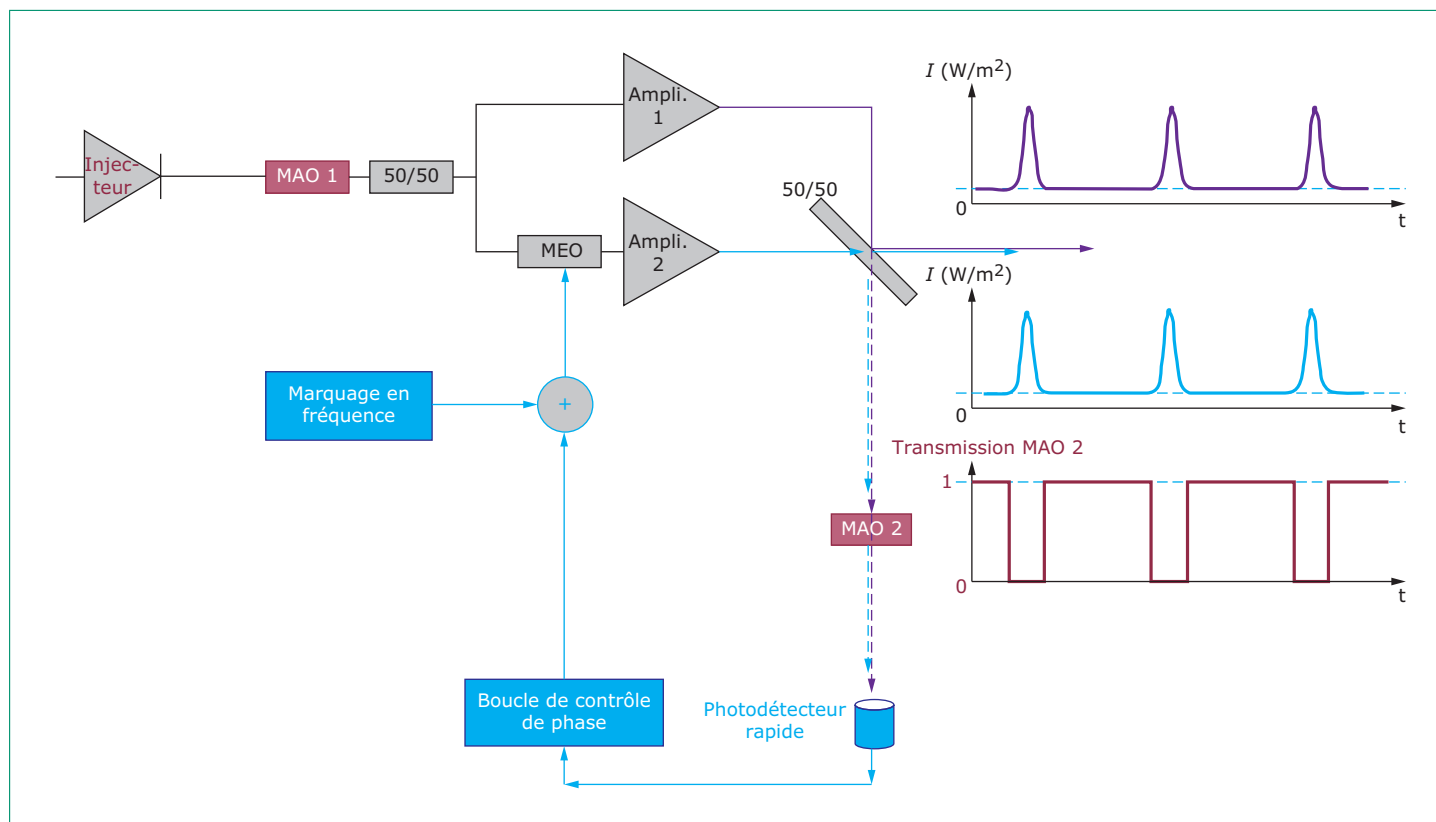


Figure 18 – Combinaison cohérente par contrôle actif de la phase et marquage en fréquence appliquée à 2 lasers à fibres impulsionnels nanoseconde

C'est ce qui a été démontré par l'Onera : un faible signal continu ajouté entre les impulsions nanoseconde de 2 lasers à fibres a permis, par une technique standard de combinaison cohérente active par marquage en fréquence appliquée au signal continu présent entre les impulsions, de garantir la mise en phase des lasers en début de chaque impulsion et donc la combinaison cohérente efficace des impulsions [42] (figure 18).

Un injecteur continu est rendu impulsif par un modulateur acousto-optique (MAO 1), puis amplifié dans 2 amplificateurs laser à fibres identiques, dont l'un est contrôlé en phase par un modulateur de phase électro-optique (MEO). Le détecteur permettant l'analyse de phase suite au marquage en fréquence est protégé de l'éclairement trop intense des impulsions laser par un obturateur acousto-optique rapide (MAO 2), afin de n'opérer l'analyse de phase que pendant les intervalles entre 2 impulsions successives. Le contrôle de phase est réalisé sur le signal de fuite continu présent entre les impulsions, il garantit la mise en phase des 2 lasers au début de chaque impulsion.

4.2.2 Cas des lasers ultra-courts

Les lasers ultra-courts, picoseconde ou femtoseconde, sont spectralement très larges (plusieurs nanomètres à plusieurs dizaines de nanomètres de largeur spectrale) et il est donc impossible de les considérer comme mono-fréquence.

Néanmoins, la génération d'impulsions ultra-courtes ne peut se faire que si les modes de cavité laser nombreux constituant le spectre complexe de ces lasers ultra-courts sont fortement corrélés en phase.

De ce fait, on peut appliquer les techniques de combinaison cohérente au cas de ces lasers ultra-courts, puisque la mise en phase du mode central du spectre laser garantira, compte tenu de la corrélation de phase des modes latéraux, une mise en phase globale du spectre laser dans son intégralité.

C'est ainsi que les techniques de combinaison cohérente par contrôle actif de la phase ont pu être utilisées pour combiner des lasers picoseconde [43] et femtoseconde [44] sans changer la configuration ni l'électronique de combinaison, par rapport au cas des lasers continus.

Une problématique supplémentaire apparaît toutefois dans le cas de ces lasers ultra-courts, celle de la synchronisation des impulsions issues des différents lasers combinés. En effet, la propagation dans l'air sur une distance de 3 cm suffit à décaler d'une durée d'impulsion laser une source 100 ps. C'est encore bien pire pour une source 100 fs, puisque 30 μm de différence de chemin optique dans l'air suffisent à désynchroniser complètement les impulsions laser.

Quand on ne dispose pas de moyen de garantir l'égalité parfaite des chemins optiques dans chacune des sources laser que l'on combine, différents dispositifs de lignes à retard sont mis en place, en plus des dispositifs de contrôle de phase, pour à la fois mettre en phase et synchroniser les lasers ultra-courts pour une combinaison efficace [45].

Toutes ces démonstrations de faisabilité de combinaison cohérente active impulsif ont ouvert la voie à l'utilisation de cette technique active pour toutes les classes de lasers, du continu au femtoseconde.

4.3 Mise en forme de front d'onde par combinaison

4.3.1 Propagation d'une onde optique à travers la turbulence atmosphérique

Outre la montée en puissance laser, la configuration géométrique de combinaison cohérente par contrôle actif de la phase où les pupilles laser sont juxtaposées (figure 8b) offre une capacité supplémentaire : la mise en forme de front d'onde en temps réel.

En effet, le contrôle de la phase de chaque pupille laser permet, à la façon d'un miroir déformable utilisé en optique adaptative, de modeler le front d'onde laser global pour, par exemple, pré-compenser l'impact sur ce front d'onde des turbulences atmosphériques.

On appelle **front d'onde** d'un faisceau laser la surface en tout point de laquelle les rayons lumineux émis par le laser ont tous la même valeur de phase.

La plupart des faisceaux laser présentent un front d'onde qui est, **soit sphérique** (la surface isophase est une portion de sphère), **soit plan**, tout au moins localement. De tels fronts d'onde plans ou sphériques bien réguliers garantissent la qualité du faisceau laser, et donc sa capacité à être focalisé sur un petit diamètre à l'aide d'une lentille convergente. La préservation de la régularité du front d'onde lors de la propagation du faisceau laser est donc essentielle pour préserver la qualité et une faible valeur de M^2 au faisceau laser.

Malheureusement, certains milieux propagatifs comme l'atmosphère ne sont pas forcément inertes et impactent parfois fortement le front d'onde laser lors de sa propagation.

L'atmosphère, en particulier, est turbulente, c'est-à-dire que suite aux mouvements de l'air, lorsque l'écoulement de l'air passe d'un état laminaire à un état plus chaotique, appelé turbulent, il y a apparition de tourbillons. Ces tourbillons sont causés notamment par l'éclairement solaire et la convection, qui entraînent un brassage de l'air et s'accompagnent de fluctuations de température et de pression. Or, comme l'indice de réfraction de l'air dépend de la température, les variations spatio-temporelles de celle-ci induisent des fluctuations aléatoires de l'indice de réfraction, ce qui perturbe la propagation des ondes optiques, les variations d'indice de l'air introduisant localement des avances ou des retards de phase des ondes optiques, conduisant au final à un front d'onde laser déformé.

Il y a **trois principaux effets de la turbulence atmosphérique sur un faisceau laser**. Le premier effet de la turbulence atmosphérique est la déviation du faisceau induite par les mouvements de l'air à grande échelle, qui conduisent à une inclinaison du front d'onde laser et à une déviation de la direction du faisceau perpendiculaire à la tangente au front d'onde. Un second effet possible de la turbulence atmosphérique est l'étalement du faisceau laser induit par des tourbillons de plus petite taille, plus localisés, et qui brisent la régularité du front d'onde laser et déforment le profil spatial du faisceau. Ces effets s'accompagnent d'un troisième phénomène de scintillation, lui aussi induit par des déformations locales du front d'onde, et se traduisant par des fortes inhomogénéités de densité de puissance locale dans le faisceau (c'est-à-dire des « points chauds » dans le faisceau).

4.3.2 Miroirs déformables pour l'optique adaptative

Dans **le monde de l'astronomie**, où tous ces phénomènes impactent fortement la qualité et la netteté des clichés photo-

graphiques obtenus des astres lointains, on a développé une technique pour compenser l'impact négatif de la turbulence atmosphérique : l'optique adaptative. On a conçu des appareils permettant de mesurer la déformation du front d'onde optique par la turbulence et des **miroirs déformables** permettant de pré-déformer en sens inverse le front d'onde pour compenser l'effet des turbulences atmosphériques. Le principe du miroir déformable est présenté dans la partie gauche en figure 19a.

Un miroir déformable est constitué d'une surface réfléchissante, en métal ou en verre traité, d'épaisseur suffisamment faible pour pouvoir être déformée par un réseau d'actuateurs piézoélectriques placé sous cette surface déformable (en vert sur la figure 19a). Quand une onde plane incidente est réfléchi par ce miroir, on peut déformer le front d'onde plan à volonté. Si on a procédé à l'analyse préalable des déformations induites par l'atmosphère turbulente, on peut, comme indiqué sur la figure 19a, tenter de reproduire une déformation de front d'onde inverse qui sera déformée en front d'onde plan par les turbulences atmosphériques.

Un dispositif d'optique adaptative complet comprend donc 2 parties (figure 20a), un analyseur de front d'onde qui mesure les déformations induites par la turbulence atmosphérique sur un astre dont l'image est connue, et un miroir déformable qui permet de compenser ces turbulences et d'obtenir une image nette avec un télescope.

4.3.3 Mise en forme de front d'onde par optique adaptative cohérente

Ces techniques d'optique adaptative n'ont pas été utilisées que pour l'astronomie. Elles ont également été mises en œuvre pour compenser l'impact des turbulences atmosphériques sur un faisceau laser, et préserver la qualité du faisceau lors de sa propagation atmosphérique, comme proposé sur la figure 20b.

La figure 19b montre comment la configuration de pupilles laser juxtaposées et le contrôle de phase en temps réel peuvent permettre de remplir la même fonction de mise en forme du front d'onde que les miroirs déformables. Les multiples pupilles laser échantillonnent le front d'onde émis, que l'on peut déformer à volonté et dynamiquement par le contrôle de phase en temps réel de chaque pupille émettrice.

Comme avec un miroir déformable, si on a procédé à l'analyse préalable des déformations induites par l'atmosphère turbulente, on peut tenter de reproduire, par contrôle de phase approprié des pupilles laser, une déformation de front d'onde inverse qui sera déformée en front d'onde plan par les turbulences atmosphériques lors de la propagation du faisceau laser jusqu'à sa cible.

Un des intérêts de cette approche est d'éviter les effets de bords des segments d'un miroir déformable, qui peuvent induire une déformation dommageable du front d'onde laser.

Plusieurs travaux d'équipes américaines dans les années 1980 ont montré la faisabilité de cette optique adaptative cohérente (en anglais COAT-Coherent Optical Adaptive Techniques) [46] [47]. Les équipes de l'ARL et de l'université de l'Ohio ont remis au goût du jour plus récemment ces travaux et montré que l'on pouvait faire de l'optique adaptative pour compenser les turbulences atmosphériques rencontrées par un faisceau laser en utilisant les techniques de combinaison cohérente par contrôle actif de la phase [48]. Ces travaux se basent toutefois sur une analyse de phase par optimisation itérative du signal rétro-diffusé par la cible [49].

L'Onera a démontré une approche intéressante et plus précise en phase, puisque basée sur le marquage en fréquence : elle procède à la combinaison cohérente de lasers sur une cible distante, par contrôle actif de la phase et marquage en fréquence, en utilisant pour l'analyse de phase le signal rétro-

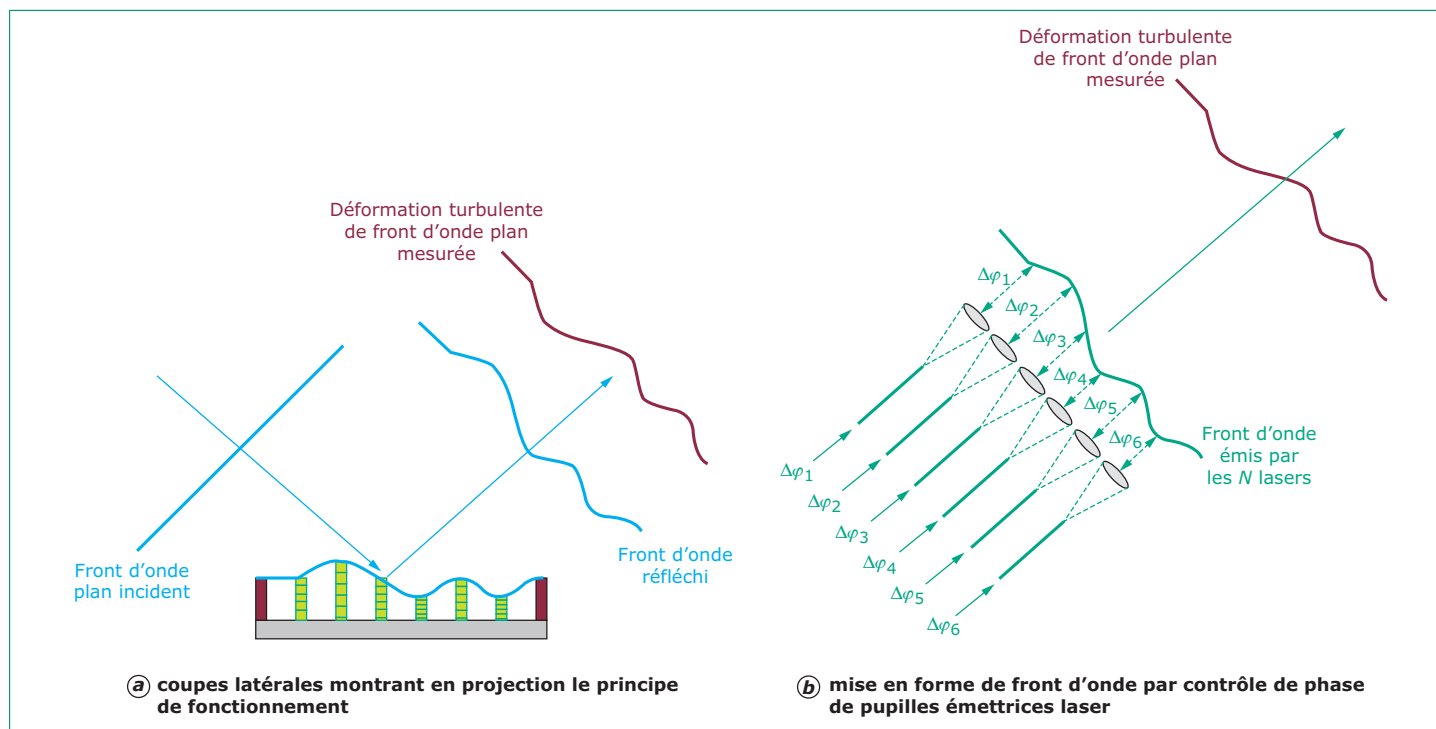


Figure 19 – Miroir déformable

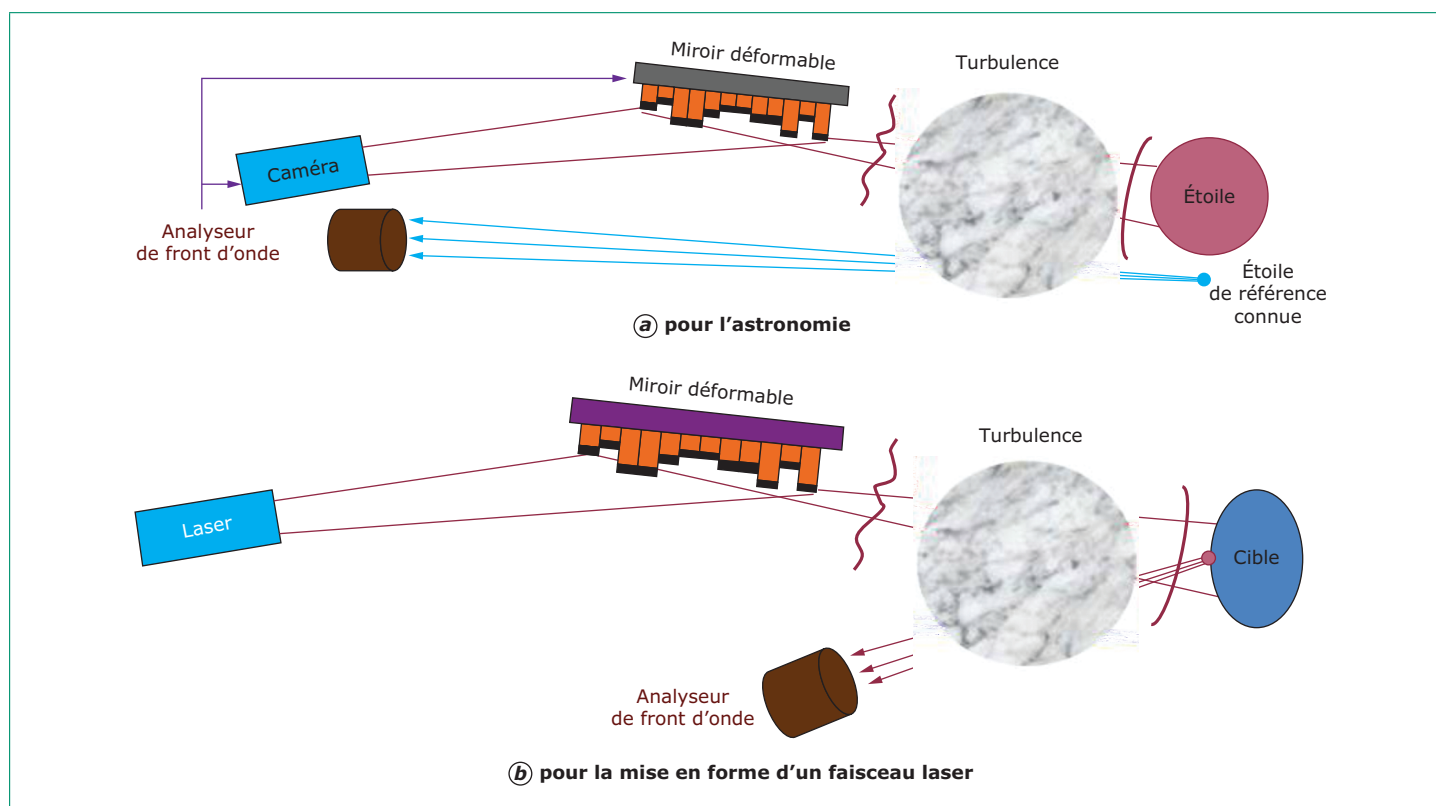


Figure 20 – Système d'optique adaptative

diffusé par la cible en lieu et place de la fraction de signal d'interférence en champ proche normalement utilisée dans le cadre de la mise en œuvre standard de cette technique [50].

Aujourd'hui toutefois, malgré ces deux démonstrations de sa faisabilité, l'optique adaptative cohérente est encore rarement employée, et on lui préfère souvent les techniques classiques d'optique adaptative par miroir déformable qui sont mieux maîtrisées.

5. Conclusion

Les techniques de combinaison incohérente, combinaison de polarisation, superposition spatiale, combinaison spectrale, sont des techniques relativement simples de mise en œuvre qui permettent d'additionner très efficacement les puissances de plusieurs lasers. Cependant, ces techniques ne donnent généralement pas accès à la combinaison de plus de quelques dizaines de sources laser, tout du moins sans sacrifier leur simplicité, leur fiabilité et leur robustesse.

Les techniques de combinaison cohérente, qu'elles soient passives ou actives, sont plus complexes en apparence puisqu'elles utilisent une figure d'interférences entre les faisceaux laser combinés pour concentrer la puissance.

Les techniques de combinaison cohérente passives sont elles aussi très limitées en nombre maximal de sources laser combi-

nées, et il semble difficile d'additionner ainsi les puissances de plus de quelques dizaines de lasers.

Par contre, la combinaison cohérente par contrôle actif de la phase offre un potentiel élevé pour la combinaison de centaines voire de milliers de sources laser (avec certes une complexité proportionnelle au nombre de lasers combinés), en particulier si l'analyse de phase est réalisée par marquage en fréquence.

Le tableau 1 résume les avantages et inconvénients de toutes ces techniques de combinaison de lasers, ainsi que les points durs technologiques conduisant à limiter le nombre maximal de lasers que l'on peut espérer combiner.

Les techniques de combinaison spectrale et de combinaison cohérente sont encore à l'étude dans de nombreux laboratoires dans le monde, où on tente encore d'accroître, à la fois la puissance maximale et le nombre de sources laser maximal que l'on peut combiner, en essayant de surmonter les points durs mentionnés dans le tableau 1.

L'utilisation des techniques de combinaison de lasers pour compenser les turbulences atmosphériques se développent également et devraient être mises en œuvre plus fréquemment dans un futur proche.

Les applications principales visées par ces développements sont les armes laser anti-structures, mais aussi des applications civiles variées comme les Lidars, la génération d'étoiles artificielles laser, les télécommunications optiques ou encore les

Tableau 1 – Synthèse des avantages, inconvénients et limites des différentes techniques de combinaison de lasers

Technique de combinaison	Avantages	Inconvénients/Points durs
Combinaison de polarisation	Très simple Composants combineurs bas coût	$N = 2$ $N < 8$ si mise en cascade de combineurs
Superposition de faisceaux	Simple Utilisation de lasers commerciaux	$N < 10$ Limité à des portées faibles de quelques km par l'étalement de la zone éclairée par les lasers
Combinaison spectrale	Excellente efficacité (> 90 %)	$N < 20$ (démonstré jusqu'à $N = 96$, mais stabilité d'alignement à confirmer) Souvent limité à 3 kW de puissance laser par la sensibilité thermique du réseau de diffraction (réseaux multi-couches diélectriques les moins sensibles à cette limite) Complexité d'alignement
Combinaison cohérente passive	Pas besoin de contrôle de phase temps réel Système auto-organisé	$N < 20$, $N < 50$ avec une configuration à plus grand nombre de degrés de liberté Configuration auto-organisée = pas de contrôle de l'utilisateur sur l'état final des phases des lasers Fortes instabilités en puissance si les modes de cavités des lasers ne s'accordent pas parfaitement
Combinaison cohérente par contrôle actif de la phase	N jusqu'à des centaines voire des milliers Utilisation pour l'optique adaptative cohérente possible	Complexité du contrôle de phase en temps réel Selon la méthode d'analyse de phase, limite en vitesse de la boucle de rétroaction ou limite en précision du contrôle de phase Géométrie champ proche à pupilles laser juxtaposées limitant l'efficacité de combinaison à 63-80 %
Combinaison par composant diffractif $N \rightarrow 1$ en champ proche	Excellente efficacité (> 90 %)	$N < 10-20$ Forte sensibilité angulaire du composant diffractif Sensibilité potentielle à l'échauffement du composant diffractif et de son alignement Complexité de conception, fabrication et alignement du composant diffractif

applications industrielles des lasers comme la découpe ou la soudure.

6. Glossaire

arme laser anti-structures ; *anti-structure laser weapon*

Système laser incluant un laser continu très forte puissance, multi-kilowatts, utilisé pour détruire ou endommager gravement, par échauffement de leur structure externe, des cibles distantes.

champ lointain ; *far-field*

Profil d'intensité d'un laser (ou plusieurs lasers dans le cas d'une combinaison) à une distance suffisamment grande de la sortie de la source d'émission pour que son profil spatial d'intensité lumineuse ait évolué jusqu'à stabilisation sous l'effet de la diffraction.

champ proche ; *near-field*

Profil d'intensité d'un laser (ou plusieurs lasers dans le cas d'une combinaison) juste en sortie de la source d'émission, avant que le faisceau laser ait pu se propager sur une distance suffisante pour voir son profil spatial d'intensité lumineuse évoluer sous l'effet de la diffraction.

cohérence ; *coherence*

Stabilité et unicité en longueur d'onde, polarisation et phase d'un faisceau laser.

combinaison cohérente ; *coherent combining*

Superposition additive par interférence de faisceaux laser partageant une même longueur d'onde et une même polarisation. Cela conduit à une nouvelle répartition de la puissance additionnée des sources laser dans les différents lobes de la figure d'interférence générée en champ lointain.

combinaison cohérente par contrôle actif de la phase ; *coherent combining with active phase control*

Combinaison de plusieurs lasers par interférences optiques, en contrôlant en temps réel leurs phases afin de maintenir en permanence des interférences constructives et une efficacité de combinaison maximale.

combinaison cohérente passive ; *passive coherent combining*

Couplage par un élément optique approprié de plusieurs milieux à gain laser afin de les forcer à s'auto-organiser pour additionner leurs puissances efficacement.

combinaison incohérente ; *incoherent combining*

Superposition additive de faisceaux laser sans interférence de ces faisceaux, donc sans modification de la répartition d'intensité lumineuse dans le faisceau.

combinaison spectrale ; *spectral combining*

Combinaison par multiplexage en longueur d'onde, c'est-à-dire par superposition spatiale à l'aide d'un réseau diffractif de faisceaux laser dont les spectres optiques sont légèrement décalés et les longueurs d'onde centrales d'émission distinctes.

chemin optique ; *optical path*

Distance optique parcourue par la lumière, produit de la distance matériellement parcourue par l'indice de réfraction du milieu de propagation (par exemple, la traversée d'une lame en verre d'indice de réfraction 1,5 d'épaisseur 1 mm correspond à un chemin optique parcouru de 1,5 mm).

densité de puissance laser ; *laser power density*

Quotient de la puissance laser par la surface de la zone éclairée par le laser.

différence de phase résiduelle ; *residual phase error*

Erreur quadratique moyenne de la différence de phase entre deux voies mises en phase, exprimée en chemin optique équivalent sous la forme λ/M (λ est la longueur d'onde laser et M un nombre réel ou entier).

efficacité de combinaison ; *combining efficiency*

Fraction de puissance utile, moyennée dans le temps, résultant de la combinaison rapportée à la puissance totale additionnée des N sources combinées.

faisceau laser gaussien ; *gaussian laser beam*

Profil spatial le plus standard d'un faisceau laser ; l'intensité lumineuse et la puissance laser suivent des lois gaussiennes de répartition transverse, le faisceau présente donc globalement une forme circulaire, car il est à symétrie de révolution autour de l'axe de propagation laser.

facteur de qualité de faisceau laser ; *laser beam quality factor*

Facteur multiplicatif correspondant à l'écart à la limite de diffraction, c'est-à-dire à la divergence minimale du faisceau laser compte tenu de la diffraction ; il s'agit du quotient entre la divergence réelle du faisceau et sa divergence minimale, noté M^2 .

figure d'interférence ; *interference pattern*

Profil spatial d'intensité lumineuse généré par l'interférence entre deux ondes lumineuses, cette figure est constituée de lobes clairs où l'intensité lumineuse résultante est forte, et de lobes sombres où l'intensité lumineuse s'annule.

front d'onde ; *wavefront*

Surface iso-phase où la phase des rayons lumineux émis par une source laser est uniforme. Le front d'onde plan est un front d'onde théorique classique en optique, et le front d'onde sphérique est le front d'onde résultant de l'émission d'une source lumineuse ponctuelle.

miroir déformable ; *deformable mirror*

Miroir segmenté dont les segments peuvent être traduits afin de déformer la surface du miroir à volonté. C'est un composant standard utilisé en optique adaptative pour déformer le front d'onde optique comme on le souhaite.

mise en phase ; *phase-locking*

Égalisation de toutes les phases des N lasers combinés. Lorsque les lasers sont mis en phase, la figure d'interférence en champ lointain reste stable et ses lobes fixes en position. De ce fait, la puissance moyenne déposée dans chaque lobe d'interférence est maximale et l'efficacité de combinaison optimale.

mode de cavité laser ; *laser cavity mode*

Fréquence optique spécifique amplifiée efficacement par une source laser car elle subit un déphasage de 2π sur un aller-retour dans la cavité laser. Une fréquence qui n'est pas un mode de cavité est moins fortement amplifiée qu'un mode de cavité : des interférences destructives atténuent sa puissance lors des allers-retours dans la cavité laser.

module de translation piézoélectrique ; *translation piezoelectric module*

Module comprenant un empilement de céramiques piézoélectriques dont la longueur varie selon la tension électrique qui leur

est appliquée. Un tel module permet de réaliser des déplacements en translation extrêmement précis, avec une résolution aussi faible que 10 nm.

optique adaptative ; adaptive optics

Technique optique de déformation du front d'onde utilisée pour compenser les déformations induites par la propagation à travers les turbulences atmosphériques.

polarisation (d'un laser) ; (laser) polarization

Direction du champ électrique d'une onde laser, souvent transverse, c'est-à-dire perpendiculaire à la direction de propagation du faisceau laser.

polarisation linéaire ; linear polarization

Polarisation constante dans le temps.

profil spatial ; spatial profile

Section transverse (c'est-à-dire perpendiculaire à la direction de propagation) de puissance dans un faisceau laser, qui montre la répartition transverse de puissance dans le faisceau laser.

puissance crête d'un laser ; laser peak power

Puissance caractéristique d'un laser impulsif, égale au quotient de l'énergie moyenne de ses impulsions par leur durée moyenne.

régime temporel nanoseconde ; nanosecond pulse regime

Se dit d'un laser impulsif dont les impulsions ont une durée comprise entre 1 ns et 500 ns, jamais plus que la microseconde.

régime temporel picoseconde ; picosecond pulse regime

Se dit d'un laser impulsif dont les impulsions ont une durée comprise entre 1 ps et 500 ps, jamais plus que la nanoseconde.

régime temporel femtoseconde ; femtosecond pulse regime

Se dit d'un laser impulsif dont les impulsions ont une durée comprise entre 1 fs et 500 fs, jamais plus que la picoseconde.

réseau holographique ; holographic grating

Réseau de diffraction pour lequel l'inscription du réseau périodique est réalisée sous forme d'hologramme, dans le volume du matériau constituant le substrat du réseau.

temps de lecture ; readout time

Temps nécessaire pour recueillir et interpréter sous forme d'image l'ensemble des charges électriques et des courants générés par la matrice de pixels photo-détecteurs d'une caméra. C'est donc la durée minimale nécessaire pour la génération d'une image par une caméra.

traitement multi-couches diélectriques ; multi-layer dielectric coating

Traitement de surface déposé sous vide par des techniques de dépôt chimique en phase vapeur, couche par couche de matériaux diélectriques différents choisis en fonction de leurs indices de réfraction respectifs et pré-calculés pour générer une fonction de filtrage spectral spécifique en réflexion ou en transmission.

7. Sigles et symboles

Symbole	Description
BPF	Beam Propagation Factor
COAT	Coherent Optical Adaptive Techniques
LOCSET	Locking of Optical Coherence via Single-detector Electronic-frequency Tagging
M^2	Facteur de qualité d'un faisceau laser ($M^2 \geq 1,0$)
MEP	Mask Encircled Power
PTR	Photo-Thermo Réfractif (Photo-Thermo Refractive)
SPGD	Stochastic Parallel Gradient Descent

Techniques de combinaison de sources laser

par **Pierre BOURDON**

Chargé de mission « Laser de puissance pour la défense »
Département d'Optique
Onera – The French Aerospace Lab, Palaiseau, France

Sources bibliographiques

- [1] KLENKE (A.), BREITKOPF (S.), GOTTSCHALL (T.), EIDAM (T.), LIMPET (J.) et TUNNERMANN (A.). – *4-channel coherently combined femtosecond fiber CPA system*. Conférence Photonics West 2013, p. 8601-8642 (2013).
- [2] KIEL (D.H.). – *Fiber lasers for surface Navy applications*. Conférence Photonics West 2010, p. 7580-7521 (2010).
- [3] HANKLA (B.J.). – *Navy laser weapon system (LaWS) prototype development and testing*. Conférence Photonics West 2011, p. 7915-7911 (2011).
- [4] JUNG (M.). – *The laser weapons program at Rheinmetall Combat Systems*. Research Meeting topic 2.3 « Laser and laser application », Institut Franco-Allemand de Saint-Louis (2013).
- [5] MOHRING (B.), DIETRICH (S.), TASSINI (L.), PROTZ (R.), GEIDEK (F.) et ZOZ (J.). – *High-energy laser activities at MBDA Germany*. Proc. SPIE, 8733, 873304 (2013).
- [6] SPRANGLE (P.), TING (A.), PEÑANO (J.), FISCHER (R.) et HAFIZI (B.). – *Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications*. IEEE J. Quant. Elec., 45(2), p. 138-148 (2009).
- [7] LOFTUS (T.H.), LIU (A.), HOFFMAN (P.R.), THOMAS (A.), NORSEN (M.), HAMILTON (C.E.) et HONEA (E.). – *258 W of spectrally beam combined power with near-diffraction limited beam quality*. Proc. SPIE, 6102, 61020S (2006).
- [8] CIAPURIN (I.V.), GLEBOV (L.B.), GLEBOVA (L.N.), SMIRNOV (V.I.) et ROTARI (E.V.). – *Incoherent combining of 100-W Yb-fiber laser beams by PTR Bragg grating*. Proc. SPIE, 4974, p. 209-219 (2003).
- [9] WIRTH (C.), SCHMIDT (O.), TSYBIN (I.), SCHREIBER (T.), PESCHEL (T.), BRUCKNER (F.), CLAUSNITZER (T.), LIMPET (J.), EBERHARDT (R.), TUNNERMANN (A.), GOWIN (M.), TEN HAVE (E.), LUDEWIGT (K.) et JUNG (M.). – *2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers*. Opt. Express, 17(3), p. 1178-1183 (2009).
- [10] WIRTH (C.), SCHMIDT (O.), TSYBIN (I.), SCHREIBER (T.), EBERHARDT (R.), LIMPET (J.), TUNNERMANN (A.), LUDEWIGT (K.), GOWIN (M.), TEN HAVE (E.) et JUNG (M.). – *High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW*. Opt. Lett., 36(16), p. 3118-3120 (2011).
- [11] HONEA (E.), AFZAL (R.S.), SAVAGE-LEUCHS (M.), GITKIND (N.), HUMPHREYS (R.), HENRIE (J.), BRAR (K.) et JANDER (D.). – *Spectrally beam combined fiber lasers for high power, efficiency and brightness*. Proc. SPIE, 8601, 860115 (2013).
- [12] DRACHENBERG (D.R.), DIVLIANSKY (I.), SMIRNOV (V.), VENUS (G.B.) et GLEBOV (L.B.). – *High power spectral beam combining of fiber lasers with ultra high spectral density by thermal tuning of volume Bragg gratings*. Proc. SPIE, 7914, 79141F (2011).
- [13] DRACHENBERG (D.R.), ANDRUSYAK (O.), COHANOSCHI (I.), DIVLIANSKY (I.), MOKHUN (O.), PODVYAZNYY (A.), SMIRNOV (V.), VENUS (G.B.) et GLEBOV (L.B.). – *Thermal tuning of volume Bragg gratings for high power spectral beam combining*. Proc. SPIE, 7580, 75801U (2010).
- [14] HONEA (E.), AFZAL (R.S.), SAVAGE-LEUCHS (M.), HENRIE (J.), BRAR (K.), KURZ (N.), JANDER (D.), GITKIND (N.), HU (D.), ROBIN (C.), JONES (A.M.), KASINADHUNI (R.) et HUMPHREYS (R.). – *Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling*. Proc. SPIE, 9730, 97300Y (2016).
- [15] SIEGMAN (A.). – *Resonant modes of linearly coupled multiple fiber laser structures*. Prévu dans JOSA mais non publié, disponible sur internet @stanford.edu (2004).
- [16] KOUZNETSOV (D.), BISSON (J-F.), SHIRAKAWA (A.) et UEDA (K-I.). – *Limits of coherent addition of lasers : simple estimate*. Conférence CLEO-Pacific 2005, Paper CWI4-3 (2005).
- [17] CHANG (W.-Z.), WU (T.-W.), WINFUL (H.G.) et GALVANASKAS (A.). – *Array size scalability of passively coherently phased fiber laser arrays*. Opt. Express, 18(9), p. 9634-9642 (2010).
- [18] BRUESSELBACH (H.), MINDEN (M.), ROGERS (J.L.), JONES (D.C.) et MANGIR (M.S.). – *200 W Self-organized coherent fiber arrays*. Conférence CLEO 2005, Paper CMDD4 (2005).
- [19] LHERMITE (J.), DESFARGES-BERTHELEMY (A.), KERMENE (V.) et BARTHELEMY (A.). – *Passive phase locking of an array of four fiber amplifiers by an all-optical feedback loop*. Opt. Lett., 32(13), p. 1842-1844 (2007).
- [20] LOFTUS (T.H.), THOMAS (A.M.), NORSEN (M.), MINELLY (J.), JONES (P.), HONEA (E.), SHAKIR (S.A.), HENDOW (S.), CULVER (W.), NELSON (B.) et FITELSON (M.). – *Four-channel, high power, passively phase locked fiber array*. Conférence Advanced Solid State Photonics 2008, Paper WA4 (2008).
- [21] JEUX (F.), DESFARGES-BERTHELEMY (A.), KERMENE (V.), GUILLOT (J.) et BARTHELEMY (A.). – *Passive coherent combining of lasers with phase-contrast filtering for enhanced efficiency*. Appl. Phys. B, 108(1), p. 81-87 (2012).
- [22] JEUX (F.), DESFARGES-BERTHELEMY (A.), KERMENE (V.) et BARTHELEMY (A.). – *Experimental demonstration of passive coherent combining of fiber lasers by phase contrast filtering*. Opt. Express, 20(27), p. 28941-28946 (2012).
- [23] YU (C.X.), KANSKY (J.E.), SHAW (S.E.J.), MURPHY (D.V.) et HIGGS (C.). – *Coherent beam combining of large number of PM fibres in 2-D fibre array*. Electr. Lett., 42(18), p. 1024-1025 (2006).
- [24] BOURDERIONNET (J.), BELLANGER (C.), PRIMOT (J.) et BRIGNON (A.). – *Collective coherent phase combining of 64 fibers*. Opt. Express, 19(18), p. 17053-17058 (2011).
- [25] REDMOND (S.M.), KANSKY (J.E.), CREEDON (K.J.), MISSAGGIA (L.J.), CONNORS (M.K.), TURNER (G.W.), FAN (T.Y.) et SANCHEZ-RUBIO (A.). – *Active coherent combination of > 200 semiconductor amplifiers using a SPGD algorithm*. Conférence CLEO 2011, Paper CTuV1 (2011).
- [26] SHAY (T.M.), BENHAM (V.), BAKER (J.T.), WARD (B.), SANCHEZ (A.D.), CULPEPPER (M.A.), PILKINGTON (D.), SPRING (J.), NELSON (D.J.) et LU (C.A.). – *First experimental demonstration of self-synchronous phase locking of an optical array*. Opt. Express, 14(25), p. 12015-12021 (2006).
- [27] SHAY (T.M.), BENHAM (V.), BAKER (J.T.), SANCHEZ (A.D.), PILKINGTON (D.) et LU (C.A.). – *Self-synchronous and self-referenced coherent beam combination for large optical arrays*. IEEE J. Sel. Top. In Quantum Electron., 13(3), p. 480-486 (2007).
- [28] YU (C.X.), AUGST (S.J.), REDMOND (S.M.), GOLDIZEN (K.C.), MURPHY (D.V.), SANCHEZ (A.) et FAN (T.Y.). – *Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array*. Opt. Lett., 36(14), p. 2686-2688 (2011).

- [29] SHAY (T.M.), BAKER (J.T.), ROBIN (C.A.), VERGIEN (L.C.), ZERINQUE (C.), GALLANT (D.), SANCHEZ (A.D.), PILKINGTON (Sgt.D.), LU (C.A.) et BRONDER (Capt.T.J.). – *Electronic phasing of high power fiber amplifier arrays*. Proc. 21st Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society LEOS 2008, Paper ThL1, p. 783-784 (2008).
- [30] FLORES (A.), SHAY (T.M.), LU (C.A.), ROBIN (C.A.), PULFORD (B.), SANCHEZ (A.D.), HULT (D.W.) et ROWLAND (K.B.). – *Coherent beam combining of fiber amplifiers in a kW regime*. Conference CLEO 2011, Paper CFE3 (2011).
- [31] LOMBARD (L.), CANAT (G.), DURÉCU (A.) et BOURDON (P.). – *Coherent beam combining performance in harsh environment*. Proc. SPIE, 8691, 869107 (2014).
- [32] KRACKHARDT (U.), MAIT (J.N.) et STREIBL (N.). – *Upper bound on the diffraction efficiency of phase-only fanout elements*. Appl. Opt., 31(1), p. 27-37 (1992).
- [33] CHEUNG (E.C.), HO (J.G.), GOODNO (G.D.), RICE (R.R.), ROTHENBERG (J.E.), THIELEN (P.A.), WEBER (M.) et WICKHAM (M.). – *Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array*. Opt. Lett., 33(4), p. 354-356 (2008).
- [34] REDMOND (S.M.), RIPIN (D.J.), YU (C.X.), AUGST (S.J.), FAN (T.Y.), THIELEN (P.A.), ROTHENBERG (J.E.) et GOODNO (G.D.). – *Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam*. Opt. Lett., 37(14), p. 2832-2834 (2012).
- [35] HARTL (I.), MARCINKIEWICZ (A.), MCKAY (H.A.), DONG (L.) et FERMAN (M.E.). – *Coherent beam combination using multi-core leakage-channel fibers*. Conférence Advanced Solid State Photonics 2009, Paper TuA6 (2009).
- [36] LHERMITE (J.), SURAN (E.), KERMENE (V.), LOURADOUR (F.), DESFARGES-BERTHELEMY (A.) et BARTHELEMY (A.). – *Coherent combining of 49 laser beams from a multiple core optical fiber by a spatial light modulator*. Opt. Express, 18(5), p. 4783-4789 (2010).
- [37] BROWN (K.C.), RUSSELL (T.H.), ALLEY (T.G.) et ROH (W.B.). – *Passive combination of multiple beams in an optical fiber via stimulated Brillouin scattering*. Opt. Lett., 32(9), p. 1047-1049 (2007).
- [38] SCHMIDT (O.), KLINGEBIEL (S.), ORTAC (B.), ROSER (F.), BRUCKNER (F.), CLAUSNITZER (T.), KLEY (E.-B.), LIMPET (J.) et TUNNERMANN (A.). – *Spectral combining of pulsed fiber lasers: scaling considerations*. Proc. SPIE, 6873, 687317 (2008).
- [39] SCHMIDT (O.), ANDERSEN (T.V.), LIMPET (J.) et TUNNERMANN (A.). – *187 W, 3.7 mJ from spectrally combined pulsed 2 ns fiber amplifiers*. – Opt. Lett., 34(3), p. 226-228 (2009).
- [40] LIU (H.), ZHOU (J.), HE (B.) et LOU (Q.). – *Passive coherent beam combination of two nanosecond fiber amplifiers by using an all-optical feedback loop*. Proc. SPIE, 8601, 860119 (2013).
- [41] ISHAAYA (A.A.), DAVIDSON (N.) et FRIESEM (A.A.). – *Passive laser beam combining with intracavity interferometric combiners*. IEEE J. Sel. Top. Quant. Elec., 15(2), p. 301-311 (2009).
- [42] LOMBARD (L.), AZARIAN (A.), CADORET (K.), BOURDON (P.), GOULAR (D.), CANAT (G.), JOLIVET (V.), JAOUËN (Y.) et VASSEUR (O.). – *Coherent beam combination of narrow-linewidth 1.5 μ m fiber amplifiers in a long-pulse regime*. Opt. Lett., 36(4), p. 523-525 (2011).
- [43] MA (P.), TAO (R.), WANG (X.), MA (Y.), SU (R.) et ZHOU (P.). – *Coherent polarization beam combination of four mode-locked fiber MOPAs in picosecond regime*. Opt. Express, 22(4), p. 4123-4130 (2014).
- [44] DANIAULT (L.), HANNA (M.), LOMBARD (L.), ZAOUTER (Y.), MOTTAY (E.), GOULAR (D.), BOURDON (P.), DRUON (F.) et GEORGES (P.). – *Coherent beam combining of two femtosecond fiber chirped-pulse amplifiers*. Opt. Lett., 36(5), p. 621-623 (2011).
- [45] LE DORTZ (J.), ANTIER (M.), BOURDERIONNET (J.), LARAT (C.), HEILMANN (A.), FSAIFES (I.), DANIAULT (L.), BELLANGER (S.), SIMON BOISSON (C.), CHANTELOUP (J.-C.), LALLIER (E.) et BRIGNON (A.). – *Coherent beam combining of 19 fibers in femtosecond regime*. Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC), Paper JT2A.39 (2016).
- [46] O'MEARA (T.R.). – *The multidither principle in adaptive optics*. J. Opt. Soc. Am., 67(3), p. 306-315 (1977).
- [47] PEARSON (J.E.), BRIDGES (W.B.), HANSEN (S.), NUSSMEIER (T.A.) et PEDINOFF (M.E.). – *Coherent optical adaptive techniques: design and performance of an 18-element visible multidither COAT system*. Appl. Opt., 15(3), p. 611-621 (1976).
- [48] WEYRAUCH (T.), VORONTOV (M.A.), CARHART (G.W.), BERESNEV (L.A.), ROSTOV (A.P.), POLNAU (E.E.) et LIU (J.J.). – *Experimental demonstration of coherent beam combining over a 7 km propagation path*. – Opt. Lett., 36(22), p. 4455-4457 (2011).
- [49] VORONTOV (M.A.) et WEYRAUCH (T.). – *High-power lasers for directed-energy applications: comment*. Appl. Opt., 55(35), p. 9950-9953 (2016).
- [50] JOLIVET (V.), BOURDON (P.), BENNAI (B.), LOMBARD (L.), GOULAR (D.), POURTAL (E.), CANAT (G.), JAOUËN (Y.), MOREAU (B.) et VASSEUR (O.). – *Beam shaping of single mode and multimode fiber amplifier arrays for propagation through atmospheric turbulence*. IEEE J. Sel. Top. Quant. Elec., 15(2), p. 257-268 (2009).

À lire également dans nos bases

- AMBS (P.). – *Calcul optoélectronique et hologrammes calculés*. [RE 171] (2013).
- AUDOUARD (E.). – *Lasers à impulsions ultrabrèves : applications*. [E 6 455] (2011).
- AMRA (C.) et GRÈZES-BESSET (C.). – *Couches minces optiques et filtrage interférentiel – Champs et multicouches, synthèse, résonances et modes...* [AF 3 348] (2011).
- BOUCHAREINE (P.). – *Interférences de la lumière – Théorie et applications*. [R 6 475] (2002).
- BOULEY (J.-C.). – *Lasers à semi-conducteurs*. [E 2 660] (2007).
- BOULON (G.). – *Sources lasers à l'état solide. Fondements*. [AF 3 275] (2016).
- BRASSART (G.), MEYZONNETTE (J.-L.) et POCHOLLE (J.-P.). – *Sources laser*. [E 4 020] (1996).
- COJAN (Y.). – *Propagation du rayonnement dans l'atmosphère*. [E 4 030] (1995).
- COURRIER (G.). – *Applications militaires du laser*. [E 4 940] Archives (1987).
- HANNA (M.). – *Sources laser à fibre et applications*. [E 6 450] (2012).
- HENRY (M.). – *Optique ondulatoire – Interférences. Diffraction. Polarisation*. [A 191] (1982).
- HIRTH (A.). – *Lasers à solides*. [AF 3 272] (2001).
- HUE (J.) et ROCHAS (J.-L.). – *Risques laser – Risques faisceaux et hors faisceaux. Aspects réglementaires*. [SL 6 150] (2016).
- MAILLET (H.). – *Sécurité laser*. [E 2 715] Archives (1986).
- PRENEL (J.-P.). – *Physique du laser – Historique et principes de base*. [AF 3 270] (1999).
- RUNCIMAN (H.). – *Éléments de conception optique*. [E 4 040] (1995).
- SMIGIELSKI (P.). – *Holographie optique – Principes*. [AF 3 340] (1998).

Événements

- Conférence SPIE – Photonics West : tous les ans à San Francisco
<http://spie.org/conferences-and-exhibitions/photonics-west>
- Conférence SPIE – Defense and Security : tous les ans aux États-Unis
<http://spie.org/conferences-and-exhibitions/defense--commercial-sensing>
- Conférence SPIE Europe – Security and Defense : tous les ans en Europe
<http://spie.org/conferences-and-exhibitions/security-and-defence>
- Conférence OSA – CLEO : tous les ans aux États-Unis
<http://www.cleoconference.org/home/>
- Conférence OSA – CLEO Europe : tous les deux ans (années impaires) en Allemagne
<http://www.cleo-europe.org/>
- Conférence OSA – CLEO Pacific Rim : tous les ans en Asie
<http://www.cleopacificrim.com/home/>
- Conférence OSA – ASSL : tous les ans, quelque part dans le monde
<http://assl.osa.org/home/>
- Conférence SFO – Optique : tous les ans en France
<http://www.sfoptique.org>

Normes et standards

Normes de sécurité laser à appliquer hors de la mise en œuvre lasers, qu'ils soient combinés ou pas :

IEC 60825-1 2014 Safety of laser products – Part 1 : Equipment classification and requirements

NF EN 60825-1 2014 AFNOR Sécurité des appareils à laser – Partie 1 : Classification des matériels, et exigences

La norme française AFNOR est une traduction validée officiellement par l'AFNOR de la norme rédigée par l'IEC.

Annuaire

Sociétés développant des lasers de forte puissance par combinaison

Cette liste n'est pas exhaustive, elle fournit quelques-uns des principaux acteurs industriels du développement de sources laser forte puissance intégrant des technologies de combinaison, souvent pour des applications militaires.

Boeing (États-Unis)

<http://www.boeing.com/defense/>

CILAS (France)

<https://www.cilas.com/>

Coherent: Rofin-Sinar Technologies (États-Unis)

<https://www.rofin.com/>

IPG Photonics Corp. (États-Unis)

<http://www.ipgphotonics.com/>

Lockheed-Martin (États-Unis)

<http://www.lockheedmartin.com/us.html>

MBDA (Europe)

<http://www.mbda-systems.com/>

Northrop Grumman (États-Unis)

<http://www.northropgrumman.com/Pages/default.aspx>

Optonicus (États-Unis)

<http://www.optonicus.com/>

QinetiQ (Grande-Bretagne)

<https://www.qinetiq.com/Pages/default.aspx>

Rheinmetall (Allemagne)

<http://www.rheinmetall.com>

Thales Group (France)

<https://www.thalesgroup.com/fr>

Sociétés développant des diodes laser de forte puissance pour le pompage laser

Un composant essentiel pour fabriquer des lasers de forte puissance est la diode laser de pompe forte puissance. Voici une liste des principaux fournisseurs de ce type de lasers.

BWT Beijing (Chine)

<http://www.bwt-bj.com/en/index.html>

Coherent: Rofin-Sinar Technologies (États-Unis)

<https://www.rofin.com/>

Dilas: Coherent (Allemagne + États-Unis)

<http://www.dilas.com/>

IPG Photonics Corp. (États-Unis)

<http://www.ipgphotonics.com/>

Laserline (Allemagne)

<http://www.laserline.de/>

nLight Photonics (États-Unis)

<http://www.nlight.net/>

Oclaro (États-Unis)

<http://www.oclaro.com/>

Osram Opto-Semiconductors (Allemagne)

<http://www.osram-os.com>

Quantel (France)

<http://www.quantel.fr/fr/>

QPC Lasers (États-Unis)

<http://www.qpclasers.com/>

Laboratoires de recherche en France (liste non exhaustive)

CEA – Commissariat aux énergies alternatives : développement de lasers ultra intense pour le laser Mégajoule

Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique Graduate School : combinaison cohérente active de lasers à fibres femtoseconde, combinaison cohérente

passive de diodes laser

<https://www.lcf.institutoptique.fr/>

Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses, École Polytechnique : combinaison cohérente active de lasers à fibres femtoseconde

<https://portail.polytechnique.edu/luli/fr>

Onera : développement de lasers à fibres de puissance et combinaison cohérente active de lasers à fibres par marquage en fréquence, combinaison de lasers de fibres multi-cœurs et de convertisseurs de fréquence non linéaires

<http://www.onera.fr>

Thalès Research and Technology : combinaison cohérente passive de lasers à cascade quantique, combinaison cohérente active de lasers à fibres, et de lasers à fibres femtoseconde

<https://www.thalesgroup.com/fr/worldwide/global-innovation/recherche-technologie>

XLIM : axe de recherche photonique fibre et sources cohérentes, développement de lasers à fibres et combinaison cohérente passive de lasers à fibres

<http://www.xlim.fr/>

Laboratoires de recherche à l'étranger (liste non exhaustive)

Center for Ultrafast Optical Science, University of Michigan, Ann Arbor, États-Unis : développement de lasers à fibres et combinaison cohérente passive de lasers à fibres

<http://cuos.engin.umich.edu/>

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Chine : développement de lasers à fibres, combinaison cohérente passive de lasers à fibres, combinaison cohérente active de lasers à fibre. Ce laboratoire a testé à peu près toutes les techniques de combinaison de lasers et développe des lasers à fibres multi-kilowatts et les techniques pour les combiner.

http://www.nudt.edu.cn/index_eng.htm

Department of Electrical and Computer Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, États-Unis : combinaison cohérente passive de lasers

<http://ece.umn.edu/>

Hughes Research Laboratory, HRL Laboratories, États-Unis : développement de techniques de combinaison cohérente active de lasers à fibres pour les télécommunications optiques

http://www.hrl.com/laboratories/labs_main.html

Institute of Applied Physics, Friedrich-Schiller-University, Jena, Allemagne : développement de lasers à fibres femtoseconde très forte puissance crête, combinaison spectrale et combinaison cohérente de lasers à fibres femtoseconde

<http://www.iap.uni-jena.de/>

Intelligent Optics Laboratory, Université de Dayton (OH), États-Unis : développement de systèmes de combinaison cohérente de lasers à fibres par contrôle actif de la phase à base d'algorithme SPGD, étude de la compensation des turbulences atmosphériques par la combinaison cohérente à pupilles laser juxtaposées

<https://udayton.edu/>

Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory, Lexington, États-Unis : développement de lasers solides de puissance, combinaison spectrale de lasers, toutes techniques de combinaison cohérente de lasers à fibres et de diodes laser

<http://www.ll.mit.edu/>

National Ignition Facility, Lawrence Livermore National Laboratory, États-Unis : lasers solides de très forte puissance, combinaison de faisceaux laser issus de fibres multi-cœurs

<https://lasers.llnl.gov/science/photon-science>

Naval Research Laboratory, Washington DC, États-Unis : compensation de la propagation atmosphérique des lasers par combinaison

<https://www.nrl.navy.mil/>

TECHNIQUES DE COMBINAISON DE SOURCES LASER

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Chine : combinaison cohérente passive de lasers à fibres
<http://english.siom.cas.cn/>

Soreq Nuclear Research Center, Israël : développement de lasers à fibres et combinaison cohérente passive de lasers à fibres
<http://www.nti.org/learn/facilities/419/>

US Air Force Research Laboratory, Directed Energy Directorate, États-Unis : développement de lasers à fibres de puissance et combinaison cohérente active de lasers à fibres par marquage en fréquence, combinaison de lasers à fibres de puissance par composants optiques diffractifs
<http://www.kirtland.af.mil/Units/AFRL-Directed-Energy-Directorate>

US Army Research Laboratory, États-Unis : développement de systèmes de combinaison cohérente de lasers à fibres par contrôle actif de la phase à base d'algorithme SPGD, étude de la compensation des turbulences atmosphériques par la combinaison cohérente à pupilles laser juxtaposées
<https://www.arl.army.mil/www/default.cfm>

Weizmann Institute of Science, Israël : développement de lasers à fibres et combinaison cohérente passive de lasers à fibres
<https://www.weizmann.ac.il/pages/>

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre**, **leurs compléments et mises à jour**, et bénéficiez des **services inclus**.



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com