Soutenance de Thèse Magali DURAND

Filamentation laser femtoseconde IR : Interaction de deux filaments et Source de rayonnement secondaire longue distance

> Directeur de thèse : A. Mysyrowicz Encadrants ONERA : O. Vasseur & A. Durécu



Historique de la filamentation laser

- nouvelles technologies laser
 - 1982 : Laser femtoseconde basé sur le Ti:Sa
 - 1985 : Amplification à dérive de fréquence



Principe de la filamentation Laser



 $P > P_{cr} \sim$ quelques GW dans l'air

- Effet Kerr Important
- Effondrement du faisceau (diamètre de ~100 μm)
- Ionisation du milieu
- Compétition dynamique



Filamentation : Ordres de grandeurs

• Air

- $n_2 = 3,2.10^{-19} \text{ cm}^2/\text{W}$
- P_{cr} = 5 GW

loa

- Diamètre du filament : 100 μm
- Intensité : 5.10¹³ W.cm⁻²

- Solide transparent
 - $n_2 = 3.10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$
 - P_{cr} = 2 MW
 - Diamètre du filament : 10 μm
 - Intensité : ~ 10¹³ W.cm⁻²





Photographies du canal de plasma du filament



Propriétés des filaments

- Maintien d'un cœur intense dans le faisceau sur une longueur excédant largement la longueur de Rayleigh
- Création d'une colonne de plasma
- Génération de rayonnement secondaire
 - Continuum de lumière (de l'UV à l'IR)
 - Emission conique
 - Troisième harmonique
 - Rayonnement THz

Recherches effectuées dans cette thèse

- Interaction de deux filaments laser
 - Y. Liu, M. Durand *et al.*, PRL **105**, 055003 (2010)
 - M. Durand et al., Appl. Phys. Lett. 98, 121110 (2011)
- Interaction entre deux filaments Application au contrôle de rayonnement secondaire
 - Etude de la génération de troisième harmonique par filamentation laser
 - Y. Liu, M. Durand *et al.*, Opt. Commun. **284**, 4706 (2011)
 - Rayonnement THz par bifilamentation

- M. Durand *et al.*, Opt. Lett. **35**, 1710 (2010)
- Filamentation laser dans les solides à différentes longueurs d'onde dans l'infrarouge
 - M. Durand et al., ICOMP 2011, Sapporo, Japan
- Campagne de mesures longue distance Canada-Valcartier (DRDC)
 - M. Durand et al., CThFF3, CLEO 2011, Baltimore, USA

Rayonnement THz par bifilamentation

- Contrôle par résurgence spontanée de l'alignement moléculaire
- M. Durand et al., Opt. Lett. 35, 1710 (2010)



THE FRENCH AFROSPACE LA

- Filamentation de 800 nm à 3,4 µm
- Comparaison filamentation dans les domaines de dispersion normale et anormale
 - · Comparaison du continuum généré par filamentation laser
 - Longueur de filamentation
- M. Durand et al., ICOMP 2011, Sapporo, Japan



Plan de la présentation

- Interaction de deux filaments et réseau de plasma
 - Caractérisation spatiale
 - Interfrange
 - Vitesse de déplacement des franges
 - Durée de vie du réseau de plasma
 - Applications
 - Echange d'énergie
 - Augmentation de la troisième harmonique générée
- Propagation longue distance d'un faisceau TW
 - Caractérisation jusqu'à 1,5 km
 - Continuum généré à distance dans des solides



Plan de la présentation

- Interaction de deux filaments et réseau de plasma
 - Caractérisation spatiale
 - Interfrange
 - Vitesse de déplacement des franges
 - Durée de vie du réseau de plasma
 - Applications

- Echange d'énergie
- Augmentation de la troisième harmonique générée
- Propagation longue distance d'un faisceau TW
 - Caractérisation jusqu'à 1,5 km
 - Continuum généré à distance dans des solides

Mise en évidence du réseau de plasma



- Interaction de deux filaments : les deux faisceaux pompes induisent une figure d'interférence qui sera imprimée sur la densité électronique du plasma
- L'interfrange A dépend de l'angle d'interaction des deux faisceaux et de la longueur d'onde des deux impulsions (800 nm)

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{2sin(\varphi/2)}$$

- Images du réseau de plasma pour deux angles d'interaction différents
 - φ = 6,9° Période du réseau : 6,57 μm Période théorique : 6,65 μm
 - $φ = 10^{\circ}$ Période du réseau : 4,46 μm Période théorique : 4,58 μm

Influence d'une différence de fréquence



loa

- Lorsque les deux faisceaux pompes ont une différence de fréquence $\Delta \omega$, la figure d'interférence de ces deux ondes est modulée par le battement correspondant à cette différence
- Elle se déplace dans la direction k_g avec une vitesse v telle que :

$$v = \frac{\Delta \omega}{k_g} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}$$

→ Déplacement du réseau de plasma nécessaire à l'échange d'énergie



- τ_{d} retard entre les deux impulsions
- L'introduction d'un chirp linéaire permet d'obtenir une différence de fréquences instantanées constante entre les deux impulsions



- Pour caractériser la vitesse de déplacement du réseau de plasma, on utilise une sonde qui sera diffractée par le réseau
- Une sonde à 400 nm superposée à l'un des faisceaux pompes sera diffractée par condition de Bragg dans la direction de l'autre faisceau pompe
- En mesurant le décalage spectral de la sonde à 400 nm, on peut mesurer la vitesse du réseau de plasma

$$\Delta f = \left(v_{grating} \sin(\varphi/2) / c \right) f_0$$

00

Schéma expérimental



- Système laser Thalès Alpha 100 : 10 mJ 40 fs
- Lentilles de focale : f = 1 m

loa

- 1 mJ utilisé pour former chaque filament
- Détection à l'aide d'un spectromètre UV-VIS
- Réseau de plasma généré dans l'Argon

15



- Aucun chirp n'est imprimé aux impulsions => $\Delta \omega$ = 0
- La figure d'interférence ne se déplace pas

loa

• Aucun effet Doppler n'est observé sur la sonde

Différence de fréquence : déplacement du réseau



- On applique un chirp négatif sur les deux impulsions qui ont alors une durée de 92 fs.
- La figure d'interférence se déplace en raison de la différence de fréquence entre les deux impulsions.
- Comme sa source, le réseau de plasma se déplace dans une direction ou l'autre en fonction du retard entre les deux impulsions



Vitesse de déplacement du réseau de plasma



loa

v_{grating} peut être exprimée en fonction des paramètres de la figure d'interférence :

$$v_{grating} = \frac{-c \times \Delta \lambda}{2\lambda \sin(\varphi/2)}$$

$$\Delta \lambda = \lambda_0 C \tau_d / \pi f_0 \tau_p^2$$

• On mesure alors $v_{grating} = -2.3 \times 10^7 \text{ m.s}^{-1} \text{ pour } \tau_d = -100 \text{ fs}$

\rightarrow Très rapide

Caractérisation spatiale \rightarrow Caractérisation temporelle

 Le comportement dynamique de ce réseau de plasma a été déterminé

 Nous allons maintenant déterminer l'évolution temporelle de ce réseau



Plan de la présentation

- Interaction de deux filaments et réseau de plasma
 - Caractérisation spatiale
 - Interfrange
 - Vitesse de déplacement des franges
 - Durée de vie du réseau de plasma
 - Applications

- Echange d'énergie
- Augmentation de la troisième harmonique générée
- Propagation longue distance d'un faisceau TW
 - Caractérisation jusqu'à 1,5 km
 - Continuum généré à distance dans des solides

Evolution temporelle du réseau de plasma

Etude du réseau de plasma \rightarrow diffraction d'une sonde à 400 nm Dans le Ne, Ar, Kr et l'air, O₂, N₂, CO₂



Angles
$$\varphi$$
 = 7°, 14° et 90°



Modélisation approchée de l'évolution temporelle du plasma

- La décroissance de l'efficacité du réseau de plasma est liée à deux mécanismes :
 - La recombinaison des électrons sur les ions parents
 - La diffusion électronique

•
$$n \propto \rho$$
 $\frac{\partial n(t,z)}{\partial t} = D_{diff} \frac{\partial^2 n(t,z)}{\partial z^2} - \beta n^2(t,z)$

– *n* indice de réfraction

- ρ densité électronique du plasma
- D_{diff} coefficient de diffusion
- β coefficient de recombinaison

Comparaison modèle/expérience (1)



Diffusion électronique D_{diff}

Plus l'angle est grand :

loa

- \rightarrow interfrange plus petit
- \rightarrow gradient plus important
- \rightarrow diffusion plus rapide

Recombinaison électron-ion : β





Cas des gaz atomiques



THE FRENCH AEROSPACE LAB

Cas des gaz moléculaires



Evolution temporelle du réseau de plasma

- L'évolution temporelle du réseau de plasma a été étudiée dans différents gaz atomiques et moléculaires
- Cette évolution est dominée par la diffusion électronique dans les gaz atomiques et par la recombinaison électronique dans les gaz moléculaires
- Applications de ce réseau de plasma
 - Echange d'énergie

loa

Emission efficace de troisième harmonique par filamentation laser

Plan de la présentation

- Interaction de deux filaments et réseau de plasma
 - Caractérisation spatiale
 - Interfrange
 - Vitesse de déplacement des franges
 - Durée de vie du réseau de plasma
 - Applications
 - Echange d'énergie
 - Augmentation de la troisième harmonique générée
- Propagation longue distance d'un faisceau TW
 - Caractérisation jusqu'à 1,5 km
 - Continuum généré à distance dans des solides

Généralités sur l'échange d'énergie

- D'après la théorie standard du couplage de deux ondes un échange d'énergie peut se produire :
 - si l'indice non-linéaire du milieu possède une partie retardée
 - si les impulsions interagissant possèdent une différence de fréquence
- La direction dans laquelle l'énergie va être transférée dépend
 - du signe de la différence de fréquence

loa

 du signe de n₂ (un indice de réfraction positif va induire un transfert d'énergie laser de l'impulsion de haute fréquence vers l'impulsion basse fréquence)



Deux mécanismes dans le cas de l'air



Sans filament :

- $P = 0,4 P_{cr}$
- Réseau d'indice par effet Raman
- Bernstein *et al.*

(PRL, 102, 123902 (2009))

 L'impulsion avec la fréquence la plus basse gagnera de l'énergie

Avec filament :

- *P* = 1,8 *P*_{cr}
- L'impulsion avec la fréquence la plus haute gagnera de l'énergie

Nouveau mécanisme



Echange d'énergie dans l'Argon



Sans filament :

- *P* = 0,4 *P*cr
- Pas d'effet Raman
- Pas d'échange d'énergie

Avec filament :

- *P* = 1,8 *P*_{cr}
- Formation d'un plasma
- Echange d'énergie



S : Efficacité de l'échange d'énergie



loa

L'échange d'énergie peut atteindre 50 % d'efficacité





Lorsque l'angle φ diminue $\rightarrow L$ augmente \rightarrow l'efficacité S augmente



Conclusion

- Mise en évidence d'un nouveau mécanisme pour l'échange d'énergie entre deux faisceaux laser
 - basé sur un réseau de plasma

 Devrait être efficace pour tous les milieux permettant la filamentation laser

• Plasma *S* jusqu'à 50% (Bernstein *et al., S* à 7%)

Y. Liu, M. Durand *et al.*, PRL **105**, 055003 (2010)



Plan de la présentation

- Interaction de deux filaments et réseau de plasma
 - Caractérisation spatiale
 - Interfrange
 - Vitesse de déplacement des franges
 - Durée de vie du réseau de plasma
 - Applications
 - Echange d'énergie
 - Augmentation de la troisième harmonique générée
- Propagation longue distance d'un faisceau TW
 - Caractérisation jusqu'à 1,5 km
 - Continuum généré à distance dans des solides



Troisième harmonique générée par filamentation laser

- La filamentation laser permet l'émission efficace de troisième harmonique (266 nm) dans l'air
 - Proposé par N. Aközbek *et al.*, PRL **89**, 143901 (2002)
- Récemment, deux groupes ont signalé une amplification de la génération de troisième harmonique de deux ordres de grandeur en utilisant une seconde impulsion infrarouge intense interceptant le filament
 - S. Suntsov et al., Opt. Express 17, 3190 (2009)

OO

- X. Yang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **95**, 111103 (2009)

Augmentation de la troisième harmonique générée par filamentation laser



Résultats antérieurs

- Yang *et al.* observent une augmentation de la troisième harmonique uniquement pendant le chevauchement des deux impulsions et lorsque les polarisations des deux faisceaux laser sont parallèles
- Suntsov et al. observent une augmentation qui dure au-delà de 50 ps et cela indépendamment de la polarisation des faisceaux

→ Ces observations expérimentales ont conduit à des interprétations différentes :

- 1) la troisième harmonique est générée par le plasma formé à l'intersection des deux impulsions
- 2) l'augmentation de troisième harmonique est due à une augmentation de la longueur du filament

Afin de mieux comprendre ces différents résultats, on effectue une série de mesures en fonction de trois paramètres :

- Polarisation des deux faisceaux
- Retard entre les deux impulsions
- Energie du faisceau intercepteur

=> Ceci va nous conduire à une nouvelle interprétation de ce phénomène d'augmentation



Influence de l'énergie du faisceau intercepteur (1)



Influence de l'énergie du faisceau intercepteur (2)



THE FRENCH AEROSPACE LAR

Influence de l'énergie du faisceau intercepteur (3)



- Mise en évidence de deux régimes
- Résultats de X. Yang *et al.* correspondent aux faibles intensités
- Résultats of S. Suntsov et al. correspondent aux fortes intensités



Interprétation des deux régimes

L'augmentation de la troisième harmonique est due à l'interruption du filament par le faisceau sonde :

- Pour des énergies faibles le filament est interrompu car diffracté par un réseau de plasma
 - L'interruption du filament est sensible à la polarisation respective de chaque faisceau
 - Elle ne dure que pendant le chevauchement des impulsions



- Pour des énergies supérieures le filament est interrompu par le plasma du faisceau intercepteur
 - Insensible à la polarisation

loa

Dure le temps de la durée de vie du plasma





Pour vérifier cette interprétation, on utilise une autre méthode pour interrompre le filament : le filtrage spatial



Filtrage spatial : trou microscopique de la taille du filament



- Une feuille d'Aluminium est insérée au centre du filament de longueur 4 cm
- Le filament creuse progressivement un trou dans la feuille d'Aluminium
 - A. Le filament est bloqué complètement, pas de troisième harmonique
 - B. Uniquement le cœur du filament est transmis au travers d'une petite ouverture, maximum de troisième harmonique
 - C. Le filament et une partie du réseau d'énergie est transmise au travers d'une ouverture plus grande. Une augmentation de la troisième harmonique est toujours observée.



Evolution du 300 le long du filament



- Dans la première partie du filament la troisième harmonique croît puis décroît dans la deuxième partie du filament
- → Cause : interférences destructives



- Les composantes de troisième harmonique générées à l'avant et à l'arrière du filament interfèrent de façon destructive en raison d'un saut de phase de Gouy
- Lorsque le filament est interrompu (par un autre filament, un trou microscopique...) l'effet d'interférence destructive est annulé
- En conséquence, on observe une augmentation de l'émission de troisième harmonique
- Ces interprétations sont validées par des simulations réalisées par Arnaud Couairon du CPHT



Plan de la présentation

- Interaction de deux filaments et réseau de plasma
 - Caractérisation spatiale
 - Interfrange
 - Vitesse de déplacement des franges
 - Durée de vie du réseau de plasma
 - Applications
 - Echange d'énergie
 - Augmentation de la troisième harmonique générée
- Propagation longue distance d'un faisceau TW
 - Caractérisation jusqu'à 1,5 km
 - Continuum généré à distance dans des solides



- Collaboration internationale : DRDC, ISL, ONERA, LOA
- Etude de la filamentation laser sur longue distance
 Influence des paramètres laser
- Pour chaque distance
 - Optimisation de la densité de plasma : émission GHz du plasma
 - Caractérisation des filaments par impacts du faisceau sur papier photosensible
 - Application de la filamentation à la génération de lumière blanche à distance dans les solides

Le système laser canadien

Caractéristiques du T&T

- Energie: 200 mJ
- Durée d'impulsion : 50 fs
- Taux de répétition : 10 Hz



Intérieur du T&T



Profil initial du faisceau laser



Dispositif expérimental





Principe de l'étude

- Contrôle de la distance de filamentation
 - Convergence du faisceau

- Durée d'impulsion initiale : en ajustant le compresseur
- La présence de filaments aux différentes distances est détectée par la mise en évidence de plasma

Détection du plasma par émission GHz

- L'utilisation d'un détecteur à 10 GHz permet d'optimiser la densité locale du plasma à chaque distance
- On optimise les paramètres du faisceau laser pour obtenir le maximum de signal





 Pour chaque distance D_i, on détermine la focale et la durée d'impulsion qui maximise l'ionisation
 ONERA



- Impact d'une impulsion laser sur un papier photographique à 1 km (astigmatisme du faisceau)
- Mesure effectuée pour caractériser la présence de plasma à différentes distances pour chaque distance d'optimisation D_i

G. Méchain et al., Opt. Comm., 247, 171 (2007)

Mesure de la longueur de la zone ionisée

- Pour chaque longueur étudiée on mesure le profil du faisceau à différentes distances par impact sur papier photosensible
- On peut observer deux régimes de propagation distincts : canaux de plasma et canaux de lumière
 - Canaux de plasma : compétition entre effet Kerr et génération de plasma
 - Canaux de lumière : compétition entre effet Kerr et diffraction

```
Canal de plasma
Intensité 5.10<sup>13</sup> W/cm<sup>2</sup>
```



Canal de lumière Intensité 10¹⁰ – 10¹¹ W/cm²



IOG G. Méchain *et al.,* Appl. Phys. B, **79**, 379 (2004)



Longueur de la zone ionisée



- Les canaux de lumière apparaissent après les canaux de plasma en accord avec l'hypothèse qu'un canal de plasma peut évoluer en canal de lumière
- La longueur de la zone ionisée augmente avec la distance focale
- Le nombre de filaments chute entre 150 m et 300 m

Influence du rapport P/P_{cr}

- Le nombre de filaments est proportionnel au rapport de la puissance crête du laser sur la puissance critique P/P_{cr}
- P_{cr} est la puissance critique nécessaire pour l'apparition de la filamentation laser
- Dans l'air P_{cr} = 5 GW



• Le nombre de filaments décroît d'un facteur deux après 200 m.

 \rightarrow en accord avec les mesures GHz

- La diminution du nombre de filaments est due à la diminution de P
- La diminution de P est nécessaire pour repousser le collapse du faisceau



Spectre du continuum généré dans les solides à distance



Spectre du continuum généré dans les solides à 500 m



- Les échantillons plus épais produisent plus de continuum de lumière blanche
- Un continuum est observé de 400 nm à 1 μ m

Conclusion

- Observation de filaments avec ionisation de l'air jusqu'à 1 km
- Confirmation de l'évolution des canaux de plasma en canaux de lumière
- Génération de continuum à très longue distance
- Performances limitées par :

- L'astigmatisme du faisceau laser
- Les turbulences atmosphériques

Conclusion générale et perspectives

- Filamentation longue distance
 - Filamentation jusqu'à 1 km
 - \rightarrow Compensation des turbulences
- Interaction entre deux filaments
 - Réseau de plasma
 - Echange d'énergie (avec une efficacité jusqu'à 50 %
 - ightarrow Utilisation de la vitesse de déplacement du réseau de plasma
- Source de rayonnement secondaire
 - THz par bifilamentation
 - Troisième harmonique
 - \rightarrow Généralisation de la technique à d'autres fréquences
- Filamentation dans les solides
 - Effet de la dispersion (normale / anormale)
 - Longueur de filamentation Spectre de lumière blanche
 - Emission conique
 - $\log \rightarrow$ Mesure d'une auto-compression de l'impulsion en dispersion anormale O_{NERA}

Merci de votre attention

