

Les lasers femtoseconde : applications atmosphériques

par Jérôme KASPARIAN

La propagation des lasers ultrabrefs et de forte puissance dans l'air est non linéaire, ce qui génère un large spectre et ionise l'air traversé. Ces propriétés exceptionnelles sont à la base d'applications potentielles pour la télédétection de polluants et le contrôle de la foudre.

Jérôme KASPARIAN est coordinateur du projet franco-allemand TéraMobile. Chargé de recherche au CNRS, il travaille au laboratoire de spectrométrie ionique et moléculaire (LASIM, UMR 5579, CNRS/université Claude-Bernard Lyon-I).

1. Contexte

La caractérisation à distance de l'atmosphère est nécessaire pour déterminer sa composition chimique et pour étudier les processus dynamiques comme le réchauffement global, le trou d'ozone, la pollution urbaine ou pour les prévisions météorologiques. Une première approche consiste à effectuer des mesures locales, par exemple avec un spectromètre de masse embarqué dans un ballon-sonde ou un avion [1]. Ce type de méthode peut fournir des données très variées, mais il est trop coûteux pour des mesures régulières, pourtant nécessaires pour alimenter des bases de données à long terme. La deuxième approche consiste à utiliser la spectroscopie optique pour sonder l'atmosphère sur un long trajet optique. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR : *Fourier transform infrared spectroscopy*) ou la spectroscopie optique d'absorption différentielle (DOAS : *differential optical absorption spectroscopy*) fournissent des données précises sur l'abondance de vastes groupes de constituants atmosphériques, en utilisant l'absorption de la lumière du Soleil ou de la Lune sur son chemin à travers l'atmosphère [1]. Mais ce chemin est fixé par la position de la source lumineuse utilisée. Au contraire, le lidar (*light detection and ranging*, un analogue optique du radar) utilise la rétrodiffusion par l'air de la lumière émise par un laser impulsif [1]. Le rayon laser pouvant être orienté, il n'a pas un chemin prédéterminé, ce qui lui permet de fournir des cartes tridimensionnelles de concentration de gaz traces atmosphériques (NO, NO₂, SO₂, benzène, toluène, ozone...) ou d'aérosols (comme les suies issues de combustion ou du trafic automobile, ou les nuages stratosphériques polaires impliqués dans la destruction de la couche d'ozone).

Cependant, le lidar est généralement limité à la mesure d'une espèce à la fois.

Exemple : le lidar à absorption différentielle (DIAL) utilise deux lasers pour détecter un polluant gazeux. L'un d'eux émet une longueur d'onde absorbée par l'espèce à mesurer, tandis que l'autre est réglé sur une longueur d'onde voisine, mais non absorbée par l'espèce considérée. La différence dans la décroissance du signal à ces deux longueurs d'onde est directement liée à la concentration du polluant recherché.

La technique de mesure idéale combinerait le large spectre du DOAS et du FTIR, avec la résolution spatiale du lidar. Elle permettrait par ailleurs une mesure à distance des aérosols, naturels ou artificiels, sans l'apport d'informations extérieures, contrairement aux techniques actuelles.

Afin de mettre au point ce système idéal, L. Wöste et R. Sauerbrey [2] [3] ont eu l'idée de produire à distance une « lampe blanche » en générant un plasma, grâce à un laser femtoseconde focalisé dans l'atmosphère. En effet, des progrès récents dans le domaine des lasers ultrabrefs ont montré que des impulsions laser de forte puissance peuvent créer des régions de très forte intensité sur de grandes distances. Afin d'atteindre la puissance nécessaire à la distance voulue, ils ont émis des impulsions laser de 100 fs, avec une puissance de 3 TW, légèrement focalisées dans l'atmosphère et avec un *chirp* négatif, c'est-à-dire que les longueurs d'onde les plus courtes précèdent les longueurs d'onde les plus longues à l'intérieur l'enveloppe de l'impulsion. Au lieu d'un plasma localisé au foyer, ils ont observé un long filament de lumière blanche (figure 1), similaire à des observations à plus courte échelle au laboratoire. Le faisceau était clairement visible à l'œil nu [2] [3] bien que le laser utilisé émette dans l'infrarouge, autour de 800 nm. Ce filament de lumière blanche était visible même lorsque le laser n'était pas focalisé. Son spectre s'étend de l'ultraviolet (UV) à l'infrarouge (IR) et son signal a pu être détecté depuis des altitudes dépassant 10 km.

Ce nouveau mode de propagation non linéaire et ses perspectives d'applications à la télédétection atmosphérique ont fondé les motivations pour le

Sur la détection atmosphérique :

Lidar de détection de pollution [E 4 315] de J. Cornillault

Détection de gaz par imagerie infrarouge [IN 4] de P. Bernascolle

Microsources IR pour la mesure de gaz. Application à l'automobile [RE 7] de E. Hadji et E. Picard

Spectroscopie dans l'infrarouge [P 2 845] de M. Dalibart et L. Servant

Spectrométries des rayonnements électromagnétiques. Techniques laser en analyse et caractérisation [P 2 685] de P. Mauchien et T. Berthoud

1 fs = 10⁻¹⁵ s



Figure 1 – Filament de lumière blanche généré dans l'atmosphère par un laser infrarouge ultrabref (photo K. Wedekind/Téramobile)

projet *Téramobile*. Ce projet franco-allemand, cofinancé par le CNRS et son homologue, la DFG, vise à démontrer la faisabilité d'un lidar multicomposant basé sur des impulsions laser ultrabrèves, pour la mesure tant de polluants gazeux que d'aérosols atmosphériques. Les filaments étant par ailleurs conducteurs électriques, nous nous intéressons également à leur application pour mettre au point un paratonnerre laser.

2. Propagation d'impulsions femtoseconde dans l'air

La propagation d'impulsions laser de puissance élevée dans les milieux transparents est fortement non linéaire, se traduisant en particulier par la formation de filaments autoguidés. Le point de départ de ce processus est l'**autofocalisation par effet Kerr**. En effet, à haute puissance, l'indice de réfraction de l'air dépend de l'intensité laser incidente :

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

avec $n_2 = 3 \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{W}$ dans l'air.

Le profil d'intensité dans le faisceau étant généralement gaussien, l'effet Kerr génère un profil d'indice qui se comporte comme une lentille convergente. Lorsque la puissance du faisceau atteint ou dépasse une puissance dite **puissance critique** :

$$P_{\text{crit}} = (1,22 \lambda)^2 / 12,8 n_2$$

soit quelques gigawatts dans l'air, la lentille de Kerr compense la diffraction et l'énergie du faisceau se concentre sur son axe. Cette forte focalisation d'un faisceau de grande puissance conduit à une haute intensité locale et donc à une ionisation de l'air, la densité d'électrons libres pouvant atteindre 10^{15} à 10^{17} cm^{-3} . Ce plasma d'électrons libres contribue négativement à l'indice de réfraction. Il forme ainsi une lentille divergente qui compense la lentille convergente de Kerr. Un équilibre dynamique en résulte, qui guide la lumière sur des distances pouvant dépasser le kilomètre, soit plusieurs ordres de grandeur au-delà de la distance de Rayleigh, à l'issue

de laquelle la diffraction élargit un faisceau se propageant linéairement. La haute intensité dans les filaments ($4 \cdot 10^{13}$ à $6 \cdot 10^{13} \text{ W/cm}^2$) génère une importante automodulation de phase, et donc l'émission d'un large continuum de lumière blanche s'étendant de 230 nm à 4,5 μm . Cette émission cohérente de lumière blanche est émise essentiellement vers l'avant, mais une part significative en est également émise vers l'arrière, ce qui est particulièrement favorable au lidar.

3. Contrôle de la filamentation

L'utilisation d'effets optiques non linéaires, tels que la génération de lumière blanche, la production d'harmoniques ou l'ionisation multiphotonique pour l'analyse atmosphérique, nécessite de transporter à grande distance des intensités laser élevées. Or, la propagation linéaire est limitée par la diffraction. Elle permet de focaliser un faisceau à une distance maximale de quelques centaines de mètres, mais au prix d'optiques de focalisation complexes, par exemple un grand télescope équipé d'une optique adaptative. Grâce à la filamentation, qui compense la diffraction sur de longues distances, les impulsions ultrabrèves assurent leur propre focalisation à une distance choisie par l'utilisateur.

Cependant, pour utiliser la filamentation, il est nécessaire de contrôler la dispersion de la vitesse de groupe (DVG, voir encadré) pour réaliser une « focalisation temporelle » de l'impulsion. À condition d'accorder les focalisations spatiale et temporelle, on peut ainsi contrôler le lieu où vont se produire les phénomènes non linéaires.

Dispersion de vitesse de groupe

L'indice de réfraction d'un milieu donné dépend de la longueur d'onde : c'est la dispersion de la vitesse de groupe, ou dispersion chromatique. Elle est responsable, entre autres, des aberrations chromatiques dans les appareils d'optique, mais aussi de la séparation des couleurs dans l'arc-en-ciel. Dans l'air, les longueurs d'onde les plus longues (« rouges ») se propagent plus rapidement que les plus courtes (« bleues »). Comme une impulsion laser ultrabrève de 100 fs a une largeur spectrale intrinsèque d'environ 10 nm, cet effet ne peut pas être totalement négligé (figure 2a). Après 1 km de propagation dans l'air, cette impulsion a acquis une durée de 1 ps, soit dix fois plus qu'à la sortie du laser. Conséquemment, la puissance a chuté d'un facteur 10. Cependant, la DVG peut être compensée et tournée à notre avantage. En effet, en réglant convenablement le laser, il est possible d'émettre les longueurs d'onde « rouges » sur l'arrière de l'impulsion laser, et les « bleues » sur l'avant : on parle alors de « *chirp* négatif ». Cette impulsion « étirée » sera progressivement recombinaisonnée au cours de sa propagation dans l'air (figure 2b). À une distance donnée, dépendant de la valeur de son *chirp* initial, on retrouve l'impulsion ultrabrève et sa puissance nominale. On peut ainsi parler de « focalisation temporelle ».

Téramobile :

http://www.teramobile.org

DFG : Deutsche Forschungsgemeinschaft

L'intensité lumineuse (W/m^2), ou éclairage, désigne le flux (puissance transportée par l'onde) par unité de surface.

L'indice de réfraction total n est exprimé en fonction de I . n_0 est l'indice de réfraction linéaire de l'air ; n_2 est appelé indice non linéaire de l'air et est homogène à l'inverse de l'intensité lumineuse.

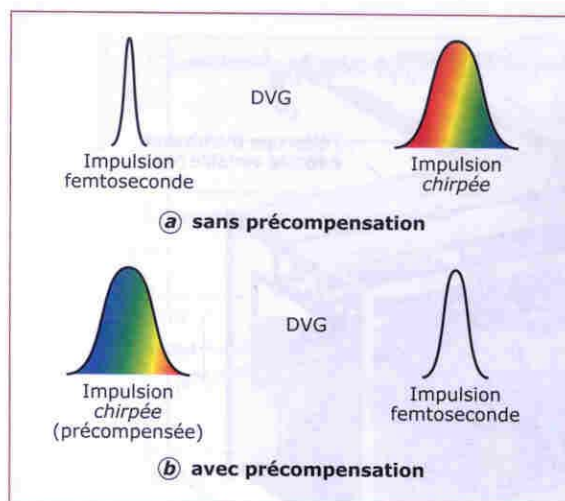


Figure 2 – Dispersion de vitesse de groupe et compensation

Nous avons récemment démontré cet effet lors d'une campagne de mesures effectuée avec le laser *Téramobile* [4] sur le site de l'observatoire de Tautenburg (Thüringer Landessternwarte), dans le sud de l'Allemagne. Le faisceau du laser *Téramobile* était émis verticalement et la lumière rétrodiffusée était imagée par un télescope de 2 m placé à 30 m du laser. La figure 3 montre des exemples d'images obtenues par ce dispositif. Celles de la figure 3a ont été enregistrées dans la bande de longueurs d'onde correspondant à la fondamentale du laser (800 nm). On y voit le faisceau, diffusé par l'air lors de sa propagation, ainsi qu'un halo dû à la diffusion multiple sur une légère couche d'aérosols, à une altitude de 9 km. Sur certaines images avec un ciel dégagé, le faisceau lui-même est visible jusqu'à une altitude de 25 km, où la densité d'air devient insuffisante pour diffuser la lumière. Les deux images correspondent à des impulsions laser de même énergie (300 mJ) et de même durée (600 fs), mais avec des *chirps* opposés. Alors que la colonne de droite correspond à une précompensation de la DVG, celle de gauche correspond à une anticomensation de cette même DVG. Comme la longueur d'onde fondamentale est observée par un processus linéaire (diffusion Rayleigh), seule l'énergie de l'impulsion entre en ligne de compte et les deux images sont comparables.

Il n'en est pas de même lorsque l'on équipe la caméra d'un filtre (bleu-vert) ne laissant passer que les longueurs d'onde de 400 à 500 nm. On mesure alors le continuum de lumière blanche (figure 3b) qui dépend fortement de l'intensité délivrée au lieu de génération. Dans des conditions favorables (précompensation de la DVG, à droite), du signal peut être reçu d'altitudes jusqu'à 18 km. Il est au contraire négligeable lorsque la DVG est anticomensurée, interdisant à l'impulsion de reprendre sa courte durée.

Ainsi, pour une même énergie émise par impulsion et une même durée initiale des impulsions, la compensation de la DVG est cruciale pour contrôler l'efficacité d'un processus non linéaire tel que la génération de lumière blanche. Durant la même campagne de mesures, nous avons également montré

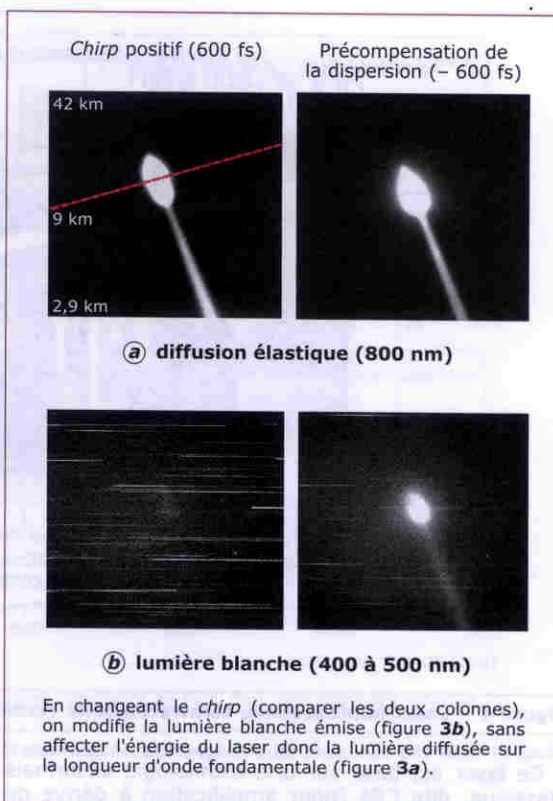


Figure 3 – Contrôle de la génération de lumière blanche : images du faisceau laser dans l'air (d'après [4])

qu'il est possible de faire varier l'altitude des filaments jusqu'à 2 km, en jouant sur la précompensation de la DVG. En réglant de manière adéquate le *chirp* et l'orientation du faisceau laser, il est donc possible à l'expérimentateur de positionner en trois dimensions le point de mesure où les effets non linéaires vont se produire.

4. Le laser femtoseconde mobile *Téramobile*

Développer des applications dans l'atmosphère nécessite de réaliser des expériences de terrain sur des sites adaptés aux mesures, comme des sites urbains ou industriels dans le cas de la télédétection de pollution par lidar. De même, la caractérisation à longue distance de la propagation d'impulsions laser ultrabrèves impose de travailler en extérieur. Un lidar basé sur des effets optiques non linéaires nécessite donc de disposer d'un laser femtoseconde-térawatt apte à des expériences de terrain. Or, ce type de laser nécessite des conditions de propreté et de stabilité mécanique, thermique et hygrométrique réservées au laboratoire. Par ailleurs, leur encombrement est généralement incompatible avec un transport par quelque moyen que ce soit. Nous avons donc développé le premier laser femtoseconde-terawatt mobile, *Téramobile* [5].

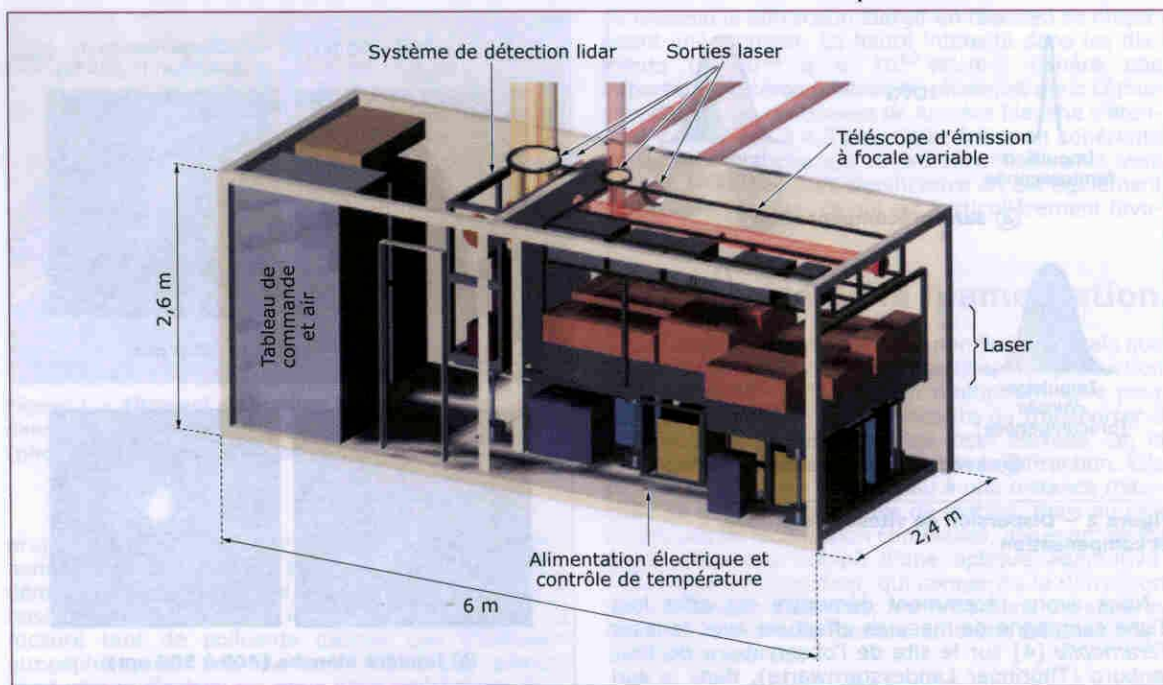


Figure 4 – Laser femtoseconde-terawatt mobile *TeraMobile* (d'après [5])

Ce laser est basé sur une technologie désormais classique, dite CPA (pour amplification à dérive de fréquence ou *chirped pulse amplification*). Dans cette technologie, les impulsions laser sont étirées temporellement avant d'être envoyées dans les milieux amplificateurs, afin d'éviter d'endommager ces derniers. Mais le *TeraMobile* se distingue par une conception particulièrement compacte (3,5 m × 2,2 m) qui a permis son intégration dans un conteneur maritime standard de 20 pieds, offrant une surface intérieure utile de 10 m² environ pour un encombrement extérieur de 6 m × 2,4 m × 2,6 m (figure 4). Il fournit des impulsions de 350 mJ en 70 fs, soit une puissance crête de 5 TW, à une longueur d'onde de 800 nm et à un taux de répétition de 10 Hz. De plus, le compresseur a été amélioré pour en faire un générateur de *chirp* afin de précompenser la DVG de l'air. La combinaison de cette possibilité avec la focale variable du télescope d'émission permet de contrôler la distance à laquelle les filaments sont formés, ainsi que leur longueur. Outre le laser et sa suspension mécanique, le conteneur contient un laboratoire d'optique complet, y compris le conditionnement d'air, les alimentations électriques et un système de détection lidar. Ce dernier est basé sur un télescope de Newton de 40 cm associé à un spectromètre de haute résolution. Ce spectromètre possède trois réseaux et un ensemble de détecteurs permettant des mesures sur une large plage spectrale, de 190 nm à 2,5 µm.

5. Lidar

Comme le montre la figure 5, la technique lidar consiste à émettre dans l'atmosphère des impulsions laser. Dans le cas du lidar non linéaire, ces impulsions

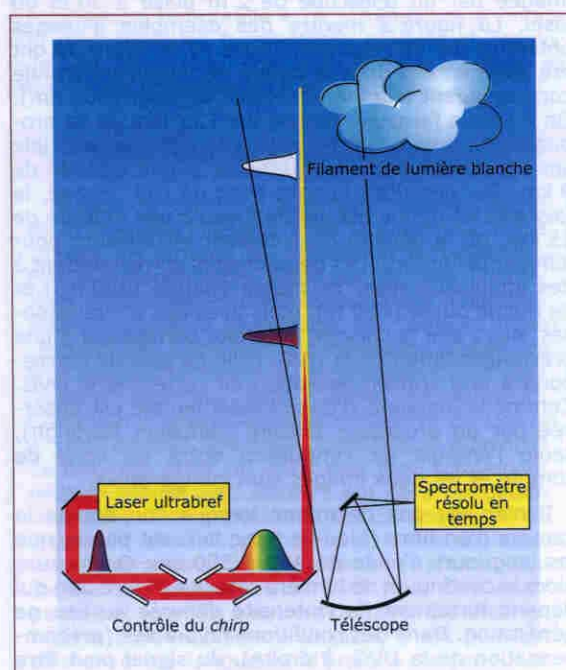


Figure 5 – Principe du lidar non linéaire (d'après [4])

laser sont préformées avec un *chirp* adéquat pour compenser la DVG dans l'air. La lumière émise sera partiellement diffusée (diffusion Rayleigh par les molécules, diffusion Mie par les aérosols) et partiellement convertie dans le continuum de lumière blanche, dont une fraction est réémise vers l'arrière. La lumière rétrodiffusée est collectée par un télescope

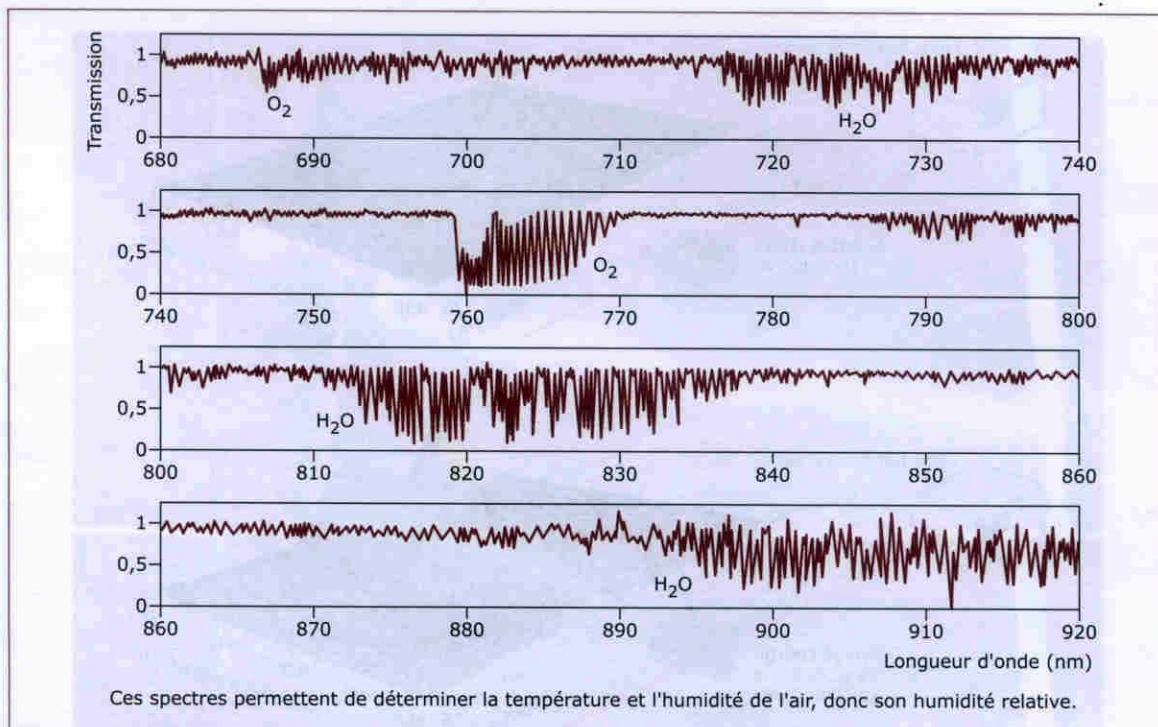


Figure 6 – Spectres large bande à haute résolution de la transmission atmosphérique mesurée par lidar (d'après [4])

équipé d'un spectromètre et d'un détecteur résolu en temps. Connaissant la vitesse de la lumière, donc son temps de vol jusqu'à une distance donnée, cette résolution en temps fournit la résolution spatiale du lidar.

La possibilité de réaliser des mesures lidar à haute résolution sur une large bande spectrale est illustrée par la figure 6. La transmission atmosphérique y est mesurée depuis une altitude de 4,5 km. On reconnaît la signature spectrale à haute résolution (0,01 nm) de l'atmosphère sur ce chemin d'absorption exceptionnellement long. Dans cette région spectrale, les principales bandes d'absorption observées sont celles de l'oxygène (687 à 696 nm et 759 à 770 nm) et de la vapeur d'eau (716 à 732 nm, 811 à 853 nm et 893 à 925 nm). Des simulations à partir de la **base de données Hitran** reproduisent parfaitement ce spectre. Ces simulations permettent de déterminer simultanément la température et la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, et par conséquent d'en déduire un profil de température et d'humidité relative, données précieuses pour la météorologie autant que pour la climatologie [6]. Nous avons également réalisé des mesures lidar multispectrales dans l'infrarouge, où la génération du continuum semble plus efficace que les mesures en laboratoire ne l'avaient laissé espérer, ainsi que dans l'ultraviolet, où nous avons simultanément mesuré le profil vertical d'ozone et celui de la concentration d'aérosols au-dessus de Lyon. Cette mesure nous a permis de corriger les erreurs que la présence d'aérosols imprime généralement aux mesures d'ozone par les techniques lidar conventionnelles.

6. Mesure d'aérosols biologiques

Les aérosols sont un élément clé de la pollution atmosphérique. Ils peuvent par exemple agir comme des catalyseurs pour des réactions chimiques hétérogènes ou comme des vecteurs pour apporter dans les bronches des espèces cancérogènes adsorbées à leur surface. Plus récemment, la menace d'attaques terroristes a soulevé le besoin d'un système d'alerte capable de détecter sélectivement à distance des aérosols biologiques. Mais la diversité des aérosols en taille, forme et composition complique leur identification à distance. Un lidar multispectral peut déterminer la concentration, la taille des particules et leur indice de réfraction, mais les techniques d'inversion nécessitent des connaissances (ou des hypothèses) *a priori* sur les aérosols à mesurer. De plus, aucune technique ne permet à ce jour une analyse chimique à distance des aérosols. La forte puissance crête des impulsions femtoseconde offre l'opportunité d'arriver à ce résultat grâce à la génération *in situ* d'effets non linéaires directement à l'intérieur des particules d'aérosols. En effet, des impulsions ultrabrèves arrivant sur une particule microscopique sont focalisées par la courbure de sa surface. À ce foyer interne à la particule, l'intensité est alors suffisante pour pomper efficacement des effets non linéaires, comme la fluorescence excitée à plusieurs photons. De plus, la particule refocalise vers l'arrière la fluorescence ainsi émise, facilitant sa détection par lidar. Cette signature pourrait permettre d'identifier la composition chimique de la particule distante.

High resolution transmission molecular absorption database (Hitran) : <http://www.hitran.com>

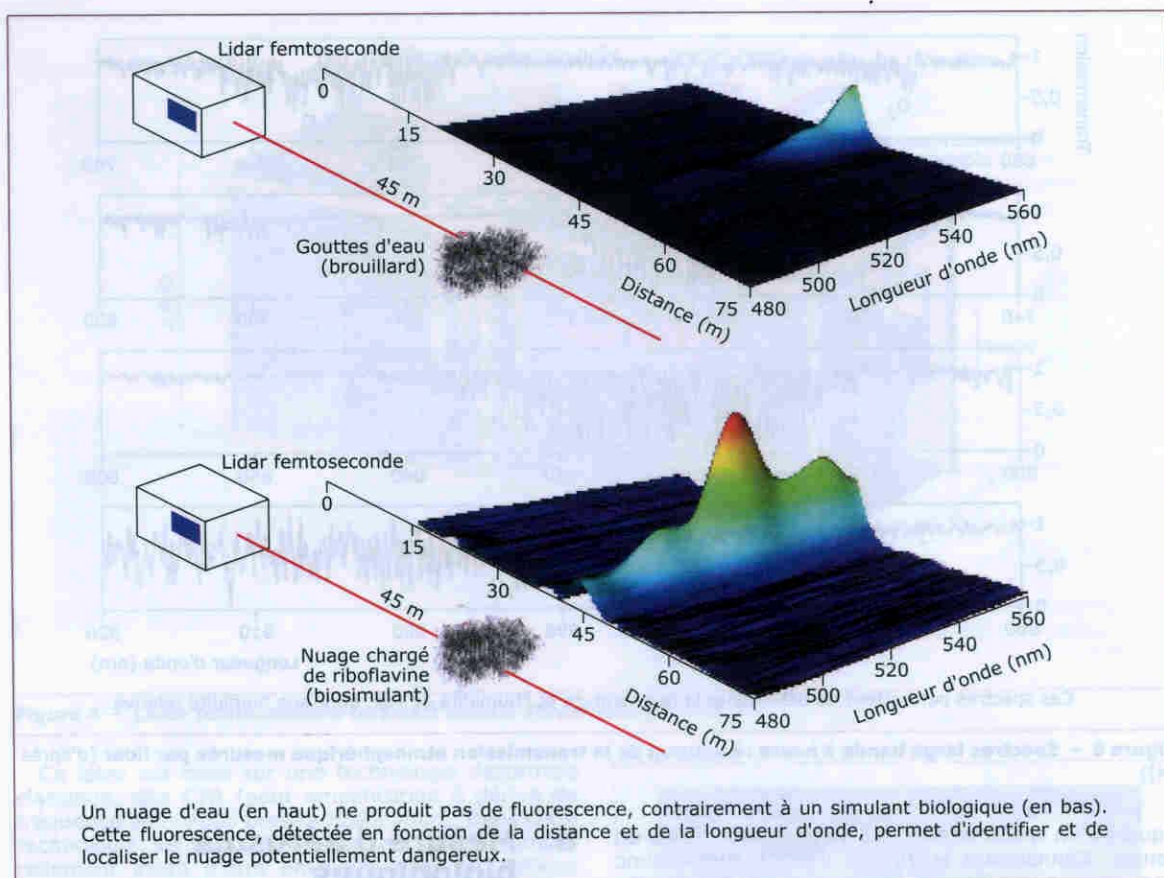


Figure 7 – Télédétection d'aérosols biologiques

Nous avons récemment appliqué cette technique sur le terrain pour détecter à distance la pollution de particules d'eau par un traceur caractéristique des particules biologiques [7]. Dans cette expérience, un nuage était produit dans une enceinte placée à une distance de 45 m du système *Téramobile*. Lorsque les gouttes de ce nuage sont dopées par de la riboflavine, utilisée comme biosimulant, la signature de la fluorescence excitée à deux photons au cœur des gouttelettes est visible sur le signal lidar. Au contraire, cette signature disparaît lorsque le nuage est composé d'eau pure (figure 7). Ce résultat démontre la possibilité d'utiliser le lidar pour distinguer des particules biologiques des aérosols naturellement présents dans l'atmosphère, bien que les particules soient de taille identique.

7. Vers un paratonnerre laser ?

L'idée de déclencher la foudre avec des lasers est presque aussi ancienne que les lasers eux-mêmes. Un paratonnerre laser permettrait en effet d'assurer la protection de sites sensibles tels que des centrales électriques et des aéroports. Dans les années 1970 et 1980, les lasers nanoseconde ont montré leurs limites, ne parvenant pas à générer dans l'air un canal conducteur suffisamment long. Mais les filaments autoguidés produits par les lasers

femtoseconde-terawatt, qui présentent une densité d'électrons supérieure à celle requise pour déclencher une décharge électrique dans l'atmosphère, soit $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, ont ravivé l'intérêt pour le sujet. Nous avons récemment déclenché et guidé des décharges de haute tension en laboratoire grâce à des filaments ionisés générés par un laser femtoseconde. Grâce à sa mobilité, le laser *Téramobile* a été placé dans un laboratoire équipé d'un générateur de haute tension (2 MV) et son faisceau a été aligné avec les électrodes. De la sorte, les filaments générés par le laser court-circuitaient l'intervalle de 1 à 5 m entre les électrodes modélisant respectivement la terre et un nuage chargé. Les décharges, erratiques lorsque le laser était éteint, étaient guidées par les filaments lorsqu'ils étaient présents (figure 8) [8]. De plus, la tension de claquage était réduite d'environ 30 % par rapport à la décharge libre. Nous avons ainsi déclenché des décharges à des tensions qui ne le permettaient pas sans laser.

Ces résultats sont très encourageants quant à la possibilité d'utiliser les filaments pour contrôler la foudre. Cependant, des expériences complémentaires restent à mener pour déterminer si les mesures réalisées en laboratoire en échelle réduite peuvent être extrapolées à des distances de quelques centaines de mètres impliquant un mécanisme de décharge plus complexe.

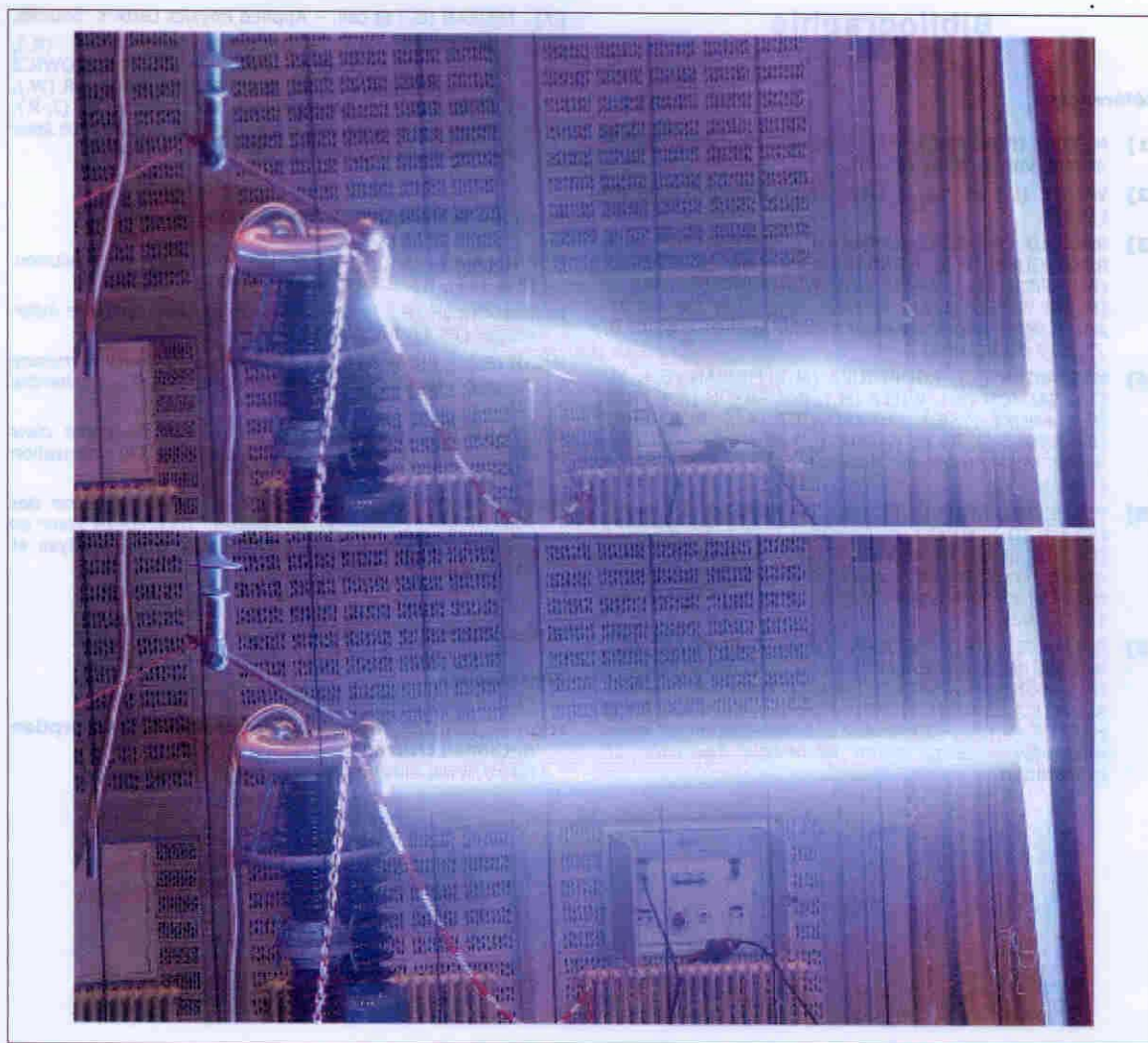


Figure 8 – Décharge électrique haute tension (1 MV) libre (en haut) et guidée par des filaments générés par laser (en bas) (d'après [4])

8. Conclusion

Ces dernières années, la compréhension de la propagation non linéaire des impulsions laser ultrabrefs et de forte puissance a progressé à grands pas. Ces progrès autorisent désormais les chercheurs à s'intéresser à des applications à l'atmosphère, telles que la télédétection de polluants ou le contrôle de la foudre. Des résultats prometteurs ont été obtenus récemment, en particulier par l'équipe franco-allemande du projet Téramobile.

Le développement de ces applications sera probablement facilité à l'avenir par les progrès attendus dans la technologie des lasers ultrabrefs : systèmes plus fiables et plus compacts, lasers pompés par diodes ou encore mise en forme spatiale et temporelle des impulsions laser. En fournissant des lasers ultrabrefs plus souples, plus fiables et plus faciles à mettre en œuvre, ces nouvelles techniques faciliteront la

réalisation des applications actuellement en cours de développement.

Remerciements

Le projet Téramobile est une collaboration entre le laboratoire de spectrométrie ionique et moléculaire (LASIM, CNRS/université de Lyon-I), l'université libre de Berlin, l'université de Jena et le laboratoire d'optique appliquée (CNRS/X/ENSTA). Je tiens à remercier les nombreux collègues qui ont contribué à ce travail : G. Méjean, J. Yu, S. Frey, E. Salmon, J.P. Wolf à Lyon, M. Rodriguez et H. Wille à Berlin, R. Bourayou et R. Sauerbrey à Jena, Y.B. André et A. Mysyrowicz à Palaiseau, ainsi que l'équipe de l'observatoire de Tautenburg. Je salue également l'aide des équipes techniques à Berlin, Jena et Lyon, et en particulier M. Barbaire, M. Kerleroux, M. Néri, M. Kriegliski, F. Ronneberger et W. Ziegler.

Bibliographie

Références

- [1] MEYERS (R.A.) (éd.). – *Encyclopedia of analytical chemistry*. Vol. 3, Wiley (2000).
- [2] WÖSTE (L.) et coll. – *Laser und Optoelektronik*, 29 (1997).
- [3] RAIROUX (P.), SCHILLINGER (H.), NIEDERMEIER (S.), RODRIGUEZ (M.), RONNEBERGER (F.), SAUERBREY (R.), STEIN (B.), WAITE (D.), WEDEKIND (C.), WILLE (H.) et WÖSTE (L.). – *Remote sensing of the atmosphere using ultrashort laser pulses*. *Applied Physics B*, 71, 573-580 (2000).
- [4] KASPARIAN (J.), RODRIGUEZ (M.), MÉJEAN (G.), YU (J.), SALMON (E.), WILLE (H.), BOURAYOU (R.), FREY (S.), ANDRÉ (Y.-B.), MYSYROWICZ (A.), SAUERBREY (R.), WOLF (J.-P.) et WÖSTE (L.). – *White-Light Filaments for Atmospheric Analysis*. *Science*, 301, 61-64 (2003).
- [5] WILLE (H.), RODRIGUEZ (M.), KASPARIAN (J.), MONDELAIN (D.), YU (J.), MYSYROWICZ (A.), SAUERBREY (R.), WOLF (J.-P.) et WÖSTE (L.). – *Teramobile : a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system*. *European Physical Journal - Applied Physics*, 20, 183 (2002).
- [6] BOURAYOU (R.), MÉJEAN (G.), KASPARIAN (J.), RODRIGUEZ (M.), SALMON (E.), YU (J.), SAUERBREY (R.), WÖSTE (L.), WOLF (J.-P.), LEHMANN (H.), STECKLUM (B.), LAUX (U.), EISLÖFFEL (J.), SCHOLZ (A.) et HATZES (A.P.). – *Extended characterization of cloud microphysics using in-situ white-light filaments*. En préparation.

- [7] MÉJEAN (G.) et coll. – *Applied Physics Letters*. Soumis.
- [8] RODRIGUEZ (M.), SAUERBREY (R.), WILLE (R.), WÖSTE (L.), FUJII (T.), ANDRÉ (Y.-B.), MYSYROWICZ (A.), KLINGBEIL (L.), RETHMEIER (K.), KALKNER (W.), KASPARIAN (J.), SALMON (E.), YU (J.) et WOLF (J.-P.). – *Megavolt discharges triggered and guided with laser filaments*. *Optics Letters*, 27, 772-774 (2002).

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- CORNILLAUD (J.). – *Lidar de détection de pollution*. [E 4 315], traité Électronique (1997).
- BERNASCOLLE (P.). – *Détection de gaz par imagerie infrarouge*. [IN 4], Innovation (2002).
- HADJI (E.) et PICARD (E.). – *Microsources IR pour la mesure de gaz. Application à l'automobile*. [RE 7], Recherche (2002).
- DALIBART (M.) et SERVANT (L.). – *Spectroscopie dans l'infrarouge*. [P 2 845], traité Analyse et Caractérisation (2000).
- MAUCHIEN (P.) et BERTHOUD (T.). – *Spectrométrie des rayonnements électromagnétiques. Techniques laser en analyse et caractérisation*. [P 2 685], traité Analyse et Caractérisation (1992).

Sites Internet

Teramobile

<http://www.teramobile.org>

High resolution transmission molecular absorption database (Hitran)

<http://www.hitran.com>