

# Le projet TéraMobile et ses applications

Jérôme Kasparian

LASIM, UMR CNRS 5579

Université Claude-Bernard Lyon-I

Tél. : 33 (0)4 72 43 26 54

jkaspari@lasim.univ-lyon1.fr

## Fruit d'une collaboration

franco-allemande, le projet TéraMobile a permis, depuis son démarrage en 1999, de concevoir et de réaliser le premier laser térawatt mobile pour l'étude de l'atmosphère.

Il concentre l'état de l'art en technologie laser dans un conteneur de 6 mètres seulement, permettant des campagnes de mesure sur le terrain. Outil unique au monde, il a permis d'étudier la propagation d'impulsions laser térawatt et a conduit à de nombreuses applications : mesures multipolluants par lidar, contrôle de la foudre, analyse à distance de surfaces par spectroscopie de plasma induit par laser (LIBS).

## Le projet TéraMobile

### Le cadre du projet

Le projet TéraMobile est un projet franco-allemand de grande envergure, qui fédère quatre laboratoires : LOA-ENSTA de l'École Polytechnique, Institut für Quantenelektronik à l'université de Jena, Institut für Experimentalphysik à l'université libre de Berlin et LASIM à l'université Lyon-I. Cofinancé initialement par le CNRS et la DFG et désormais également par les ministères des Affaires étrangères français et allemand, le projet TéraMobile visait dès son démarrage, en 1999, à construire puis à exploiter un laser femtoseconde-térawatt mobile dédié aux applications de l'étude de l'atmosphère.

Il s'agit d'un laser autonome, intégré dans un laboratoire mobile réalisé dans un conteneur maritime standard (figure 1). Ce laboratoire mobile fournit l'infrastructure nécessaire pour le laser et ses optiques d'émission, ainsi qu'un système de détection lidar. Le système a été conçu comme un outil le plus ouvert possible, afin d'une part de permettre son utilisation dans les diverses conditions expérimentales nécessaires aux expériences de physique appliquée à l'atmosphère, et d'autre part de pouvoir évoluer en vue d'applications non prévues lors de la conception.



Figure 1. Le TéraMobile dans les neiges de Tautenburg

### Le système laser

Le laser TéraMobile repose sur la technique désormais classique de l'amplification à dérive de fréquences ou CPA (*chirped pulse amplification*) (figure 2). Cette technique permet de produire des impulsions laser dont l'intensité est plus élevée que le seuil de dommage des matériaux amplificateurs. Pour cela, la puissance crête des impulsions est artificiellement réduite en étirant temporellement l'impulsion laser pendant son amplification, en lui imprimant un glissement de fréquence ou chirp dans un élément dispersif, l'étireur. En fin de chaîne, les impulsions sont recomprimées dans un élément dispersif symétrique de l'étireur, le compresseur, et retrouvent leur durée initiale.

Si la technique CPA en elle-même est classique, son intégration dans l'espace réduit du conteneur, où le laser dispose de seulement 7 m<sup>2</sup>, a nécessité un agencement particulièrement compact des composants et une réduction de la taille du compresseur. Ces adaptations ont été réalisées en collaboration avec le constructeur, Thales Laser. Les caractéristiques obtenues sont résumées dans le tableau 1.

### L'intégration en conteneur

Le principe du laser et son agencement dans le laboratoire mobile sont résumés sur la figure 3. Les impulsions ultrabrèves sont produites dans un oscillateur Ti:Saphir (Compact Pro, Femtosource), puis allongées temporellement dans un étireur et amplifiées

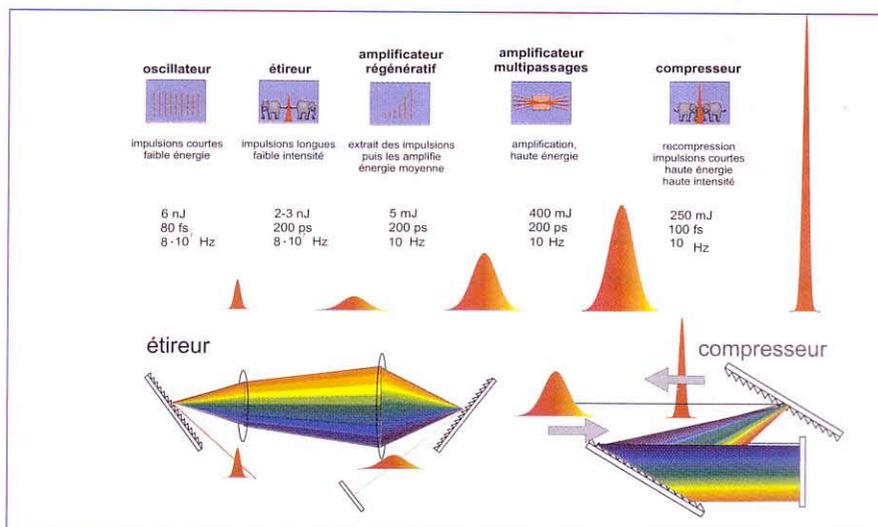


Figure 2. Principe de l'amplification à dérive de fréquences (CPA). Les valeurs sont des ordres de grandeur donnés à titre d'illustration.

Longueur d'onde centrale	793 nm
Largeur de bande	16 nm
Énergie par impulsion	350 mJ
Durée d'impulsion	70 fs $\text{sech}^2$
Puissance crête	5 TW
Fréquence de répétition	10 Hz
Diamètre du faisceau en sortie	30 à 50 mm
Réglage du chirp	70 fs à 2 ps (positif ou négatif)
Stabilité de l'énergie	2,5 % RMS sur 400 tirs
Dimensions	3,5 x 2,2 m

Tableau 1. Caractéristiques du laser Téracomobile.

dans une chaîne composée successivement d'un amplificateur régénératif et de deux amplificateurs multipassages. L'impulsion est ensuite recomprimée temporellement dans un compresseur avant d'être émise dans l'atmosphère. À ce stade, tous les composants optiques sont réfléchifs pour éviter les dommages dus à la très forte intensité des impulsions. Les diagnostics sont installés au-dessus de la table, où de l'espace est réservé pour des instruments supplémentaires nécessaires ponctuellement pour des expériences spécifiques.

Le laser Téracomobile et son équipement sont installés dans un conteneur maritime standard, dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 2. Les lasers femtoseconde-térawatt étant particulièrement

Dimensions extérieures	Conteneur ISO 20 pieds
Dimensions intérieures	5,70 m x 2,15 m x 2,20 m
Poids total, équipement compris	10 t
Puissance électrique	25 kW
Stabilité en température (salle laser)	$\pm 1^\circ\text{C}$
Température extérieure	-20°C à +35°C
Humidité extérieure	0 à 100 %
Huylots	2 x $\varnothing$ 25 cm, 2 x $\varnothing$ 45 cm
Certifications	DIN, IEC, VDE, CEE, NEMKO, CSC

Tableau 2. Caractéristiques du laboratoire mobile Téracomobile.

sensibles aux vibrations mécaniques et aux chocs, l'ensemble du système optique, y compris les télescopes d'émission et de réception, a été conçu comme une seule unité rigide, liée à la structure extérieure du conteneur par des systèmes d'amortisseurs en caoutchouc. Cette suspension permet de transporter le Téracomobile partout dans le monde ; de plus le conditionnement d'air très largement dimensionné permet de l'utiliser dans pratiquement n'importe quelles conditions météorologiques.

### Propagation d'impulsions laser térawatt

Le premier apport du Téracomobile a été de permettre de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu lors de la propagation dans

l'atmosphère d'impulsions laser térawatt, en particulier celui dit de filamentation, et la création d'un large continuum de lumière "blanche" (de 230 nm à 4,5  $\mu\text{m}$ ).

### Les filaments autoguidés

La propagation d'impulsions laser de puissance élevée dans les milieux transparents est fortement non linéaire et conduit à un processus d'autofocalisation par effet Kerr. En effet, à haute puissance, l'indice de réfraction de l'air dépend de l'intensité laser incidente. Comme, en général, le profil d'intensité à l'intérieur du faisceau est un profil 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 critique, 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  $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$ . 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 (figure 4).

L'équilibre dynamique ainsi créé permet de guider la lumière sur des distances pouvant dépasser la centaine de mètres.

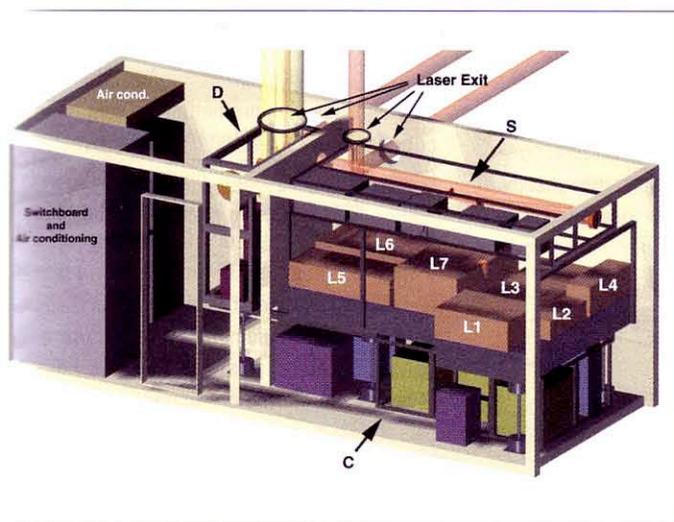


Figure 3. Schéma d'implantation du Téracomobile. Le système laser est composé d'un oscillateur pompé par un laser YAG (L1), un étireur (L2), un amplificateur régénératif et un pré-amplificateur multipassage (L3) pompés par un YAG (L4), un second amplificateur multipassages (L5) pompé par deux lasers YAG (L6), et un compresseur (L7). Les alimentations électriques des lasers et leurs échangeurs de chaleurs sont installés sous la table dans un compartiment isolant (C). L'optique d'émission (S) et l'électronique de contrôle sont placées au-dessus de la table. On notera enfin le système de détection (D).

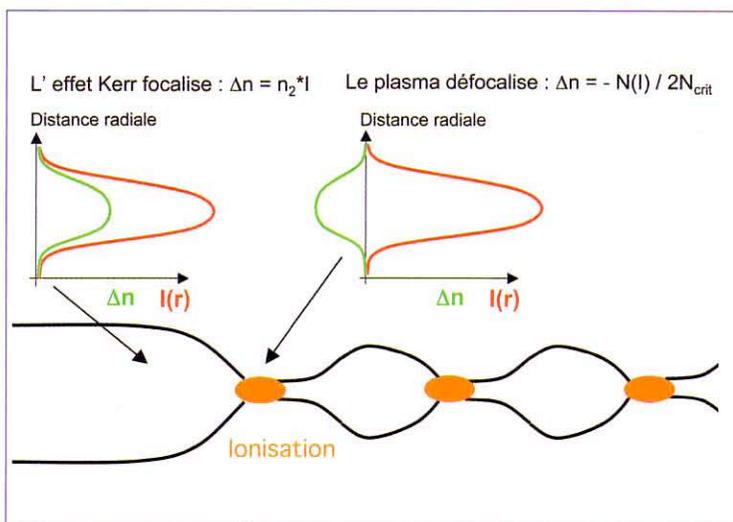


Figure 4. Principe de la filamentation.

Le faisceau s'autofocalise d'abord par effet Kerr et s'effondre sur lui-même. L'ionisation au foyer non-linéaire défocalise alors le faisceau.

Un équilibre dynamique s'établit entre les deux processus sur des distances pouvant dépasser la centaine de mètres.

## ■ Un continuum de lumière blanche

La haute intensité dans les filaments ( $4 \times 10^{13}$  à  $6 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>) 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  $\mu$ m (figure 5). Cette émission cohérente de



Figure 5. Faisceau laser "blanc" émis par le laser TeraMobile.

lumière blanche est émise essentiellement vers l'avant, mais une part significative en est également émise vers l'arrière. Cette rétroémission est particulièrement favorable pour les applications lidar (voir ci-après).

Pour pouvoir utiliser les phénomènes de filamentation et d'ionisation, il est indispensable de contrôler le lieu où vont se produire les phénomènes non linéaires. Pour cela, on utilise le phénomène de dispersion chromatique qui se produit lors de la propagation d'une impulsion lumineuse : les longueurs d'onde "rouges" se propagent en effet plus rapidement que les longueurs d'onde "bleues". Pour compenser cet effet,

l'impulsion à la sortie du laser est réglée de telle sorte que les longueurs d'onde rouges soient situées à l'arrière de l'impulsion et les longueurs d'onde bleues à l'avant. L'impulsion ainsi étirée se recombine à une distance déterminée par la valeur du décalage : on peut alors prévoir l'endroit où le continuum de lumière blanche sera produit.

## Mesures des multipolluants par lidar

### ■ La technique lidar

Le principe du lidar (*Light detection and ranging*) est apparu quelques années seulement après l'apparition des premiers lasers. Une impulsion laser est émise dans l'atmosphère. La lumière rétrodiffusée est collectée sur un télescope, et détectée en fonction du temps avec une résolution de quelques nanosecondes à quelques dizaines de nanosecondes (figure 6). Le principal avantage du lidar sur d'autres techniques optiques de mesure de traces dans l'atmosphère tient à la résolution spatiale, grâce à la résolution temporelle du signal reçu, via le temps de vol de la lumière jusqu'à une distance donnée. Cette résolution spatiale permet d'effectuer des cartographies bi- et tridimensionnelles de différentes espèces atmosphériques.

La méthode la plus usuelle pour la mesure de traces de gaz dans l'atmosphère par lidar est la technique dite DIAL (*differential absorption lidar*, lidar à absorption différentielle). Elle permet de mesurer sélectivement la concentration de polluants gazeux. Pour cela, elle compare les signaux lidar à deux longueurs d'onde très proches l'une de l'autre, situées l'une sur une raie d'ab-

sorption du polluant étudié, et l'autre à côté de cette raie. Mais cette méthode est limitée à des polluants qui présentent une raie d'absorption étroite, et exempte d'interférences avec les spectres d'autres composés atmosphériques. Par ailleurs, la nécessité d'ajuster la longueur d'onde laser sur la raie d'absorption interdit la mesure simultanée de plusieurs polluants, ainsi que l'identification d'un polluant inconnu.

### ■ La mesure lidar multi paramètres par lidar basé sur la lumière blanche

Ainsi, le continuum de lumière blanche permet, par exemple, de connaître les processus de nucléation et de maturation des nuages qui jouent un rôle important dans la modélisation de l'atmosphère, que ce soit à l'échelle météorologique ou climatologique. En particulier, la croissance des gouttes et leur densité ont une influence déterminante sur la prévision des précipitations et sur l'albédo terrestre. Leur caractérisation nécessite des mesures continues de la distribution de taille à l'intérieur des nuages à une résolution en rapport avec les vitesses d'évaporation et de croissance, soit quelques dizaines de minutes. Or les mesures aéroportées sont trop coûteuses pour des mesures de routine, et les radiosondages ne peuvent en pratique pas être répétés à la fréquence nécessaire. Les méthodes les plus prometteuses sont donc optiques, et les résultats obtenus avec le laser TeraMobile sont plus que prometteurs : des mesures spectrales à haute résolution sur un intervalle de longueurs d'onde de plus de 200 nm ont fourni non seulement la concentration de vapeur d'eau dans l'air, mais également la température, et donc l'humidité relative. De plus, des mesures angulaires ont donné accès à la distribution de taille des gouttes à l'intérieur d'un nuage.

Ces mesures, qui nécessitent la même source laser et deux détecteurs indépendants, peuvent être réalisées simultanément, de manière à fournir une caractérisation multiparamètre à distance de la microphysique des nuages.

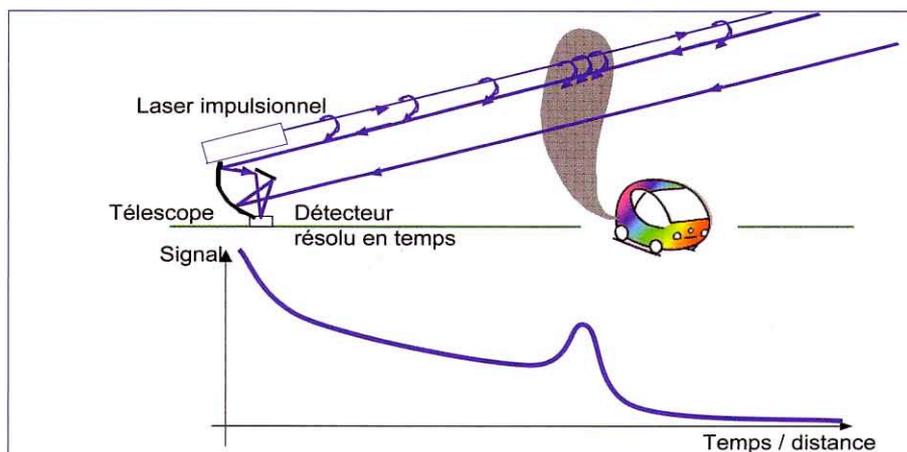


Figure 6. Principe du lidar.

## ■ La télédétection de simulants biologiques par lidar non linéaire

Dans cet exemple de mesure lidar à lumière blanche, la non-linéarité du processus réside dans la génération dans l'atmosphère du continuum de lumière blanche. Cependant, les possibilités offertes par le TéraMobile ne se résument pas au lidar à lumière blanche. Les hautes intensités ( $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>) transportées par les filaments sont en effet suffisantes pour générer in situ sur l'objet à analyser, des effets non linéaires, qui constituent un canal supplémentaire pour la télédétection et la caractérisation à distance. Cette technique a été illustrée par une expérience de télédétection d'aérosol portant des simu-



**Figure 7.** Démonstration de la télédétection de simulants d'aérosols biologiques avec le lidar TéraMobile. Le faisceau laser TéraMobile illumine une chambre à nuages où un brouillard est produit.

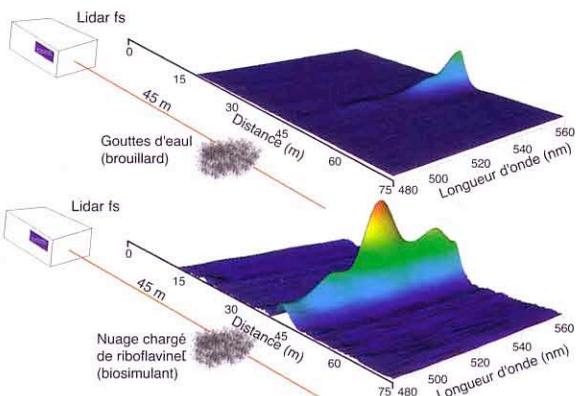
lants biologiques par lidar de fluorescence excitée à deux photons (figure 7). Il s'agit ici de détecter et de localiser rapidement une émission suspecte, de cartographier la dispersion du nuage émis, et d'identifier de potentiels agents pathogènes parmi les divers aérosols atmosphériques de fond, dont certains, comme les suies, sont des composés organiques. Grâce à la fluorescence excitée à deux photons, il a été possible, pour la première fois, de détecter et d'identifier à distance dans l'air des aérosols simulant des agents biologiques par lidar non linéaire (figure 8).

## Contrôler la foudre

### ■ Historique

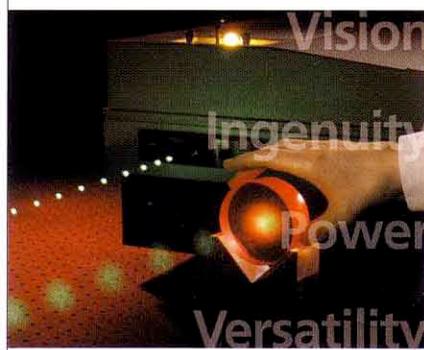
La foudre a toujours fasciné l'homme par sa puissance et son caractère incontrôlable et destructeur. Pour l'étudier, il est nécessaire de la faire tomber à la demande au point voulu (et instrumenté) et à un instant choisi. Dans ce but, EDF et le CEA à Saint-Privat d'Allier (Haute-Loire) ont mis au point dans les années 1970 la technique de déclenchement par fusée-fil. Mais le nombre de fusées disponibles pour un orage est forcément limité, ce qui nécessite de choisir judicieusement l'instant du tir de la fusée et, par ailleurs, la retombée du fil peut représenter une pollution pour l'environnement comme pour la mesure elle-même.

**Figure 8.** Télédétection d'aérosols biologiques. Un nuage d'eau (en haut) ne produit pas de fluorescence, contrairement à un simulant biologique (en bas). Cette fluorescence, détectée en fonction de la distance et de la longueur d'onde, permet d'identifier et de localiser le nuage potentiellement dangereux.

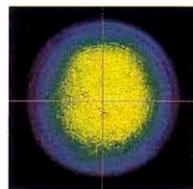


**Continuum**<sup>®</sup>  
An Excel Technology Company

## Powerlite™ PLUS: Ideal for Pumping Ti:Sapphire and OPCPA



### PLUS Means High Energy



Powerlite PLUS beam quality -2 J @ 532 nm

>2J @ 532 nm, most energy  
from any standard platform

High quality beam satisfies  
demanding requirements

Powerlite platform ensures  
robust performance

High energy simplifies  
amplifier design

**EXCEL**  
TECHNOLOGY FRANCE

1. Avenue de Garagliano  
F - 91 600 Savigny sur Orge  
Tel: 0033 (0) 1 69 12 29 80  
Fax: 0033 (0) 1 69 44 85 47  
Email: s.diane@excel-france.com

[www.continuumlasers.com](http://www.continuumlasers.com)

Pour sa part, l'idée de déclencher et de guider la foudre au moyen de lasers est presque aussi ancienne que le laser lui-même. Elle a été proposée il y a plus de trente ans. Le laser peut être tiré en continu, et le tir ne produit pas de déchets. Le principe consiste à utiliser la forte intensité du laser pour ioniser l'air le long du faisceau, et former ainsi un "fil" conducteur qui remplace celui déployé par une fusée. Les premiers essais, dans les années 1970 et 1980, avec des lasers à impulsions nanosecondes ont été infructueux, car les lasers utilisés ne peuvent pas produire de canaux ionisés continus. Plus récemment, l'avènement des lasers ultrabrefs et de forte intensité grâce à la technique CPA, a permis de réaliser plusieurs expériences prometteuses. On peut citer l'équipe de H. Pépin à Montréal qui a pu déclencher et guider des décharges de haute tension sur des distances de plusieurs mètres.

### ■ L'apport du TéraMobile

Les filaments produits dans un faisceau laser faiblement focalisé ont une capacité à se propager à très grande distance y compris à travers des nuages, et une bonne conductivité : ils constituent donc de bons candidats pour le contrôle de décharges. De plus, leur extension spatiale laisse plus facilement envisager une extrapolation au contrôle de foudre en grandeur réelle que les configurations basées sur un laser focalisé.

Le guidage des décharges est certainement l'effet le plus spectaculaire du laser TéraMobile (figure 9). Au lieu de suivre un chemin erratique comme les décharges naturelles, les décharges déclenchées se produisent le long du faisceau laser qui leur a donné naissance. Dans certains cas, la décharge n'est guidée que sur une fraction de la distance entre les électrodes, puis reprend un chemin erratique comparable à celui des décharges naturelles. Ces décharges partiellement guidées fournissent des indications sur le mécanisme d'établissement de la décharge.

Le laser TéraMobile a permis de démontrer le déclenchement et le guidage de décharges de haute tension sur une distance allant jusqu'à 4,5 m, par les filaments autoguidés issus de la propagation non linéaire d'un laser ultrabref et de forte puissance. Les expériences réalisées ont aussi

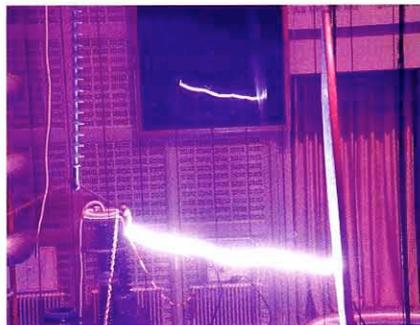


Figure 9 a. En l'absence de laser, la décharge libre a un chemin erratique.

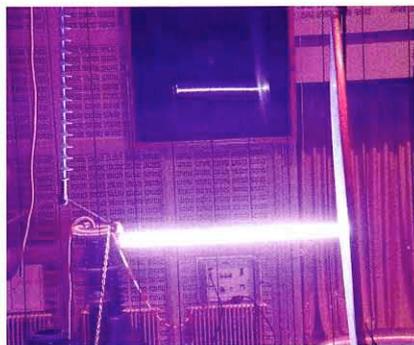


Figure 9 b. Décharge de haute tension guidée par les filaments ionisés générés par le laser femtoseconde TéraMobile.

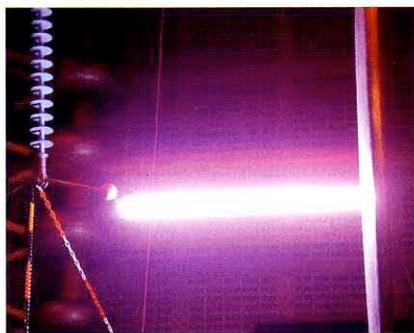


Figure 9 c. Même expérience de décharge guidée, mais sous une pluie artificielle

permis de montrer qu'il est possible de déclencher et de guider des décharges électriques de haute tension à l'échelle de quelques mètres, même en présence de pluie.

Ainsi, les travaux en laboratoire à l'échelle de quelques mètres permettent de se rapprocher progressivement de conditions expérimentales proches de celles qui prévaudraient dans une expérience en grandeur réelle de déclenchement de la foudre. Si elle reste lointaine, cette perspective vieille de trente ans s'est toutefois nettement rapprochée au cours des dernières années.

## Laser induced breakdown spectroscopy (LIBS)

### ■ La technique LIBS

La capacité des impulsions laser femtoseconde à transporter efficacement et à grande distance des intensités pouvant atteindre  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>, illustrée au paragraphe concernant le lidar non linéaire, ouvre également la voie vers d'autres perspectives d'applications. À titre d'exemple, une technique nommée R-FIBS (*remote filament-induced breakdown spectroscopy*, spectroscopie à distance de plasma excité par des filaments) et qui peut être considérée comme un hybride du lidar et du LIBS (*laser induced breakdown spectroscopy*, spectroscopie de plasma excité par laser) a été mise au point grâce au laser TéraMobile. Le LIBS est un outil universel, qui permet une analyse élémentaire en surface de matériaux tels que les métaux, les plastiques, les minéraux, les aérosols, les tissus biologiques ou les liquides. Il repose sur l'ionisation locale de la surface par un laser fortement focalisé, en général un laser impulsif de type Nd:Yag. Le spectre d'émission du plasma ainsi formé en surface permet une analyse rapide, qualitative ou quantitative, avec des limites de détection pouvant atteindre quelques parties par million (ppm) selon les éléments. L'utilisation de lasers à impulsions sub-picoseconde améliore sensiblement la reproductibilité des mesures en limitant le chauffage de l'échantillon. L'utilisation de systèmes de détection à large bande spectrale fait du LIBS un outil très souple dans la mesure où il n'est pas nécessaire de connaître à l'avance les éléments que l'on recherche pour choisir une bande de longueurs d'onde adéquate pour la détection. De plus, aucune préparation préalable de l'échantillon n'est nécessaire.

### ■ L'apport du TéraMobile

Certaines applications telles que l'identification de déchets nucléaires fortement radioactifs ou l'analyse en temps réel d'alliages fondus, nécessitent une mesure à distance. L'absence de préparation des échantillons fait du LIBS un bon candidat dans ce but. En effet, la seule contrainte est d'être en vue directe de l'échantillon. Une telle mesure à distance par LIBS se heurte malgré tout à la

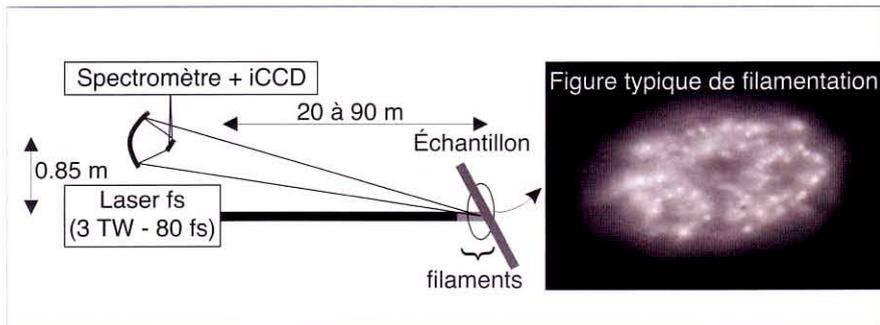


Figure 10. Dispositif expérimental du R-FIBS

diffraction, alliée à la taille nécessairement limitée des optiques, diffraction qui limite intrinsèquement l'intensité qu'il est possible de déposer sur une cible distante de plusieurs dizaines de mètres ou plus.

La R-FIBS se présente donc comme une approche nouvelle pour effectuer des mesures LIBS à distance, en tirant parti des hautes intensités transportées à grande distance dans les filaments générés par un laser à impulsions ultrabrèves tels que le Téra-mobile (figure 10). En effet, l'autoguidage affranchit les filaments de la limite de diffraction et les autorise à transporter sur plusieurs kilomètres des intensités de  $10^{13}$  à  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> nettement supérieures au seuil d'ablation d'échantillons métalliques par des impulsions laser femtosecondes. Des mesures de R-FIBS jusqu'à 90 m ont été réalisées, cette distance étant limitée par l'espace disponible lors de l'expérience. Les données obtenues suggèrent en outre que la technique pourrait être adaptée à l'échelle du kilomètre.

## Perspectives

De par sa mobilité, le Téra-mobile a d'ores et déjà permis d'explorer de nombreuses pistes d'applications pour les lasers femtosecondes térawatt. Le développement de ces applications sera probablement facilité par les progrès attendus dans les années à venir dans la technologie des lasers ultrabrèves : systèmes plus fiables et plus compacts, lasers pompés par diodes, ou encore mise en forme spatiale et temporelle des impulsions laser. La possibilité d'utiliser des longueurs d'onde fondamentales autres que 800 nm émerge également grâce à des alternatives aux chaînes CPA basées sur le Ti:Saphir. En particulier, les dopages à l'ytterbium et la technique dite OPCPA (amplificateur paramétrique d'impulsions à dérive

en fréquence) devraient permettre une émission dans l'ultraviolet, dans un domaine où la sécurité oculaire est plus facile à atteindre.

Après une période exploratoire à laquelle le Téra-mobile a largement contribué, le défi est maintenant de poursuivre ces développements au-delà des démonstrations de principe, afin d'obtenir des mesures suffisamment fiables, précises et reproductibles pour être utiles aux utilisateurs potentiels.

## RÉFÉRENCES

- Kasparian J. Propagation non linéaire d'impulsions laser ultrabrèves dans l'atmosphère et applications. Habilitation à diriger les recherches, université Lyon-1, 2005.
- Kasparian J. Les lasers femtosecondes : applications atmosphériques. *Techniques de l'Ingénieur*, février 2004.
- Wille H, Rodriguez M, Kasparian J, Mondelain D, Yu J, Mysyrowicz A, Sauerbrey R, Wolf J-P et Wöste L. Tera-mobile : a mobile femtosecond-terawatt laser and detection system. *European Physical Journal - Applied Physics* 2002;20:183.
- 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* 2003;301:61-4.
- Stelmaszczyk K, Rohwetter Ph, Méjean G, Yu J, Salmon E, Kasparian J, Ackermann R, Wolf J-P, Wöste L. Long-distance Remote LIBS using Filamentation in Air. *App Phys Lett* 2004;85(18): 3977-9.

**QUANTRONIX**  
An Excel Technology Company

## Scientifiques & Industriels

Lasers 1 à 100KHz  
(Nd:YAG & Nd:YLF)

Pompé flash & Pompé diode

Lasers femtosecondes

Accordabilité de l'UV à l'IR

OEM configuration



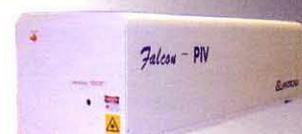
Integra i



Darwin



Topas et Topas white



PIV Haute Cadence > 1 KHz



Q-Mark

**EXCEL**  
TECHNOLOGY FRANCE

1, Avenue de Garagliano  
F - 91 600 Savigny sur Orge  
Tel: 0033 (0) 1 69 12 29 80  
Fax: 0033 (0) 1 69 44 85 47  
Email: s.diane@excel-france.com  
www.quantronixlasers.com