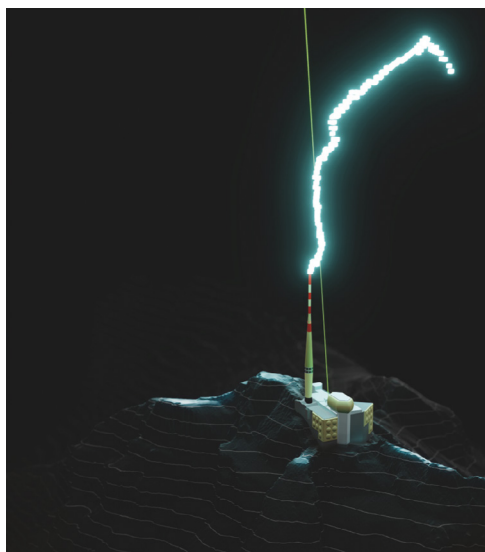


PROPAGATION D'IMPULSIONS LASER INTENSES DANS L'AIR



André MYSYROWICZ^{1,*}, Jean-Pierre WOLF²

¹ Institut polytechnique de Paris, Laboratoire d'optique appliquée, Palaiseau, France

² Université de Genève/Dept. De Physique Appliquée, Genève, Suisse

*Andre-Edmond.Mysyrowicz@ensta-paris.fr

La propagation d'impulsions laser intenses et très courtes dans l'air donne lieu à des effets spectaculaires. Nous décrivons dans cet article plusieurs expériences réalisées avec le laser teramobile et ses successeurs.

<https://doi.org/10.1051/photon/20412732>

La fin du siècle passé a vu se développer des lasers émettant des impulsions ultra-courtes, ayant une durée dt de quelques femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). La puissance lumineuse instantanée $P = E/dt$ peut alors devenir importante même si l'énergie E de chaque impulsion reste modeste. Par exemple, une impulsion émise par un laser Ti:Sapphire commercial fonctionnant à une longueur d'onde de 800 nm a typiquement une durée de 50 fs et une énergie de quelques dizaines de mJ, ce qui donne lieu à une puissance crête de l'ordre du térawatt ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). Avec de telles puissances, la propagation de ces impulsions laser dans l'air est complètement modifiée. Au lieu de diminuer au cours de la propagation, l'intensité lumineuse crête des impulsions s'accroît par rétrécissement de la taille du faisceau et reste ensuite élevée sur

des longueurs bien supérieures à la longueur de Rayleigh, comme si les effets de diffraction étaient supprimés [1] (voir encadré filamentation femtoseconde). Cet effet de filamentation a été d'abord vérifié en laboratoire sur quelques mètres. Il est vite apparu qu'il serait intéressant de sortir les lasers femtosecondes de leur laboratoire pour effectuer des expériences sur de plus grandes distances et sur des sites appropriés. Dans le cadre d'une coopération franco-allemande entre quatre équipes situées à Berlin, Jena, Lyon et Palaiseau, un projet soutenu par le CNRS et la DFG (« Teramobile ») a permis une première mondiale, l'utilisation d'un laser femtoseconde mobile de classe térawatt appelé teramobile construit par la société Thalès. Il émet à une cadence de 10 Hz dans le proche IR (800 nm) des impulsions ayant une durée de 70 fs et une énergie par impulsion de 350 mJ. Ce laser a été installé dans un conteneur facilitant

son transport. Quelques années plus tard, un laser de même performances mais dix fois plus léger a été construit par la société Amplitude. Tout récemment, un laser transportable Yb:Yag fonctionnant à une cadence de 1 kHz a été construit par la société Trumpf. Il émet des impulsions de 1 picoseconde (10^{-12} s) de durée à une longueur d'onde de 1.03 μm . L'énergie de chaque impulsion monte à plus de 500 mJ.

DESCRIPTION DE QUELQUES EXPÉRIENCES

Propagation à longue distance et effet LIDAR multi-bande

Dans une première expérience, le laser teramobile a été installé au voisinage d'un télescope situé au sommet d'une montagne en Allemagne, à Tautenburg. Les impulsions laser étaient dirigées vers le ciel. La première figure montre une image de leur propagation observée à l'aide du télescope. On voit que le faisceau

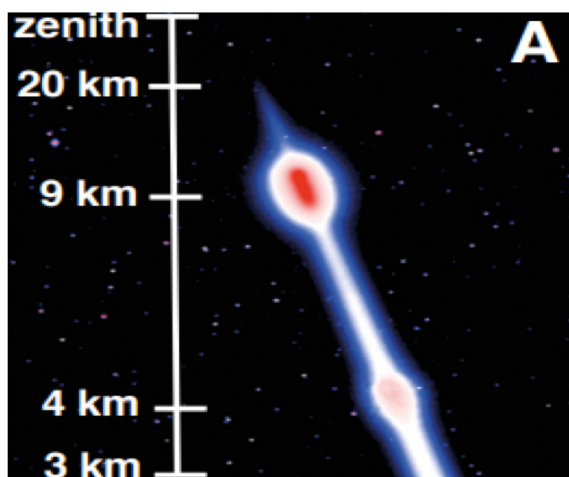
laser se maintient par filamentation sur des distances atteignant 20 km et traverse même deux couches nuageuses fines situées à 5 et 9 km [1]. Des expériences ultérieures en propagation horizontale ont confirmé ces résultats en montrant qu'une ionisation de l'air pouvait se faire sur des colonnes de plus de 100 m de longueur à 1 km du laser.

Au cours de sa propagation dans l'air en régime filamentaire, l'impulsion laser voit son spectre s'élargir et couvrir toute la partie visible du spectre (voir encadré filamentation). Cette lumière blanche rétrodiffusée à partir d'une altitude de 4.5 km a été recueillie par le télescope et son spectre a été analysé. Une multitude de raies a été observée, correspondant principalement à des transitions dans les molécules d'oxygène et de vapeur d'eau, ce qui permet de mesurer à distance la température et la pression de l'air. Le même système a été utilisé pour analyser par LIDAR (Light Detection and Ranging) la présence de polluants atmosphériques [2].

Transfert de puissance électrique dans l'air

La colonne d'air ionisée lors de la filamentation permet de déclencher et de guider des décharges électriques entre deux électrodes chargées. La figure 2 illustre cet effet. Il est instructif de comprendre comment est obtenue cette décharge électrique guidée et le mécanisme qui abaisse son seuil de déclenchement. Lors de l'ionisation de l'air, le laser dépose rapidement de l'énergie ce qui entraîne un réchauffement très rapide de la colonne d'air de 100 μm d'épaisseur créée par filamentation. La géométrie particulière du filament (longue et fine colonne) provoque une évacuation radiale des molécules à des vitesses supersoniques. Une zone de sous-densité centrale est alors formée ●●●

Figure 1. Photo de la propagation d'une impulsion laser dans le ciel prise à travers le télescope de Tautenburg. On remarque la diffusion par deux couches nuageuses situées à 5 et 9 km de hauteur.



OPTIQUES FABRIQUÉES

pour les sciences de la vie
et les dispositifs médicaux



Filtres optiques, lentilles sphériques et asphériques, séparateurs de faisceaux, et bien plus encore : des composants de précision en optique et imagerie fabriqués par Edmund Optics® pour les applications industrielles, medtech et autres.

- **Solutions de fabrication & de traitement personnalisées :** réalisation d'après dessin, conception sur mesure ou modification de pièces en fonction de vos besoins
- **Métrie** et contrôle des processus de pointe
- **Service d'ingénierie** et de consultation de premier ordre, du prototypage à la production à l'échelle

Pour en savoir plus:

[www.edmundoptics.fr/
manufacturing](http://www.edmundoptics.fr/manufacturing)



+33 (0) 820 207 555
sales@edmundoptics.eu

EO **Edmund**
optics | worldwide

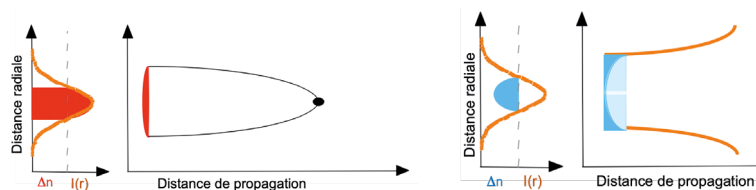
durant plusieurs millisecondes. Cette colonne sous-dense abaisse le seuil de déclenchement de décharges électriques car elle augmente la mobilité des électrons (effet Paschen) et offre

ainsi un parcours privilégié pour une décharge électrique rectiligne. Afin de mesurer quelle puissance électrique on est capable de commuter entre deux électrodes, le laser teramobile

a été installé au centre d'essais des TGV à Ivry sur Seine. Il a été possible de commuter avec peu de pertes et sans contact mécanique des puissances électriques considérables de l'ordre du MW qui correspondent à l'alimentation des TGV [1]. Ceci peut être intéressant pour la conception de trains rapides dans le futur, sachant que leur vitesse devient fortement limitée à grande vitesse par la friction mécanique entre pantographe et ligne à haute tension.

FILAMENTATION LASER FEMTOSECONDE

L'indice de réfraction n_0 d'un milieu transparent est modifié en présence d'une forte intensité lumineuse $I(r,t)$ et s'exprime en première approximation et loin de toute résonance sous la forme $n(r,t) = n_0 + n_2 I(r,t)$. Un faisceau laser ayant un profil radial avec une intensité maximale sur l'axe auto-induit un effet de lentille car le front d'onde s'incurve, comme le montre la figure. Si la puissance du laser dépasse une valeur critique P_{cr} ($P_{cr} = 3.2$ GW dans l'air pour un laser à 800 nm), cet effet de lentille, qui est cumulatif avec la propagation, surpasse l'effet de diffraction qui tend à augmenter la taille du faisceau. Ceci a pour conséquence un effondrement du faisceau sur lui-même au cours de sa progression dans l'air. Cependant, l'effondrement du faisceau est arrêté lorsque l'intensité locale devient telle qu'elle provoque l'ionisation de l'air par ionisation multiphotonique des molécules d'azote et d'oxygène. Le plasma ainsi formé tend à diminuer l'indice du milieu et agit comme une lentille divergente. Il s'en suit une compétition dynamique entre l'auto focalisation par effet Kerr optique et la défocalisation liée à la présence du plasma. Avec une courte durée d'impulsion lumineuse, la densité du plasma créé reste faible par rapport à la densité critique du plasma, ce qui empêche l'effondrement total de l'impulsion, phénomène observé avec des impulsions plus longues. Il s'en suit la formation d'une étroite colonne où l'intensité se maintient à une valeur proche de 10^{14} W/cm² sur des distances considérables, bien supérieures à la distance de Rayleigh, comme si les effets de diffraction étaient annulés. Cette fine colonne lumineuse intense, d'une épaisseur de 100 μ m, est entourée d'un bain de photons qui l'aide à se maintenir en suppléant aux pertes dues à l'ionisation. Il n'existe pas de solutions analytiques pour décrire ce phénomène de filamentation, cela nécessite des simulations complexes, particulièrement en régime de dispersion normal [1]. Un autre effet lié à la filamentation femtoseconde est la création d'une source blanche ultra-brève par élargissement du spectre de l'impulsion. L'augmentation de l'indice de réfraction du milieu au sommet de l'impulsion est plus importante que sur ses bords, ce qui ralentit sa vitesse de propagation par rapport au reste de l'impulsion et entraîne un raidissement de son front arrière. Une variation temporelle rapide de l'indice correspond à un changement rapide de la phase de l'onde et à la création instantanée de nouvelles fréquences optiques. Ces nouvelles fréquences ajoutées sont de plus basses fréquences lorsque l'impulsion augmente en intensité et de plus hautes fréquences lors de sa diminution. Cela entraîne donc un élargissement spectral plus important aux courtes longueurs d'onde à cause du raidissement du front arrière de l'impulsion. Une source blanche de lumière ultra-brève couvrant tout le spectre visible est ainsi créée lors de la propagation du filament à partir d'un laser infrarouge [1].



I Auto focalisation (a) et défocalisation (b) : schéma de principe

Amélioration de vol supersonique (diminution de la traînée par filamentation)

On sait qu'un objet se déplaçant dans l'air à une vitesse approchant ou dépassant celle du son voit une augmentation considérable de la résistance à la poussée. Une expérience a été menée pour diminuer cette traînée en exploitant les propriétés de la filamentation. Les impulsions laser sortaient du nez d'une maquette formant des filaments à l'avant de cette maquette, ce qui provoquait une réduction de la densité de l'air le long de l'axe du laser. La maquette était placée dans une soufflerie où l'air avait une vitesse Mach 3. Par convection, la dépression venait s'appliquer sur le nez de la maquette où elle formait une bulle de dépression qui perturbait la couche de contact entre l'air et l'ensemble de la maquette. Une réduction de la traînée estimée à plus de 40% par tir laser pendant plusieurs dizaines de microsecondes a été mesurée avec un laser opérant à une cadence de 10 Hz [3]. Des expériences récentes à 1 kHz avec le laser Trumpf montrent que cet effet évolue bien avec la cadence du laser. Ceci laisse à penser qu'une réduction significative de la poussée moyenne exercée sur un engin pourrait être obtenue avec un laser opérant à une cadence de 10 kHz ou plus.

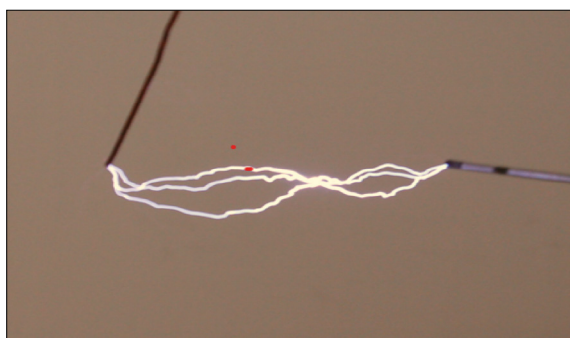
Guidage de la foudre

On a vu que les puissances électriques commutées dans l'air sont importantes et que d'autre part l'ionisation de l'air peut être obtenue

sur plusieurs dizaines de mètres. Il devient alors naturel d'envisager de déclencher et de guider la foudre par filamentation. Une expérience franco-suisse de guidage de la foudre a été effectuée récemment en Suisse. Le laser Trumpf a été installé au sommet du mont Saentis, dans les préalpes appenzelloises. Ce site est équipé d'une tour servant d'antenne de télécommunications de 110 m de hauteur qui est régulièrement foudroyée. Ce site a été instrumenté et utilisé depuis une dizaine d'années par l'EPFL pour observer et mieux comprendre les mécanismes de formation de la foudre. À l'été 2021, dans le cadre du projet européen « laser lightning rod (llr-fet.eu) », la première démonstration du guidage de la foudre par un laser a pu être réalisée [4].

En effet, comme en témoignent les images simultanées de 2 caméras ultrarapides installées sur des montagnes voisines (figure 3), les filaments produits par le laser ont permis de guider des décharges de foudre sur plus de 50 mètres. Ces observations ont été confirmées par d'autres équipements d'observation, comme celles avec un interféromètre radiofréquence. Cette première démonstration en vraie grandeur du contrôle de la foudre par laser ouvre la porte à des applications importantes pour la protection d'infrastructures sensibles de grandes dimensions, comme des centrales électriques ou des aéroports, ce que ne permet pas l'utilisation classique de paratonnerre métalliques (la hauteur du paratonnerre doit être comparable à la dimension de la zone à protéger au sol).

Figure 2. Décharges électriques spontanées et guidées par un filament.



Optical models for material appearance

By
Mathieu Hébert



This book is an introduction to the fundamental notions of optics which allows to understand the radiometric quantities measured with common devices, to learn how to analyze them, and to review some classical optics-based predictive models for various types of materials and structures.

Also available in e-book format

**For sale on
laboutique.edpsciences.fr**

**ISBN : 978-2-7598-2647-6
242 illustrated pages
Price : 95 €**



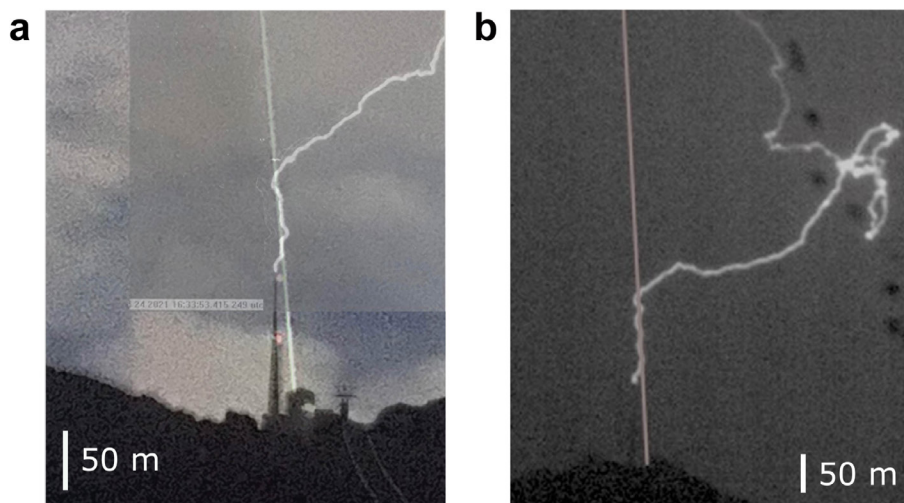


Figure 3. Photo de la foudre guidée par laser prise à une distance de 1.4km (A) et de 5 km (B)

PERSPECTIVES

Guides d'onde optique dans l'air

Il est possible d'exploiter les propriétés des filaments femtosecondes pour créer dans l'air à distance un guide optique transitoire. Plusieurs filaments répartis sur un cercle provoquent un faisceau d'ondes radiales de surpression dont une partie converge vers le centre du cercle, ce qui entraîne (avec retard) une augmentation de sa densité. Cette augmentation centrale de densité remplit les conditions d'un guide d'onde lumineuse transitoire durant plusieurs ms, qui permet de guider une autre impulsion laser plus longue. Il a été ainsi démontré, notamment avec le laser Trumpf que l'émission d'un autre laser pouvait être guidée sur plusieurs dizaines de mètres avec un très bon taux de transmission. La réalisation de tels guides d'ondes optiques ouvre la perspective d'une imagerie optique à distance dans le ciel.

Communications optiques espace libre

Les communications optiques en espace libre, par exemple entre la terre et un satellite, offrent des taux de transfert d'informations entre 100 et 1000 fois plus élevés que les habituelles radiofréquences. Elles ont aussi la réputation d'être plus sûres, car plus directives et mieux cryptées. Cependant, un inconvénient majeur

qui limite actuellement leur déploiement est la présence de brouillard ou de nuages, qui interrompent le transfert. Récemment, il a été montré que l'onde de surpression d'air mentionnée ci-dessus permettait aussi de déplacer les gouttes d'eau présentes dans l'atmosphère, et donc de créer un canal de communication au travers d'un nuage. Si le taux de répétition est supérieur à quelques centaines d'impulsions par seconde, le « trou » dans le nuage est conservé de manière permanente. Il peut alors servir comme canal de transmission pour des lasers télécom. La démonstration en a été faite à l'échelle du laboratoire [5], et des travaux sont en cours pour étendre ces capacités à des situations réelles.

Sources secondaires (ondes THz)

Lors de sa propagation, une impulsion filamentaire est la source d'une large gamme d'émissions secondaires allant

de l'UV jusqu'aux basses fréquences radio. Un aspect particulièrement intéressant est l'émission vers l'avant d'ondes térahertz (longueur d'onde entre 0.01 et 3 mm). Ces ondes offrent des applications intéressantes, notamment pour l'identification de molécules complexes et pour la sécurité car elle permet de 'voir' à travers des parois non conductrices. Cependant, ces ondes se propagent très mal dans l'atmosphère car elles sont fortement atténuées en présence de vapeur d'eau. On a vu qu'il est possible de créer des filaments, sources d'onde THz, à des distances kilométriques, évitant ainsi leur atténuation lors de l'illumination de cibles lointaines. Le rendement de conversion est faible ($\sim 10^{-9}$). Cependant, il a été démontré qu'il est possible de créer un grand nombre N de filaments (avec $N \sim P/P_{cr}$) et de les organiser, en jouant sur la phase ou l'amplitude radiale d'un faisceau laser, selon des structures bien définies telles que des réseaux [1]. Il a été démontré d'autre part que ces ondes THz peuvent interférer entre elles. On peut alors imaginer créer à distance avec un laser femtoseconde de puissance petawatt ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) un réseau de mille filaments. L'intensité devrait alors croître par interférence comme N^2 et la direction de l'émission THz être dirigée, à l'instar des radars à commande de phase, en jouant sur les retards entre les filaments. ●

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement Aurélien Houard et Jérôme Kasparian pour leurs contributions aux travaux décrits dans cet article.

RÉFÉRENCES

- [1] A. Couairon *et al.*, *Physics Reports* **441**, 47 (2007)
- [2] J. Kasparian *et al.*, *Science*, **301**, 1 (2003)
- [3] P. Q. Elias *et al.*, *Science Advances* **4**, 11 (2018)
- [4] A. Houard *et al.*, *Nature Photonics* **17**, 231 (2023)
- [5] G. Schimmel *et al.*, *Optica* **5**, 1338 (2018)