

Canaux sous-denses générés dans l'air par filamentation laser femtoseconde

G. Point¹, C. Milián², A. Couairon², A. Mysyrowicz¹, A. Houard¹

¹ Laboratoire d'Optique Appliquée – ENSTA, Ecole Polytechnique, CNRS – 828 bd des Maréchaux, 91762 Palaiseau cedex

² Centre de Physique Théorique – Ecole Polytechnique, CNRS – Route de Saclay, 91128 Palaiseau cedex

La filamentation laser est un régime de propagation optique spectaculaire atteint pour des impulsions dont la puissance crête excède quelques gigawatts dans l'air à 800 nm. Il résulte en la formation d'un cœur mince (100 μm) et intense (10^{18} W.m^{-2}) pouvant se maintenir sur une distance supérieure à plusieurs longueurs de Rayleigh [1]. Au cours de sa propagation dans l'air, le filament transfère une partie de l'énergie laser au milieu, principalement via l'excitation rotationnelle Raman des molécules d'air, l'ionisation de l'air et l'effet de Bremsstrahlung inverse au sein du plasma. Cette énergie est redistribuée au cours de la nanoseconde suivant le passage du laser, principalement sous forme d'énergie translationnelle des molécules d'air, c'est-à-dire de chaleur [2]. Ce chauffage rapide et très localisé engendre une onde de pression et un canal central d'air de faible densité possédant la même symétrie cylindrique que le filament [3]. Par la suite, ce canal sous-dense se résorbe par diffusion sur des échelles de temps supérieures à la milliseconde. De telles structures hydrodynamiques de longue durée de vie ont été utilisées comme guides d'onde virtuels [4], mais ouvrent aussi des perspectives dans le domaine des décharges haute-tension guidées par filamentation et leurs applications comme le paratonnerre laser [5].

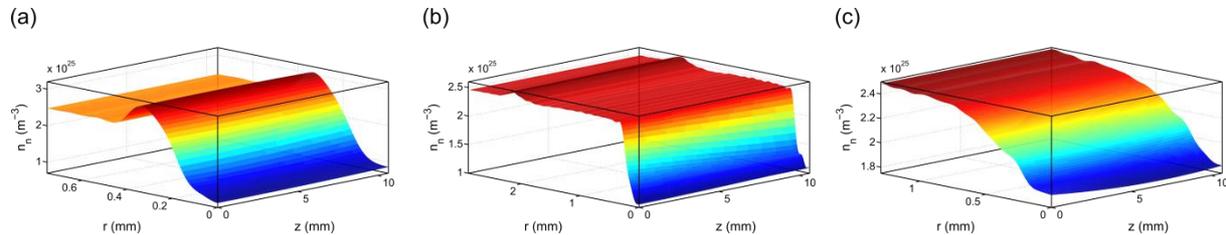


Figure 1 : profils de densité de l'air à 2-D (r, z) résultant de la filamentation d'une impulsion de 5 mJ, 50 fs à 800 nm focalisée à $f/30$ pour un délai de 500 ns (a), 5 μs (b) et 500 μs (c).

Cette étude se focalise sur les canaux d'air sous-denses engendrés par la filamentation d'impulsions laser énergétiques (5 mJ, 50 fs à 800 nm). L'étude fait appel à trois diagnostics : une mesure des ondes de pression générées par filamentation à l'aide d'un microphone, donnant accès à la densité linéique d'énergie laser déposée [6], une analyse spectroscopique du plasma du filament [7], et enfin une mesure résolue en temps des canaux sous-denses par interférométrie transverse suivie d'une inversion d'Abel [8]. Dans le cas d'une focalisation forte de l'impulsion ($f/30$), nous avons mis en évidence des canaux d'une longueur centimétrique avec un taux de déplétion en densité de plus de 60 % par rapport à la densité de l'air dans les conditions normales de température et de pression (figure 1), et perdurant plus de 90 ms. Cette durée est suffisante pour générer un canal d'air sous-dense permanent avec un taux de répétition laser de 10 Hz, similairement à ce que Cheng et al. ont pu montrer à 1 kHz [2]. Les résultats expérimentaux sont comparés à des simulations hydrodynamiques utilisant un code eulérien résolvant les équations fluides par un schéma de Godunov d'ordre 1 [9]. Le meilleur accord est obtenu pour un profil de température initial gaussien d'amplitude

1400 K et d'écart-type 85 μm . Ce niveau de température, supérieur d'un ordre de grandeur à ce qui avait précédemment été évalué dans le cas de filaments résultant d'impulsions d'énergie $\sim 100 \mu\text{J}$ [2], est en bon accord avec une estimation basée sur le dépôt d'énergie total dans l'air et le premier principe de la thermodynamique.

Ce travail a été partiellement financé par la DGA (contrats n° 2013.95.0901, 2012.60.0011 et 2012.60.0013).

- [1] A. Couairon and A. Mysyrowicz, *Phys. Rep.* **441**, 47 (2007).
- [2] Y.-H. Cheng, J. K. Wahlstrand, N. Jhajj and H. M. Milchberg, *Opt. Express* **21**, 4740 (2013).
- [3] J. K. Wahlstrand, N. Jhajj, E. W. Rosenthal, S. Zahedpour and H. M. Milchberg, *Opt. Lett.* **39**, 1290 (2014).
- [4] N. Jhajj, E. Rosenthal, R. Birnbaum, J. Wahlstrand and H. M. Milchberg, *Phys. Rev. X* **4**, 011027 (2014).
- [5] B. Forestier, A. Houard, I. Revel, M. Durand, Y.-B. André *et al.*, *AIP Advances* **2**, 012151 (2012).
- [6] E. W. Rosenthal, J. P. Palastro, N. Jhajj, S. Zahedpour, J. K. Wahlstrand and H. M. Milchberg, *J. Phys. B* **48**, 094011 (2015).
- [7] F. Théberge, W. Liu, P. T. Simard, A. Becker and S. L. Chin, *Phys. Rev. E* **74**, 036406 (2006).
- [8] G. Point, Y. Brelet, L. Arantchouk, J. Carbonnel, B. Prade, A. Mysyrowicz and A. Houard, *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 123101 (2014).
- [9] E. F. Toro, *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics* (Springer, 2009).