

Le Teramobile : un système laser femtoseconde mobile pour les applications à la physique de l'atmosphère

J. Kasparian^{1,3}, D. Mondelain¹, J. Yu¹, H. Wille², M. Rodriguez^{2,3}, A. Mysyrowicz⁴, R. Sauerbrey³, J.P. Wolf¹, L. Wöste²

¹ LASIM, UMR CNRS 5579, Bât. A. Kastler, Université Claude Bernard Lyon 1, 43 Bd du 11 novembre 1918, F-69619 Villeurbanne Cedex, France

Email : jerome.kasparian@lasim.univ-lyon1.fr, www.teramobile.org

² Institut für Experimentalphysik, Freie Universität Berlin, Arnimallee 14, D-14195 Berlin, Allemagne

³ Institut für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Max-Wien-Platz 1, D-07743 Jena, Allemagne

⁴ LOA, ENSTA - École Polytechnique, Chemin de la Hunière, F-91761 Palaiseau Cedex, France

Résumé

Cet article décrit le système Térmobile, le premier système laser multi-terawatt mobile. Il est conçu autour d'un laser à amplification à dérive de fréquence intégré dans un conteneur maritime standard également équipé d'un système de détection Lidar. La mobilité du système ouvre la voie vers de nouvelles applications pour les implusions de forte puissance dans l'atmosphère telles que le Lidar ou le contrôle de foudre, qui sont brièvement passées en revue.

1 Introduction

L'intérêt pour la propagation non-linéaire d'impulsions laser s'est nettement accru depuis 1985, lorsque la technique de l'amplification à dérive de fréquences (chirped pulse amplification ou CPA en anglais) [1, 2] a permis de produire des impulsions ultrabrèves avec des puissances qui peuvent aujourd'hui dépasser 10^{14} W. A ces niveaux de puissance, les processus non-linéaires dominent la propagation des impulsions même dans les milieux dilués comme l'air, ce qui ouvre la voie à des applications dans l'atmosphère. Cependant, les actuels lasers de forte puissance sont limités à des expériences en laboratoire à cause de leur taille et de leur sensibilité à l'environnement. Pour la première fois, nous avons développé un laboratoire mobile abritant un laser CPA multiterawatt et ses outils d'analyse et de détection. Après une brève description des propriétés de la propagation non-linéaire d'impulsions laser ultra-intenses dans l'air, soulignant l'intérêt d'un laser mobile de forte puissance, cet article décrit le système Térmobile[3], puis passe en revue les applications ainsi que les premiers résultats obtenus avec le système.

Le processus le plus spectaculaire intervenant dans la propagation d'impulsions de forte puissances dans l'air est la filamentation, dont le mécanisme est décrit par exemple dans la référence [4]. Brièvement, un équilibre dynamique s'établit entre l'autofocalisation due à l'effet Kerr, et l'ionisation de l'air qui défocalise le faisceau. Cet équilibre conduit à un auto-guidage du faisceau en un filament dont le diamètre est de l'ordre de $100 \mu\text{m}$ [5], sur des distances pouvant dépasser 100 m, soit bien plus que la longueur de Rayleigh [6, 7]. L'intensité dans les filaments est de l'ordre de 10^{13} à 10^{14} W/cm^2 [8], donnant lieu à une automodulation de phase générant un intense supercontinuum de lumière blanche [9]. Cependant, l'étude de ces phénomènes est limitée à de courtes distances par la dimension des laboratoires et par les temps de calculs prohibitifs pour les simulations numériques.

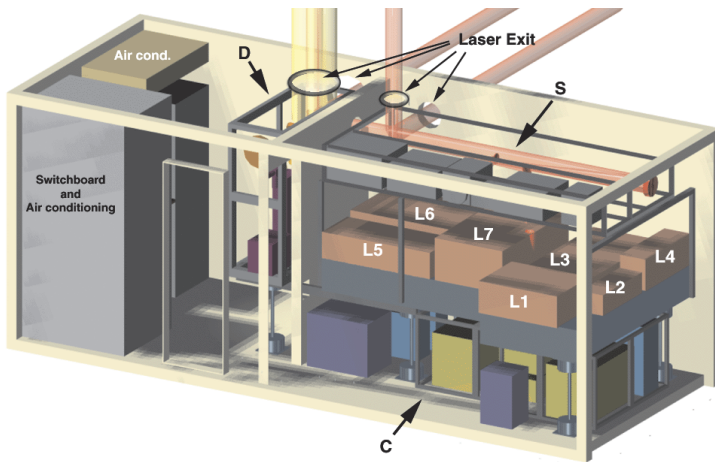
Les applications à l'atmosphère nécessitent des expériences à l'échelle du km, et donc des expériences de terrain. Or, l'intérêt de telles applications a été fortement souligné par la réalisation d'un Lidar (Light Detection and Ranging) multispectral tirant parti de l'émission de supercontinuum [10], puis par la démonstration que le supercontinuum couvre tout le domaine visible et le proche infrarouge jusqu'à $4,5 \mu\text{m}$ [11], ce qui ouvre la voie vers la mesure de nombreux polluants atmosphériques. Un laser fs-TW pourrait aussi exciter des étoiles guides polychromatiques pour l'optique adaptative [12]. Par ailleurs, l'ionisation de l'air dans le filament autoguidé pourrait fournir un canal conducteur pour contrôler la foudre [13, 14, 15].

2 Le système Térmobile

2.1 Le laser

En vue de ces expériences de terrain, nous avons développé le premier système laser multiterawatt mobile, le Térmobile. Il a été conçu comme un outil le plus souple possible, grâce à un équipement optique complet tant pour l'émission du faisceau laser que pour la détection. Ce laser est basé sur la technique classique de l'amplification à dérive

de fréquences [1, 2], la chaîne d'amplification incluant un amplificateur régénératif et deux amplificateurs multipassages.. Mais son intégration dans un laboratoire mobile aux dimensions réduites a nécessité de minimiser son encombrement, en collaboration avec le constructeur Thales Laser. En particulier, le laser est placé sur une table en forme de T qui optimise sa compacité et son accessibilité. Les diagnostics usuels et les dispositifs de commande sont logés au-dessus de la table (Figure 1). Des espaces ont été laissés libre pour de futurs diagnostics complémentaires, à installer définitivement ou pour une expérience spécifique. Le tableau 1 résume les performances du système.



Longueur d'onde	793 nm
Largeur de bande	16 mm
Énergie par impulsion	350 mJ
Durée d'impulsion	70 fs sech ²
Puissance crête	5 TW
Fréquence	10 Hz
Diamètre du faisceau	50 mm
Réglage du <i>chirp</i>	70 fs à 2 ps, <i>chirp</i> positif ou négatif
Stabilité de l'énergie	2,5 % RMS sur 400 tirs
Dimensions	3,5 x 2,2 m

Tableau 1: Performances du laser Téramobile

Figure 1: Schéma de l'aménagement du laboratoire mobile. Optique d'émission (S), oscillateur (L1), étireur (L2), amplificateurs (L3 et L5) lasers de pompe (L4 et L6), compresseur (L7), compartiment isolé pour les alimentations (C), détection Lidar (D)

Trois paramètres du laser peuvent être variés à l'émission : le glissement de fréquences (ou *chirp*), la focalisation et le diamètre de faisceau. Le contrôle du *chirp* prend toute son importance sur de longues distances : sur 1 km, la dispersion de la vitesse de groupe dans l'atmosphère multiplie en effet par 10 la durée d'une impulsion initiale de 100 fs. Cet effet peut être précompensé pour une distance de propagation donnée en déréglant le compresseur de la chaîne laser. Dans ce but, l'un des réseaux du compresseur est mobile et motorisé sur une longue course, permettant de précompenser jusqu'à 1,5 km de propagation dans l'air.

Par ailleurs, le faisceau est émis à travers un télescope dont la focale est variable continûment de 10 m à une légère divergence, avec un grandissement constant de 2,7 : la focalisation est un paramètre important pour contrôler la distance à laquelle la filamentation va débiter. Ce télescope est entièrement réflectif pour préserver les caractéristiques spectrales et temporelles des impulsions. Ce télescope peut aussi être court-circuité pour émettre le faisceau parallèle avec un diamètre limité à 5 cm. Le laser peut être émis soit verticalement soit horizontalement, avec une orientation possible de $\pm 10^\circ$ de son axe, dans une configuration coaxiale ou non pour les expériences Lidar.

2.2 Le laboratoire mobile

Le laser Téramobile est installé avec son équipement dans un laboratoire construit dans un conteneur maritime standard, dont les principales caractéristiques sont reprises dans le tableau 2. Compte tenu de la sensibilité d'un laser femtoseconde à la déformation mécanique, tout le système optique, laser et optiques d'émission et de détection constituent un ensemble rigide fixé par des amortisseurs à la structure du conteneur. Cette configuration autorise le transport du système Téramobile dans des conditions standard.

Le laboratoire mobile a été conçu en collaboration avec Impres GmbH (Bremen, Allemagne). La Figure 1 donne un aperçu de la structure du système. Le laboratoire est divisé en deux pièces isolées électromagnétiquement. La première pièce abrite le laser et l'optique d'émission, la seconde contenant essentiellement la détection et l'infrastructure. Pour assurer la stabilité du laser femtoseconde, le contrôle de la température est séparé en trois volumes isolés : (i) la salle de contrôle, (ii) la salle laser, et (iii) une enceinte sous la table laser, abritant les alimentations électriques des lasers de pompe, et équipé de son propre échangeur de chaleur. Le dimensionnement généreux de la climatisation permet, dans des conditions extérieures raisonnables, de démonter les vitres des hublots d'émission pour limiter les altérations du faisceau à leur traversée.

La sécurité oculaire est un point essentiel pour l'utilisation des lasers de forte puissance. Un système de sécurité contrôle le fonctionnement du système et peut bloquer le faisceau sur ordre de détecteurs adaptés à l'expérience en cours : détecteur de mouvement, contrôleur manuel, ou laser auxiliaire de faible puissance pour détecter le passage d'un avion.

Dimensions extérieures	Conteneur standard 20'	Stabilité de température	$\pm 1^\circ\text{C}$
Dimensions intérieures	5,70 m x 2,15 m x 2,20 m	Température extérieure	-20°C à $+35^\circ\text{C}$
Poids total	10 tonnes	Humidité extérieure	0 à 100%
Puissance électrique	30 kW	Hublots d'émission/réception	2x \varnothing 25 cm, 2x \varnothing 45 cm

Tableau 2: Spécifications du laboratoire mobile

2.3 Détection et analyse du faisceau

Le système de détection installé dans le TéraMobile est principalement destiné à des mesures lidar, coaxiales ou non. Il est composé d'un télescope de 40 cm couplé à deux canaux de détection. Le premier est équipé d'un spectromètre pour des mesures résolues temporellement et spectralement. Le second est utilisé pour mesurer la dépolarisation afin d'étudier la génération du supercontinuum et de caractériser les aérosols atmosphériques. Ce télescope peut également être pointé horizontalement pour comparer la lumière rétrodiffusée avec l'émission mesurée directement dans le faisceau se propageant parallèlement au sol. Chacun des deux canaux de détection peut être équipé de divers détecteurs en fonction de la gamme spectrale : ICCD (190-950 nm), photomultiplicateur infrarouge (350-1700 nm), photodiode à avalanche Silicium (700-1100 nm) et diode InSb (1.5-5.5 μm).

Pour caractériser le faisceau laser sur de longues distances, nous avons également développé un laboratoire mobile de caractérisation intégré dans une remorque pouvant être déplacée continuellement le long du faisceau. Ce laboratoire auxiliaire est entièrement équipé pour un fonctionnement autonome. Il est par ailleurs entièrement opaque, pour assurer la sécurité des opérateurs lorsqu'il est placé dans le faisceau. La lumière est alors collectée par une fibre tenue par un bras articulé télécommandé depuis l'intérieur du laboratoire. Ce bras permet de réaliser des courbes transversales du faisceau, ouvrant la voie vers une caractérisation tridimensionnelle du faisceau laser dans sa propagation.

3 Applications et premiers résultats du TéraMobile

3.1 Contrôle de la distance de filamentation

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, les applications à l'atmosphère de la propagation d'impulsions laser ultrabrèves repose sur la génération d'un continuum de lumière blanche et sur l'ionisation dans les filaments autoguidés. De ce fait, il est indispensable de comprendre la propagation des impulsions laser de forte puissance dans l'air sur de longues distances afin de contrôler le faisceau, et en particulier la distance à laquelle la filamentation se produit. Le TéraMobile est particulièrement adapté à ce type d'expériences, puis qu'il est possible de l'installer par exemple à l'extrémité d'une piste d'aéroport désaffecté et de déplacer le laboratoire auxiliaire tout au long du faisceau sur une distance de quelques km.

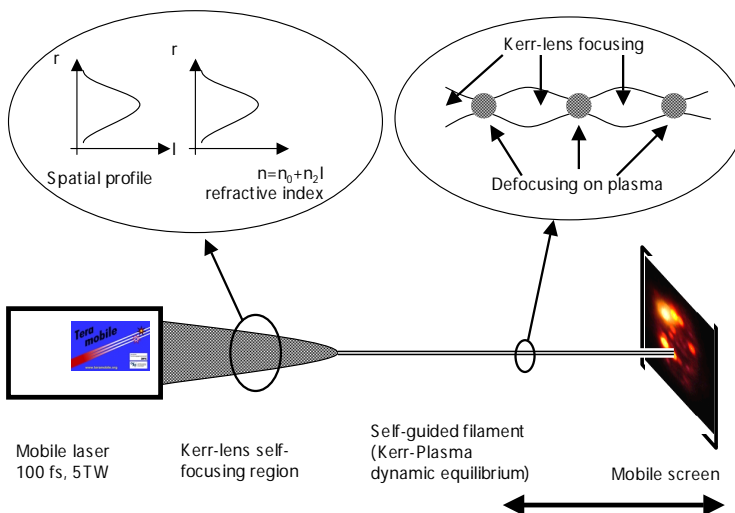


Figure 2: Principe de la filamentation et dispositif expérimental pour l'étude de la distance de filamentation

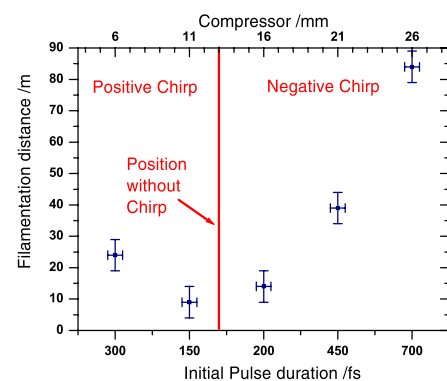


Figure 3: Distance de filamentation en fonction du chirp. Incertitude : $\pm 10\%$ pour la durée d'impulsion et ± 5 m pour la distance. Durée d'impulsion minimum : environ 100 fs. Noter que l'axe horizontal n'est pas linéaire.

Nous décrivons ici des résultats préliminaires obtenus sur 100 m avec des impulsions de 330 mJ dans une durée d'impulsion variable de 100 fs à 700 fs environ selon le *chirp* appliqué aux impulsions (Figure 2). Le faisceau émis est parallèle, avec un diamètre initial de 5 cm. La puissance émise (4 TW) dépassant largement la puissance critique

$P_{crit} = \lambda^2 / (4\pi \cdot n_2) \approx 1 \text{ GW}$, le faisceau génère un régime de multifilamentation. La distance de filamentation, c'est à dire la distance à laquelle les filaments se forment, dépend fortement du *chirp*, comme le montre la Figure 3. Néanmoins, la filamentation se produit bien avant la distance à laquelle les impulsions seraient recombinaées par la dispersion de vitesse de groupe, qui correspond à 1 ps/km pour des impulsions de 16 nm de largeur spectrale. En effet, même les impulsions les plus fortement étirées gardent une puissance largement supérieure à la puissance critique, ce qui permet à l'autofocalisation et la filamentation de se produire avant que l'impulsion ne soit recombinaée temporellement. La distance de filamentation est alors essentiellement fonction de la puissance initiale de l'impulsion. Ces résultats illustrent ainsi la possibilité de contrôler la distance de filamentation dans l'air, en jouant sur les paramètres du laser émis.

3.2 Mesure par Lidar de composants atmosphériques

Le Lidar [16] est une technique de télédétection atmosphérique, dont l'avantage principal est de fournir haute résolution spatiale et une cartographie tridimensionnelle des espèces mesurées. Mais le nombre d'espèces mesurables est limité par l'existence de sources laser pulsées et à bande étroite, en particulier dans l'infrarouge. De plus, le laser doit être ajusté à une bande d'absorption de la molécule étudiée, ce qui interdit les mesures simultanées de plusieurs polluants et rend le Lidar sensible aux interférences entre molécules dont les spectres se recouvrent. Ces limitations pourraient être contournées par l'utilisation du supercontinuum de lumière blanche qui, avec une détection associant la résolution spectrale à la résolution temporelle du Lidar classique, ouvrirait la voie vers une mesure multipolluants simultanée. Par ailleurs, la bande d'absorption des composés organiques volatils (COVs) au voisinage de 3,5 μm est couverte par le supercontinuum. De plus, nous avons récemment montré que, à cause de la génération de gradients locaux d'indice de réfraction, la rétro-émission du supercontinuum est beaucoup plus intense que ne le serait sa seule rétrodiffusion élastique [17], ce qui est un facteur très favorable au Lidar. Par ailleurs, l'excitation *in situ* dans les aérosols d'effets non-linéaires tels que la fluorescence à excitation multiphotonique [18] ou la diffusion Raman [19] pourrait fournir des informations sur la composition chimique, la taille et la forme des aérosols atmosphériques.

Pour mettre en œuvre un Lidar non-linéaire en vue d'une analyse multi-polluants, nous avons équipé le TéraMobile d'un

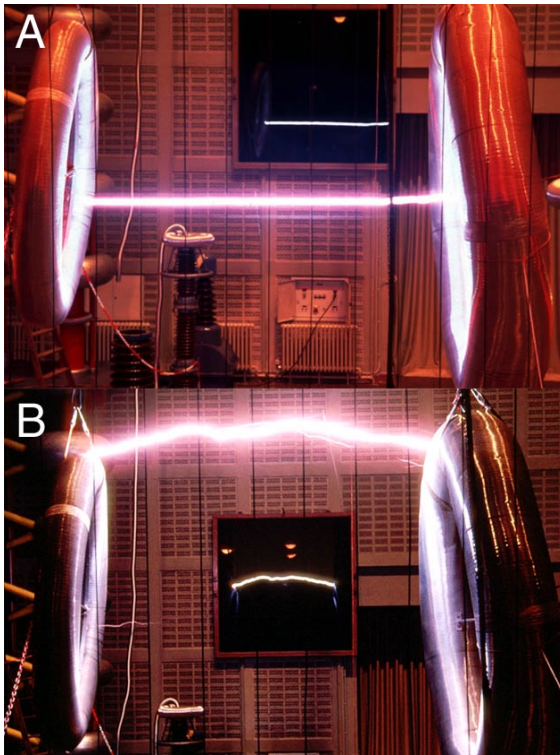


Figure 3. Décharge sans (A) et avec (B) laser entre deux électrodes toriques éloignées de 3,2 m. Le guidage de la décharge déclenchée (B) est clairement visible

système complet de détection Lidar, dans lequel la combinaison d'un spectromètre et d'un photomultiplicateur au foyer du télescope de détection combine les résolutions spatiale et spectrale. Les paramètres du laser et la précompensation de la dispersion de la vitesse de groupe dans l'atmosphère sont choisis pour optimiser la génération de supercontinuum. Avec un tel dispositif, des résultats préliminaires ont montré qu'il est possible de mesurer l'humidité sans être gêné par l'étroitesse des raies d'absorption comme dans le cas du Lidar DIAL classique [10].

3.3 Contrôle de décharges de haute tension

Récemment, nous avons démontré, en collaboration avec l'Institut pour la haute tension de l'Université de technologie de Berlin (UTB), que des impulsions laser femtoseconde de forte puissance peuvent déclencher et guider des décharges de haute tension [20] modélisant la foudre. Pour cette expérience, la mobilité du TéraMobile a permis de l'installer à l'intérieur du hall d'expériences haute tension de l'Université de l'UTB. Un générateur impulsional produisait des impulsions de tension pouvant atteindre 2 MV, avec un temps de montée de 1,2 μs , entre deux électrodes séparées par une distance ajustable entre 2 et 4 m. Le faisceau laser (300 mJ et 100 fs) était focalisé légèrement avant la première électrode, et aligné de manière à être tangent aux deux électrodes, de telle sorte que les filaments autoguidés établissaient un contact ohmique entre elles. La Figure 3 représente la décharge libre (A) et guidée (B) entre deux électrodes toroïdales de diamètres respectifs 2,2 et 3 m, montrant clairement le guidage de la décharge. Le déclenchement de décharges est attesté par une réduction de 30 % environ de la tension médiane de claquage.

4 Conclusion

Nous avons intégré un laser multi-térawatt et un système de détection lidar dans un laboratoire mobile installé dans un conteneur maritime standard. Ce système, le TéraMobile, fonctionne avec une stabilité comparable à celle d'un système de laboratoire. Les premiers résultats ont permis de démontrer le contrôle de la filamentation, la faisabilité d'un Lidar multispectral femtoseconde, et le contrôle de décharges de haute tension. Ces travaux se poursuivent actuellement en vue d'optimiser le signal lidar dans l'infrarouge et d'étudier la propagation non-linéaire dans l'atmosphère.

Remerciements

Le TéraMobile est cofinancé par le CNRS (en particulier *via* l'Action Concertée Optique) et la DFG. Jean-Pierre Wolf remercie l'IUF pour son soutien. Toute notre reconnaissance va aux équipes techniques des laboratoires impliqués, en particulier M. Barbaire, M. Kerleroux, M. Néri, W. Ziegler et M. Kregielski. Nous tenons aussi à saluer l'aide apportée par I. Beninga and W. Ruhe (Impres GmbH), J.C. Luderer, S. Niedermeier, L. Klingbeil et K. Rethmeier.

Références

1. D. Strickland, G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
2. P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, G. Mourou, *IEEE J. Quantum Electron.* **24**, 398 (1988).
3. H. Wille, M. Rodriguez, J. Kasparian, D. Mondelain, J. Yu, A. Mysyrowicz, R. Sauerbrey, J.P. Wolf, L. Wöste, "*Teramobile: a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system*", To appear in *Eur. Phys. J. AP* (2002)
4. A. Chiron, B. Lamouroux, R. Lange, J.-F. Ripoché, M. Franco, B. Prade, G. Bonnaud, G. Riazuelo, A. Mysyrowicz, *Eur. Phys. J. D*, **6**, 383 (1999)
5. E. T. J. Nibbering, P. F. Curley, G. Grillon, B. S. Prade, M. A. Franco, F. Salin, A. Mysyrowicz, *Opt. Lett.* **21**, 62 (1996)
6. B. La Fontaine, F. Vidal, Z. Jiang, C. Y. Chien, D. Comtois, A. Desparois, T. W. Johnston, J.-C. Kieffer, H. Pépin, H. P. Mercure, *Physics of Plasmas* **6**, 1615 (1999).
7. M. Mlejnek, M. Kolesik, J. V. Moloney, E. M. Wright, *Opt. Lett.* **23**, 2938 (1999).
8. J. Kasparian, R. Sauerbrey, S.L. Chin, *Appl. Phys. B* **71**, 6, pp. 877-879 (2000)
9. P. B. Corkum, C. Rolland, T. Srinivasan-Rao, *Phys. Rev. Lett.* **57**, 2268 (1986).
10. P. Rairoux, H. Schillinger, S. Niedermeier, M. Rodriguez, F. Ronneberger, R. Sauerbrey, B. Stein, D. Waite, C. Wedekind, H. Wille, L. Wöste, *Appl. Phys. B* **71**, 573 (2000).
11. J. Kasparian, R. Sauerbrey, D. Mondelain, S. Niedermeier, J. Yu, J.-P. Wolf, Y.-B. André, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowicz, S. Tzortzakis, M. Rodriguez, H. Wille, L. Wöste, *Opt. Lett.* **25**, 1397-1399 (2000).
12. J.R. Morris, *J. Opt. Soc. Am. A* **11**, 832 (1994).
13. S.L. Chin, K. Miyazaki, *Jap. J. Appl. Phys.* **38**, 2011-2012 (1999).
14. B. La Fontaine, D. Comtois, C. Y. Chien, A. Desparois, F. Gérin, G. Jarry, T. W. Johnston, J. C. Kieffer, F. Martin, R. Mawassi, H. Pépin, F. A. M. Rizk, F. Vidal, C. Potvin, P. Couture, H. P. Mercure, *J. Appl. Phys.* **88**, 610-615 (2000).
15. Rambo, P., J. Schwartz, J.-C. Diels, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* **3**, 146-158 (2001).
16. R. M. Measures, *Laser Remote Sensing-Fundamental and Applications*, Wiley Interscience, New York, 1984
17. J. Yu, D. Mondelain, G. Ange, R. Volk, S. Niedermeier, J.P. Wolf, J. Kasparian, R. Sauerbrey, *Opt. Lett.* **26**, 533 (2001).
18. S. C. Hill, V. Boutou, J. Yu, S. Ramstein, J.-P. Wolf, Y.-I. Pan, S. Holler, R. K. Chang, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 54-57 (2000).
19. J. Kasparian, J.-P. Wolf, *Opt. Commun.* **152**, 355 (1998).
20. M. Rodriguez, R. Sauerbrey, H. Wille, L. Wöste, T. Fujii, Y.-B. André, A. Mysyrowicz, L. Klingbeil, K. Rethmeier, W. Kalkner, J. Kasparian, E. Salmon, J. Yu, J.-P. Wolf, *Opt. Lett.* **27**, 772 (2002)