

COMPRESSION D'IMPULSION PAR FILAMENTATION : VERS LE CYCLE OPTIQUE

L. BERGÉ*, S. SKUPIN**, G. STEINMEYER***

*CEA - DAM - ÎLE-DE-FRANCE, **MAX-PLANCK INSTITUT FÜR PHYSIK KOMPLEXER SYSTEME, DRESDEN, ALLEMAGNE, ***MAX-BORN INSTITUT FÜR NICHTLINEARE OPTIK, BERLIN, ALLEMAGNE

Des impulsions laser femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) s'auto-focalisent dans une cellule de gaz présentent la particularité de se comprimer en temps après une phase de défocalisation induite par un plasma d'électrons. Cette propriété permet de produire des sources ultrabrèves approchant le cycle optique. Nous présentons des simulations numériques reproduisant les différentes dynamiques qu'une impulsion opérant à 800 nm développe dans une cellule d'argon, impliquant sa phase de filamentation dans le gaz, la traversée de la fenêtre en sortie de cellule, et sa propagation finale dans l'air. Nous montrons que la traversée de la fenêtre élargit significativement l'impulsion, mais que celle-ci se recomprime dans l'air.



Depuis l'avènement des sources laser amplifiées par dérive de fréquence, des progrès considérables ont été réalisés dans le domaine de la compression optique. Des premières impulsions ultrabrèves créées dans des fibres creuses [1] aux techniques récentes exploitant des filaments de lumière intense [2], l'idée omniprésente a été d'accroître largement le spectre optique, de façon à atteindre des durées d'impulsion les plus courtes possibles. Plusieurs phénomènes altèrent la dynamique d'un faisceau laser au cours de sa propagation. En particulier, un faisceau dont la puissance initiale est supérieure au seuil d'auto-focalisation voit son profil spatial se contracter par effet *Kerr*. Cette auto-focalisation conduit à une augmentation de l'intensité laser, jusqu'à l'ionisation des atomes du milieu. Le plasma d'électrons ainsi généré défocalise partiellement l'impulsion. De l'équilibre entre l'auto-focalisation optique et la défocalisation plasma naît un filament de lumière capable de se propager sur de grandes distances. Cette dynamique de filamentation est modélisée à partir d'une équation de *Schrödinger* non linéaire étendue, couplée à une équation source décrivant l'ionisation du milieu.

Un compresseur à filaments

De nombreuses études ont été consacrées à l'auto-compression de la lumière par des filaments [2], [3]. Les taux de compression permettent d'atteindre 2 à 3 cycles optiques pour des impulsions infrarouges ($1 \text{ cycle optique} \approx 3 \text{ fs}$ à 800 nm), offrant ainsi des perspectives prometteuses pour la production d'impulsions attosecondes ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) isolées [4]. Une impulsion s'auto-focalisant subit de la défocalisation plasma, ce qui modifie sa distribution temporelle. Il est possible de raccourcir

efficacement cette distribution en optimisant la phase de diffraction au cours de laquelle les composantes de l'impulsion les moins intenses se dispersent rapidement. L'impulsion résultante présente alors un profil en temps fortement réduit [5]. Un exemple d'auto-compression est montré en figure 1, où une impulsion de durée initiale de 35 fs est focalisée dans une cellule d'argon. La figure 1a montre l'auto-focalisation de l'impulsion et son étape de diffraction lente après défocalisation plasma. L'impulsion se comprime alors sur des durées proches de 6 fs . Celles-ci sont préservées sur quelques dizaines de cm autour de la distance $z = 0,7 \text{ m}$ (figure 1b).

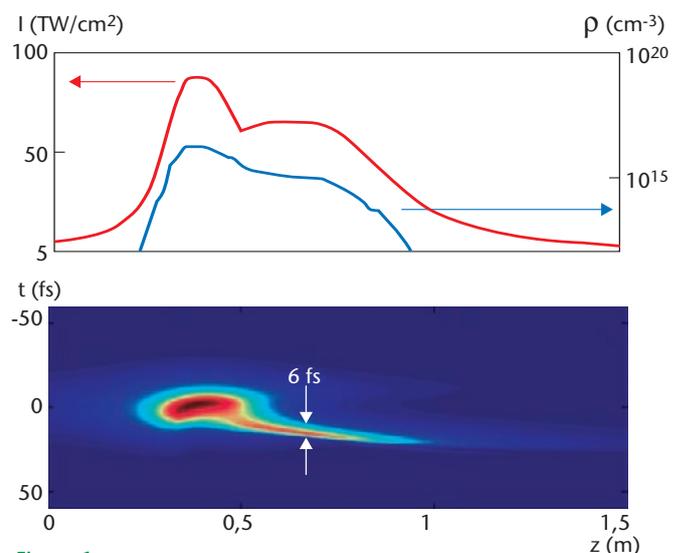


Figure 1
a Intensité maximale (mesurée sur l'axe de gauche) et densité d'électrons (axe de droite) pour une impulsion laser gaussienne de $600 \mu\text{m}$ de diamètre et de 35 fs de durée, opérant à 800 nm et focalisée dans une cellule d'argon de $1,5 \text{ m}$ de longueur.
b Dynamique temporelle de l'impulsion dans le plan (t, z) .

Une auto-compression effective n'est cependant pas garantie : l'impulsion doit en effet traverser la fenêtre de silice obstruant la cellule, puis se propager dans l'air sur les quelques dizaines de cm la séparant des diagnostics. Or, la fenêtre en verre possède une dispersion suffisamment élevée pour au moins doubler la durée du faisceau sur moins d'un mm d'épaisseur. Comme montré en figure 2, deux profils d'impulsions collectés aux distances $z = 1$ m et $z = 1,5$ m de la cellule simulée en figure 1 sont systématiquement élargis à plus de 25 fs en durée, après avoir traversé 0,5 mm de silice seulement.

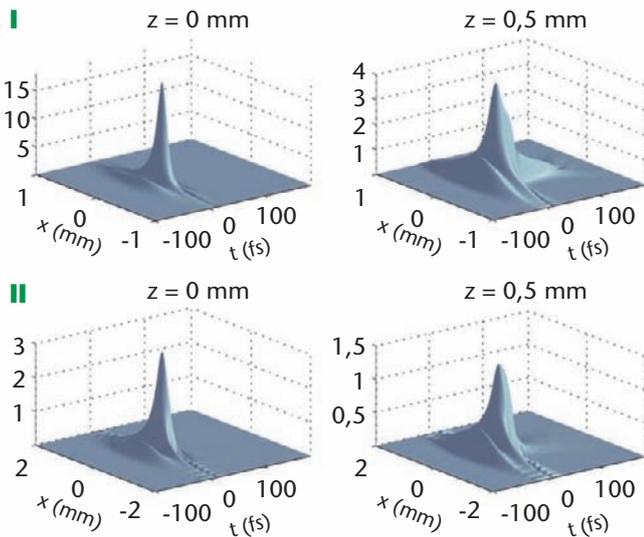


Figure 2
Profils dans le plan (x, t) montrant l'élargissement temporel de l'impulsion simulée en figure 1 et collectée après (I) 1 m et (II) 1,5 m de propagation dans la cellule d'argon.

Néanmoins, l'élargissement induit par la fenêtre de silice peut être compensé durant la dernière étape de propagation atmosphérique [6]. La fenêtre de verre introduit en effet une phase non linéaire dans le faisceau. Cette phase provoque un effet de lentille dans le dernier milieu de propagation, où l'impulsion se refocalise et subit une ultime recompression en temps.

La figure 3 montre à ce propos l'évolution des impulsions (I) et (II) de la figure 2, qui se recompriment dans l'air sur 10 fs environ. Ce comportement justifie les mesures expérimentales rapportées dans [4].

Conclusion

Les études menées en 2008 ont permis de mettre en évidence l'existence d'un régime générique de filamentation au cours duquel une impulsion femtoseconde peut atteindre entre 2 et 3 cycles optiques dans une cellule d'argon [5]. Elles ont aussi démontré la robustesse du phénomène d'auto-compression à travers toutes les étapes de propagation subies par un filament dans cette configuration [6]. Les compresseurs optiques opérant par filamentation sont donc robustes et prometteurs pour la production de nouvelles sources ultrabrèves.

Références

[1] M. NISOLI *et al.*, "Compression of high energy laser pulses below 5 fs", *Opt. Lett.*, **22**, p. 522-524 (1997).
 [2] L. BERGÉ, S. SKUPIN, R. NUTER, J. KASPARIAN, J.-P. WOLF, "Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media", *Rep. Prog. Phys.*, **70**, p. 1633-1713 (2007).
 [3] G. STIBENZ, N. ZHAVORONKOV, G. STEINMEYER, "Self-compression of millijoule pulses to 7.8 fs duration in a white-light filament", *Opt. Lett.*, **31**, p. 274-276 (2006).
 [4] G. SANSONE *et al.*, "Isolated single-cycle attosecond pulses", *Science*, **314**, p. 443-446 (2008).
 [5] L. BERGÉ, S. SKUPIN, "Few-cycle light bullets created by femtosecond filaments", *Phys. Rev. Lett.*, **100**, p. 113902 (1-4) (2008).
 [6] L. BERGÉ, S. SKUPIN, G. STEINMEYER, "Temporal self-restoration of compressed optical filaments", *Phys. Rev. Lett.*, **101**, p. 213901 (1-4) (2008).

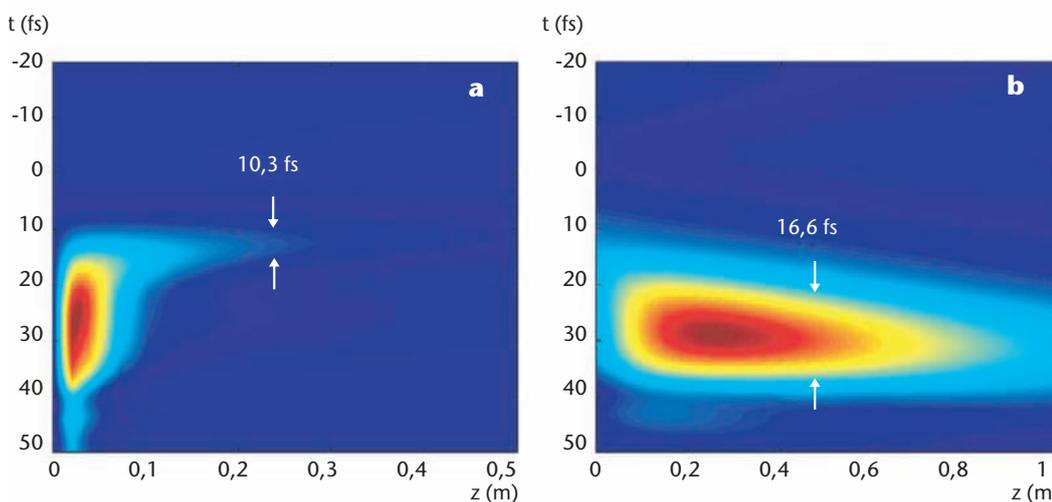


Figure 3
Recompression ultime de l'impulsion :
a (I) de la figure 2 dans l'air.
b (II) de la figure 2 dans l'air.