

UN LASER À L'ASSAUT DE LA STRATOSPHERE

S. CHAMPEAUX, L. BERGÉ, S. SKUPINE
CEA - DAM - Île-de-France

Les impulsions optiques femtosecondes ont la propriété de se propager sur de grandes distances dans l'atmosphère. Leur puissance élevée, se situant au-dessus du seuil critique d'auto-focalisation, induit une dynamique de compression spatiale sur le faisceau, qui est arrêtée par la génération d'un plasma de faible densité électronique. La structure optique résultant de cette dynamique est un filament de taille sub-millimétrique et d'intensité élevée. Parce qu'ils développent un spectre large, ces "filaments femtosecondes" sont utilisés pour identifier des polluants atmosphériques à distance. Pour des faisceaux larges ayant des puissances lasers élevées, de nombreux filaments peuvent se former au cours de la propagation de l'impulsion laser. Garantir une propagation de qualité requiert alors de contrôler cette filamentation multiple, de façon à assurer une cohésion maximale du faisceau sur des kilomètres. Durant l'année 2006, les physiciens du CEA - DAM ont obtenu deux résultats importants à ce sujet. Le premier concerne la propagation verticale d'impulsions femtosecondes dans l'air, induisant des variations de pression qui amoindrissent la filamentation multiple. Le deuxième démontre la propagation auto-guidée de faisceaux ultra-puissants (> 30 TW) jusque dans la stratosphère.



Les techniques d'amplification optique à dérive de fréquence permettent de délivrer des impulsions lasers de quelques dizaines de femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ sec}$) à des niveaux d'énergie approchant le joule. La puissance contenue dans ces impulsions est généralement supérieure au seuil d'auto-focalisation au-delà duquel un faisceau laser subit une compression spatiale induite par la réponse du milieu, appelée effet *Kerr*. Cette compression s'accompagne d'une croissance notable de l'intensité laser, qui est limitée par l'ionisation des molécules ambiantes. La structure résultant de cette dynamique est un guide d'onde de petit diamètre ($\sim 100 \mu\text{m}$ pour des impulsions infrarouges) et d'intensité élevée ($\sim 50 \text{ TW/cm}^2$), couplé à un canal plasma de faible densité électronique ($< 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). Ce "tube" de lumière, appelé "filament femtoseconde", est capable de parcourir de longues distances excédant la limite de diffraction naturelle du faisceau.

Le tube de lumière est capable de parcourir de grandes distances dans l'atmosphère

Pour une source laser opérant à 800 nm, un filament possède une puissance proche de 15 GW, soit environ 5 fois la puissance critique d'auto-focalisation dans l'air, P_{cr} . Pour des puissances supérieures au terawatt ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$), un faisceau contient plusieurs centaines de puissances critiques, et se casse en de nombreux filaments par instabilité modulationnelle. Nous parlons alors de "filamentation multiple". Un problème ouvert est de comprendre la dynamique de filamentation multiple lorsque le faisceau se propage dans un milieu de plus en plus raréfié, comme lors de sa traversée de l'atmosphère qui présente une décroissance régulière de pression.

Récemment, les chercheurs du CEA - DAM - Île-de-France ont permis d'élucider la propagation de filaments femtosecondes à différentes pressions [1]. Une collaboration entre ces mêmes chercheurs, ceux du CEA - Cesta, et les physiciens impliqués dans le projet Franco-Allemand TeraMobile a, par ailleurs, démontré que

des faisceaux lasers ultra-puissants (30 TW) étaient capables de se propager au-delà de 20 km, tout en continuant à émettre de la lumière blanche [2].

Filamentation multiple en atmosphère raréfiée

La filamentation d'impulsions ultracourtes dans l'air est décrite à partir de l'enveloppe lentement variable du champ laser, couplée à la densité d'électrons libres créés par ionisation. La réponse Kerr du milieu, les coefficients de dispersion, la densité d'espèces neutres, et le couplage plasma varient linéairement avec le paramètre de pression p . Dans le cas d'une propagation verticale, la densité de neutres et la pression décroissent exponentiellement avec l'altitude, caractérisée par une longueur d'atténuation d'environ 8 km. En diminuant la pression, la réponse Kerr du milieu s'amoin-drit, et la puissance critique d'auto-focalisation augmente.

Dans le cadre de la filamentation multiple, la distance d'apparition des filaments est dictée, selon la théorie de l'instabilité modulationnelle, par l'effet Kerr initial. En termes de puissance, cette distance évolue selon la loi d'échelle $z_{fil} \sim P_{cr} (p = 1 \text{ atm})/p.P_{in}$, où P_{in} désigne la puissance incidente de l'impulsion.

Les figures 1a et 1b montrent des coupes transverses d'une impulsion centimétrique de $800 P_{cr}$ sur un trajet horizontal, à une altitude de 3,3 km ($p = 0,7 \text{ atm}$). Le faisceau se casse en plusieurs filaments à $z_{fil} = 75 \text{ m}$ pour $p = 0,7 \text{ atm}$. La même figure de filamentation est produite à la distance $z_{fil} = 51 \text{ m}$ à pression atmosphérique (non montrée). La distance de filamentation est donc augmentée par un facteur $1/p$. Le nombre de filaments évoluant à plus grandes distances est aussi diminué dans un rapport de 30 %. Les figures 1c et 1d correspondent à un profil contenant $50 P_{cr}$, se propageant verticalement au-delà du kilomètre. De nouveau, nous observons une diminution en proportion du nombre de filaments, dont le diamètre s'accroît légèrement [1].

Une décroissance de la pression entraîne donc une augmentation notable de la distance d'apparition des filaments, et une réduction du nombre de filaments. Elle maintient l'enveloppe du faisceau confinée sur de plus grandes distances.

Un laser blanc ultra-puissant traverse la stratosphère

Alors que les faisceaux précédents ne contenaient que quelques centaines de puissances critiques,

une collaboration entre le CEA - DAM - Île-de-France, le CEA - Cesta, et les Universités de Lyon 1 et de Genève a permis de tester, pour la première fois, des impulsions ultracourtes transportant 32 TW de puissance optimale dans l'atmosphère. La source employée est celle de la ligne laser Alisé opérant à la longueur d'onde de 1 053 nm. Le faisceau peut contenir jusqu'à 5 000 puissances critiques. Il est émis verticalement dans l'atmosphère, en géométries parallèle ou focalisée. La lumière blanche rétro-diffusée est détectée à l'aide d'un télescope [2].

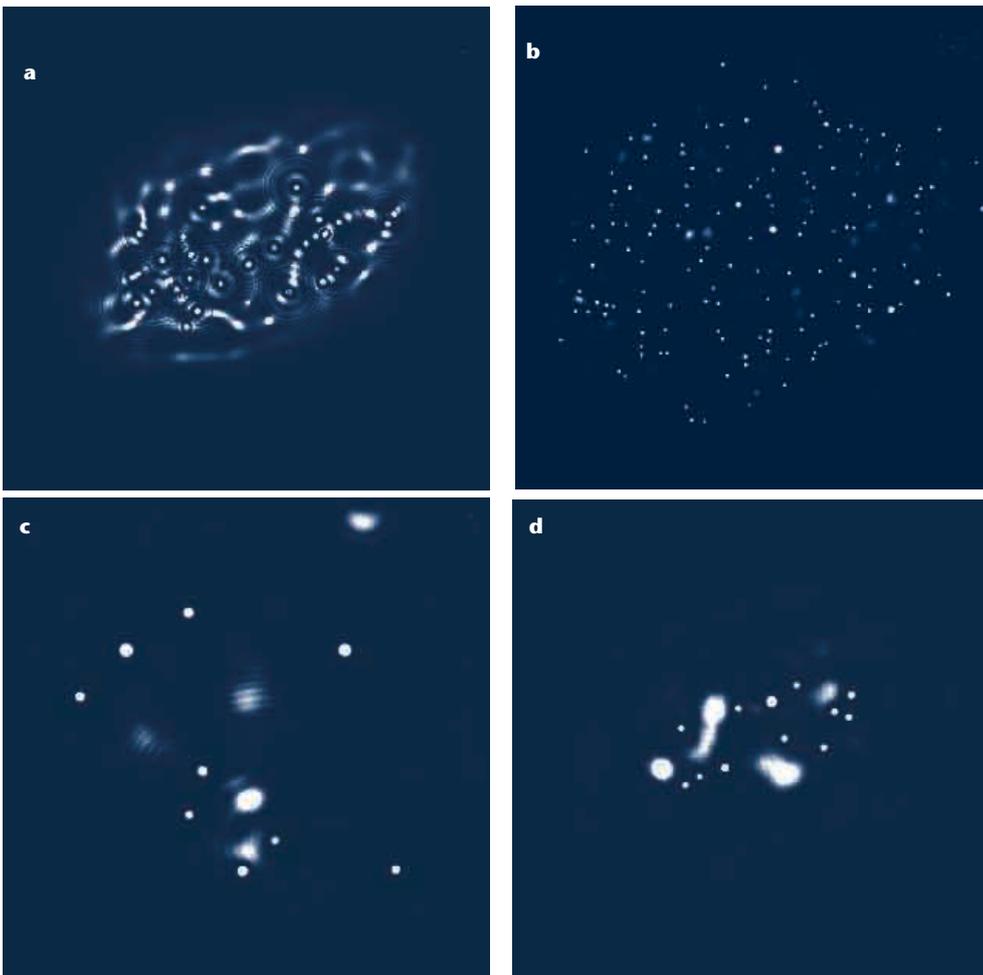


Figure 1
a et b montrent la filamentation multiple d'un faisceau TW ($P_{in} = 800 P_{cr}$) de 4 cm de rayon à la pression $p = 0,7 \text{ atm}$;
c et d montrent l'évolution de la tache filamenteuse d'un faisceau sub-TW ($P_{in} = 50 P_{cr}$) de 2,5 cm de rayon en propagation verticale.

Compte tenu de sa puissance élevée, le faisceau se casse en filaments multiples au bout de quelques mètres seulement. Cette fragmentation forme une structure en nid d'abeilles dans la tache focale du laser.

L'intensité de saturation des filaments est voisine de celle atteinte par des impulsions classiques (*sub-Joule*) à 800 nm, ce qui signale l'apparition d'un plasma d'électrons saturant l'auto-focalisation laser. La figure 2 montre quelques profils expérimentaux du faisceau Alisé pour diverses géométries de propagation. Le nombre de filaments peut dépasser 400, et les cellules filamenteuses deviennent indiscernables dans le cas d'une focalisation trop forte (figure 2b). Les figures 2d et 2e représentent les mêmes fluences dans le plan de diffraction transverse (x,y), simulées numériquement à partir d'un modèle de propagation 2D moyennant les variations temporelles de l'impulsion laser. Ce processus de filamentation multiple permet l'auto-guidage du faisceau sur de grandes distances. Les effets non-linéaires (*réponse Kerr, génération de plasma*) participent à l'élargissement du spectre initial. Celui-ci développe de la lumière blanche visible à plus de 20 km du sol, c'est-à-dire dans

la stratosphère. Il constitue le signal *Lidar* (*Light Detection and Ranging*) le plus puissant, le plus directif, et le plus lointain jamais émis. Ces résultats devraient améliorer dans le futur les performances des systèmes *Lidar* à impulsions ultra-courtes.

Ces résultats devraient améliorer les performances des systèmes Lidar à impulsions ultracourtes

Références

[1] S. CHAMPEAUX, L. BERGÉ, "Long-range multi-filamentation of femtosecond laser pulses versus air pressure", *Optics Letters*, **31**, p. 1301 (2006).
 [2] P. BÉJOT et al., "32 Terawatt light laser reaches the stratosphere", accepté à *Applied Physics Letters* (2007).

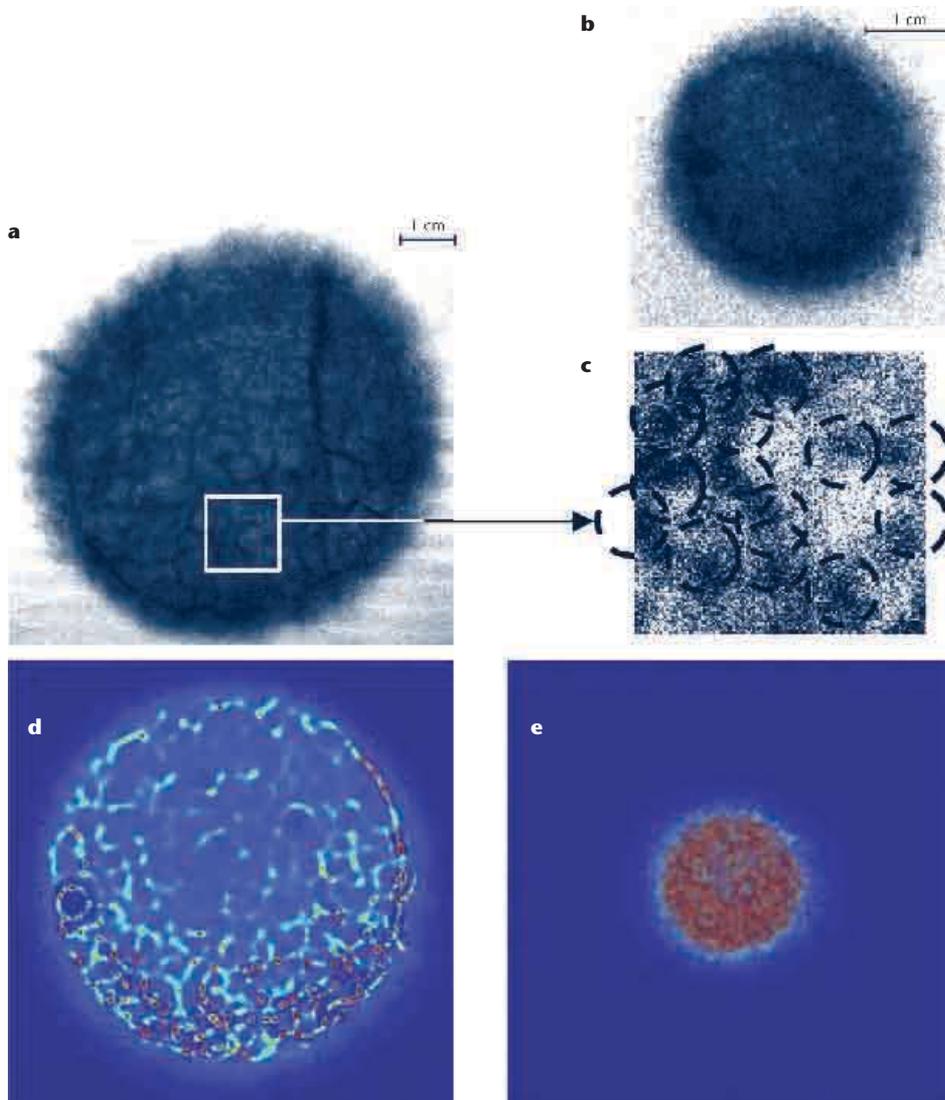


Figure 2
 Profils radiaux du faisceau de la ligne laser Alisé après 11 m de propagation.
a focale à 300 m ($2\,200 P_{cr}$, 290 filaments) ;
b focale à 16 m ($3\,180 P_{cr}$, aucun filament distinct) ;
c élargissement d'une zone filamenteuse ;
d, e figures de filamentation reproduites numériquement pour les mêmes paramètres lasers.