

PROPAGATION NON-LINEAIRE D'IMPULSIONS LASER ULTRA- COURTES DANS LES MILIEUX TRANSPARENTS

Antoine Vinçotte



DPTA/SPPE/LIRM



Ecole doctorale de Mathématiques
et d'Informatique

LASER FEMTOSECONDE

1^{ères} expériences femtosecondes: années 80

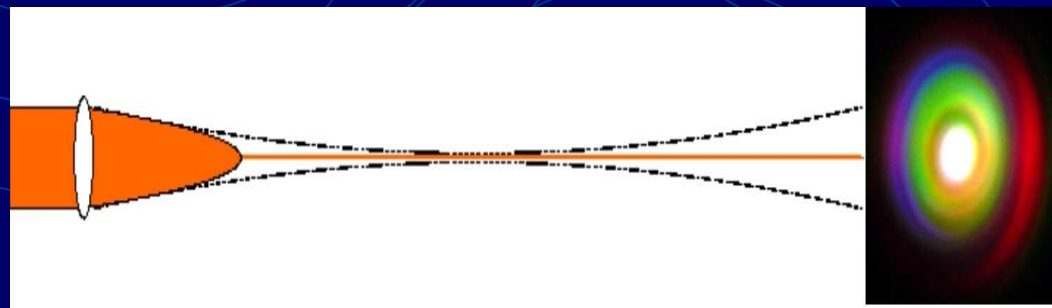
1^{ère} observation canal de lumière auto-guidé laser femtoseconde : Braun *et al.* (1994-1995)

Fortes puissances, durées d'impulsion ultra-courtes

auto-focalisation Kerr (phénomène non-linéaire).../canal plasma ...

Équilibre dynamique

Propagation de l'impulsion sous forme de canal auto-guidé



OBJECTIFS

contrôler la filamentation

Lightning control

LIDAR

Impulsion ultra-courte: durée de l'ordre
de la dizaine ou centaine
de femtosecondes ($1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$)

λ_0 : longueur d'onde centrale (en général 800 nm
laser Ti:Saphir)

w_0 : taille du faisceau

P_{in} : puissance initiale de l'onde (faisceau laser)

P_{cr} : puissance critique d'auto-focalisation

t_p : largeur temporelle de l'impulsion

LE MILIEU

n_0, n_2 : indices linéaire et non-linéaire du milieu

S. Niedermeier, H. Wille, M. Rodriguez, J.
Kasparian and R. Sauerbrey

Friedrich-Schiller-Universität Jena, Institut für
Optik und Quantenelektronik (1997)



- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort
- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle

2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé

3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Equation des ondes

$$\nabla^2 E(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 E(\vec{r}, t) = \mu_0 \partial_t^2 [P_L(r, t) + P_{NL}(r, t)] + \mu_0 \partial_t J(\vec{r}, t)$$

$$\hat{H}(\vec{r}, \omega) = \epsilon_0 [\epsilon(\omega) - 1] \hat{E}(\vec{r}, \omega)$$

$$k(\omega) = \frac{\omega n(\omega)}{c}$$

$$n(\omega) = \sqrt{\epsilon(\omega)}$$

DL. du nombre d'onde

$$k(\omega) = k_0 + k'(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} k''(\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

Hypothèse d'Enveloppe Lentement Variable

$$E(\vec{r}, t) \sim \mathcal{E}(x, y, z, t) e^{i(k_0 z - \omega_0 t)} + \text{c.c.}$$

$$|\partial_{x,y,z} \mathcal{E}| \ll k_0 |\mathcal{E}|$$

$$\partial_t \longrightarrow -i\omega_0 T$$

$$T = 1 + i/\omega_0 \partial_t$$

$$T \approx 1$$

$$|\partial_t \mathcal{E}| \ll \omega_0 |\mathcal{E}|$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

▪ La polarisation non-linéaire

$$P_{NL}(\vec{r}, t) = \cancel{\chi^{(2)}|\mathcal{E}|^2} + \chi^{(3)}|\mathcal{E}|^2\mathcal{E} + \cancel{\chi^{(4)}|\mathcal{E}|^3} + \chi^{(5)}|\mathcal{E}|^4\mathcal{E} + \dots$$

$$P_{NL}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \sqrt{\frac{\omega_0 \mu_0}{2k_0}} 2n_0 n_2 \mathcal{E} \left[(1 - \theta) |\mathcal{E}|^2 + \frac{\theta}{\tau_K} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t-t'}{\tau_K}} |\mathcal{E}(t')|^2 dt' \right]$$

▪ Densité de courant + Réponse plasma

$$\begin{aligned} \partial_t J + \nu_e J &= \frac{q_e \rho}{m_e} E \\ \partial_t \rho &= W(I) \rho_{nt} + \frac{\sigma}{U_i} \rho I \end{aligned}$$

▪ Les pertes par absorption multiphotonique

$$J_{loss} = \sqrt{\frac{k_0}{2\omega_0\mu_0}} U_i \frac{W(I)}{I} \rho_{nt} (\mathcal{E} + \mathcal{E}^*)$$

1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle

2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé

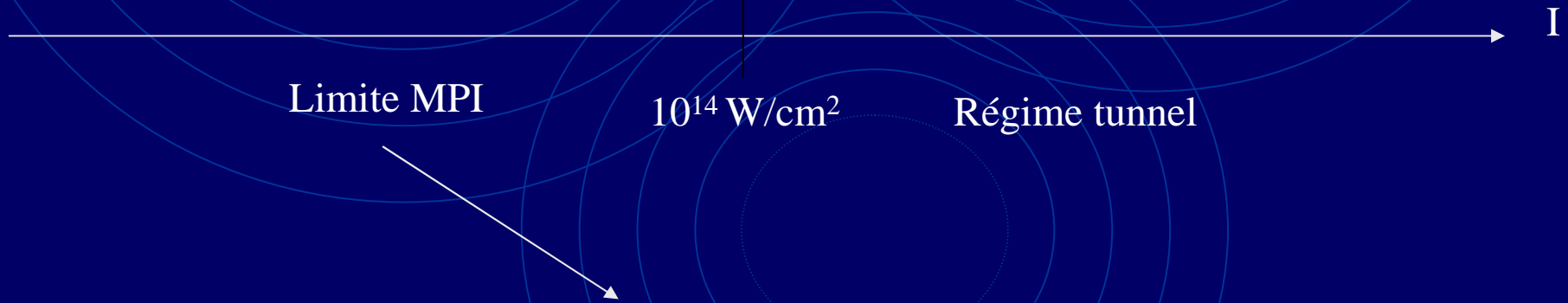
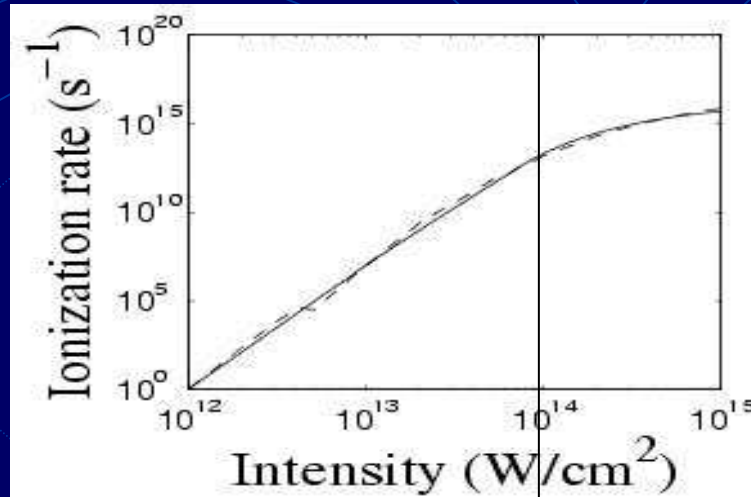
3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine



$$W(I) = \sigma_K |\mathcal{E}|^{2K} \rightarrow K = 8 \text{ pour l'air et } \sigma_K = 2.88 \times 10^{-99} s^{-1} cm^{2K} / W^K$$

1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle

2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé

3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Équation de propagation: l'équation NLS couplée à l'évolution du plasma

$$z \rightarrow \tilde{z}$$

$$t \rightarrow t - \frac{\tilde{z}}{v_g}$$

$$\partial_z \mathcal{E} = i \frac{\Delta_{\perp}}{2k_0} \mathcal{E} - \frac{ik''}{2} \partial_t^2 \mathcal{E} + \frac{ik_0 n_2}{n_0} \left[(1 - \theta) |\mathcal{E}|^2 + \frac{\theta}{\tau_K} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t-t'}{\tau_K}} |\mathcal{E}(t')|^2 dt' \right] \mathcal{E}$$

$$-i \frac{k_0}{2n_0^2 \rho_c} \rho \mathcal{E} - \frac{1}{2} [\sigma \rho \mathcal{E} + \beta^{(K)} |\mathcal{E}|^{2K-2} \mathcal{E}]$$

$$\partial_t \rho = \sigma_K \rho n_t |\mathcal{E}|^{2K} + \frac{\sigma}{U_i} \rho |\mathcal{E}|^2$$

$$\Delta_{\perp} = \partial_x^2 + \partial_y^2$$

$$\mathcal{E}(x, y, z = 0, t) = \mathcal{E}_0 e^{-\left(\frac{x^2}{w_{0x}^2} + \frac{y^2}{w_{0y}^2} \right) - \frac{t^2}{t_p^2}}$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

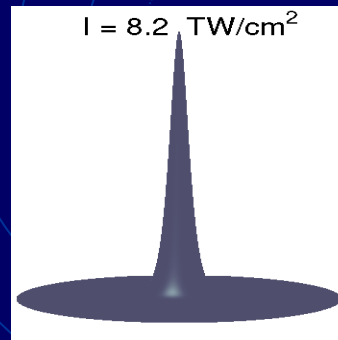
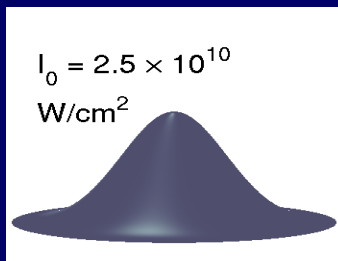
NLS $i\partial_z \Psi + \Delta_{\perp} \Psi + |\Psi|^2 \Psi = 0$

1. Intégrales conservées $P_{\perp} \equiv \int |\Psi|^2 dr$, Hamiltonien $H \equiv \int (|\nabla_{\perp} \Psi|^2 - |\Psi|^4/2) dr$

2. Identité du « Viriel » $d_z^2 \int r_{\perp}^2 |\Psi|^2 dr = 8 H < 0 \Rightarrow$ Collapse à distance z_c finie

Inégalité de Sobolev : $\|\Psi\|_4^4 \leq C \|\nabla_{\perp} \Psi\|_2^2 \|\Psi\|_2^2$

$H \geq \int |\nabla_{\perp} \Psi|^2 dr \times (1 - P_{\perp}/P_c) \Rightarrow P_{\perp} > P_c$: Condition nécessaire de collapse



$$|\Psi(\vec{r}, z, t)| \rightarrow \frac{1}{R(z, t)} \Phi(\xi)$$

$$\xi = r/R(z, t)$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Distance de collapse et puissance critique en unités physiques

Puissance critique

$$P_{cr} = 3.72\lambda_0^2 / (8\pi n_0 n_2)$$

formule de Marburger

$$z_c = \frac{0.367z_0}{\sqrt{\left(\sqrt{\frac{P_{in}}{P_{cr}}} - 0.852\right)^2 - 0.0219}}$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Collapse pour les faisceaux avec profil temporel Gaussien

au voisinage du collapse

$$|\Psi(\vec{r}, z, t)| \rightarrow \frac{1}{R(z, t)} \Phi(\xi) e^{-t^2}$$

$$\xi = r/R(z, t)$$

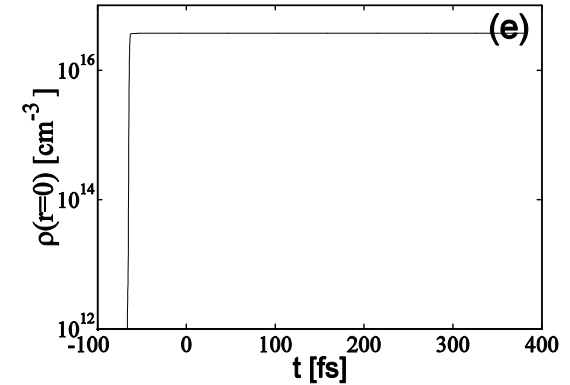
$$\frac{P_{in}}{P_{cr}} \rightarrow \frac{P_{in}}{P_{cr}} e^{-2t^2}$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

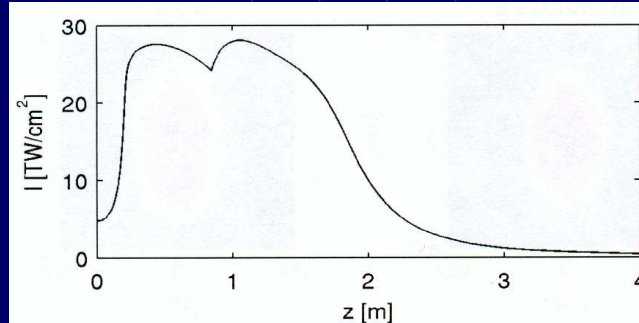
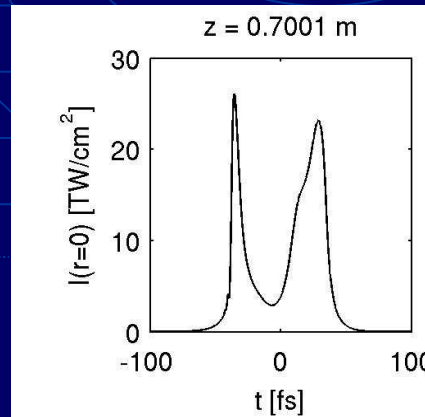
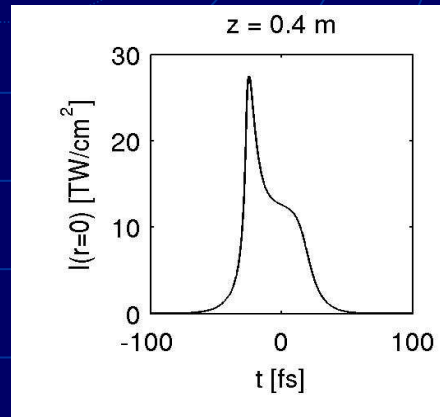
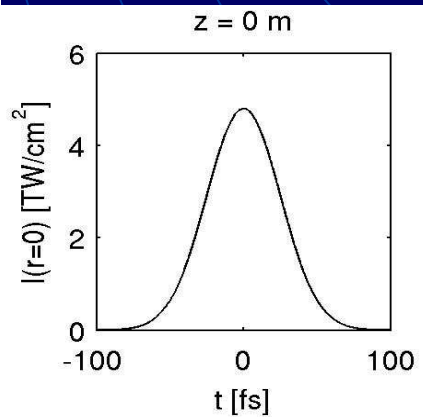
$$\begin{cases} i\partial_z \Psi + \Delta_{\perp} \Psi + |\Psi|^2 \Psi - \rho \Psi = 0 \\ \partial_t \rho \propto |\Psi|^{2K} \end{cases} \quad \text{Génération de plasma}$$

$$\longrightarrow \rho \propto \left(\frac{P_{in}}{P_{cr}} \Phi^2 \right)^K \frac{\text{erf}(\sqrt{2K}t) + 1}{R^{2K} [z_c(t) - z]}$$



profil temporel à 2 pics

front d'ionisation



cycles de focalisation-défocalisation

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Non-linéarité optique d'ordre élevé

- 1) Polarisation non-linéaire
- 2) Seuil d'intensité
- 3) Simulations avec le code radial
- 4) Comparaison avec les expériences

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

1) Polarisation non-linéaire

$$P_{NL} = \sum_k \chi^{(2k+1)} |\mathcal{E}|^{2k} \mathcal{E}$$

$$\frac{\chi^{(2k+1)}}{\chi^{(2k-1)}} \cdot \frac{E^{2k+1}}{E^{2k-1}} = \left(\frac{E}{E_{at}}\right)^2 \ll 1 \quad E_{at} \cong 3 \times 10^8 \text{ V/cm}$$

$$P_{NL} = \chi^{(3)} |\mathcal{E}|^2 \mathcal{E} + \chi^{(5)} |\mathcal{E}|^4 \mathcal{E}$$

$\chi^{(5)} < 0$ saturation quintique (défocalisante)

$\chi^{(3)} > 0$ Effet Kerr (focalisant) $\chi^{(3)} \rightarrow n_2 = 4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2/\text{W}$

$$n_4 = \frac{5|\chi^{(5)}|}{4n_0^3 c^2 \epsilon_0^2}$$

Indice optique effectif

$$\rightarrow \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_2}{2} \left[|\mathcal{E}(t)|^2 + \frac{1}{\tau_K} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t-t'}{\tau_K}} |\mathcal{E}(t')|^2 dt' \right] - n_4 |\mathcal{E}|^4 - \frac{\rho}{2\rho_c}$$

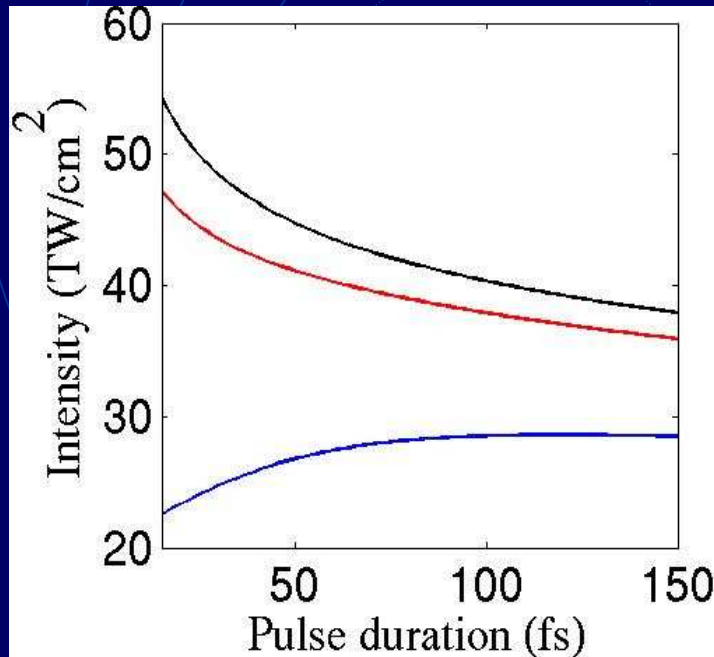
- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

2) Seuil d'intensité I_{th}

Impulsion Gaussienne :

$$\mathcal{E} = \sqrt{I_0} e^{-\frac{t^2}{t_p^2}}$$



Seuil d'intensité I_{th} solution de

$$\frac{\Delta n}{n_0} = 0 \rightarrow AI - \frac{\rho_{nt} t_p}{2\rho_c n_2} W(I) - B(n_4) I^2 = 0$$

$$n_4 = 0$$

$$n_4 = 2.5 \times 10^{-33} \text{ cm}^4/\text{W}^2$$

$$n_4 = 1 \times 10^{-32} \text{ cm}^4/\text{W}^2$$

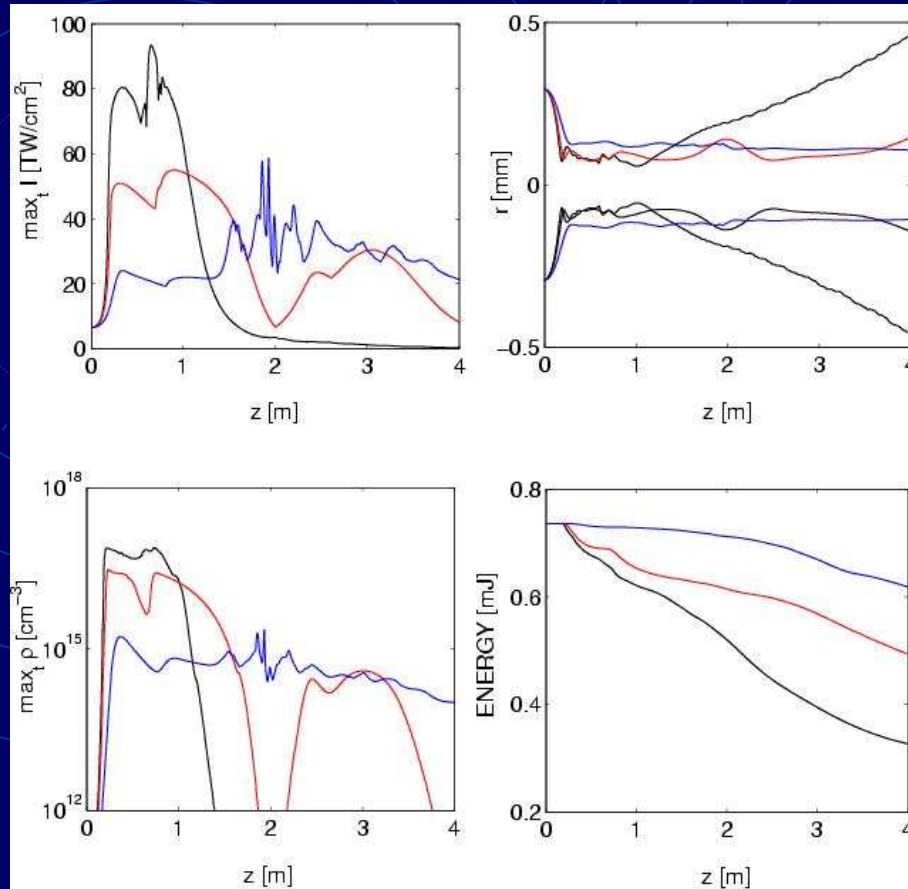
$\chi^{(5)}$ n'est pas négligeable

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

3) Simulations avec le code radial

$w_0 = 0.5 \text{ mm}$
 $t_p = 42 \text{ fs}$
 $P_{in}/P_{cr} = 10$



symétrie cylindrique

$$\nabla_{\perp}^2 = \frac{1}{r} \partial_r (r \partial_r)$$

$$n_4 = 0$$

$$n_4 = 2.5 \times 10^{-33} \text{ cm}^4/\text{W}^2$$

$$n_4 = 1 \times 10^{-32} \text{ cm}^4/\text{W}^2$$

Seuil d'intensité abaissé par la saturation non-linéaire $\chi^{(5)}$

Génération de plasma plus faible

Pertes d'énergie plus faibles

Distance de propagation augmentée

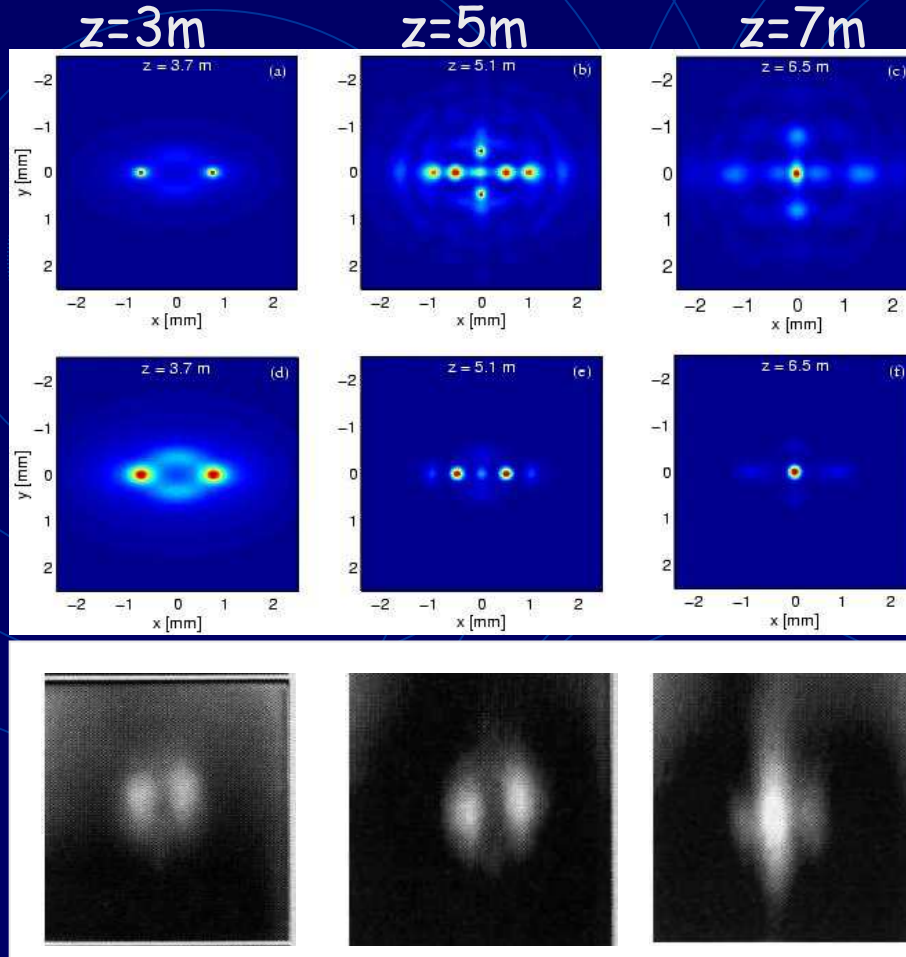
$$\Delta z \sim \frac{1}{\beta^{(K)}} \times \frac{1}{I_{\max}^{K-1}}$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

4) Comparaison avec les expériences

$w_0 = 3 \text{ mm}$
 $t_p = 42 \text{ fs}$
 $P_{in}/P_{cr} = 28$



pas de saturation $\chi^{(5)}$

saturation $\chi^{(5)}$ forte

Résultats expérimentaux
(LOA)

fusion de 2 spots
= résultat générique

avec saturation $\chi^{(5)}$:

Scénario de filamentation plus conforme aux expériences

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Filamentation de faisceaux comportant des Gradients

1) Modèle réduit 2D

2) Gradients forts

2D vs 3D

3) Super-Gaussiennes

influence de t_p

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

1) Le modèle réduit (2+1)-D

$$E(x, y, z, t) = \psi(x, y, z) e^{-\frac{[t-t_c(z)]^2}{T^2}} \quad T = \frac{t_p}{10}$$



$$i\partial_z \Psi + \Delta_{\perp} \Psi + f(|\Psi|^2) \Psi + i\nu |\Psi|^{2K-2} \Psi = 0$$

$$f(|\Psi|^2) = \alpha |\Psi|^2 - \varepsilon |\Psi|^4 - \gamma |\Psi|^{2K}$$

$$\alpha \sim n_2 \quad \varepsilon \sim n_4 \quad \gamma \quad \nu$$

1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle

2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé

3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

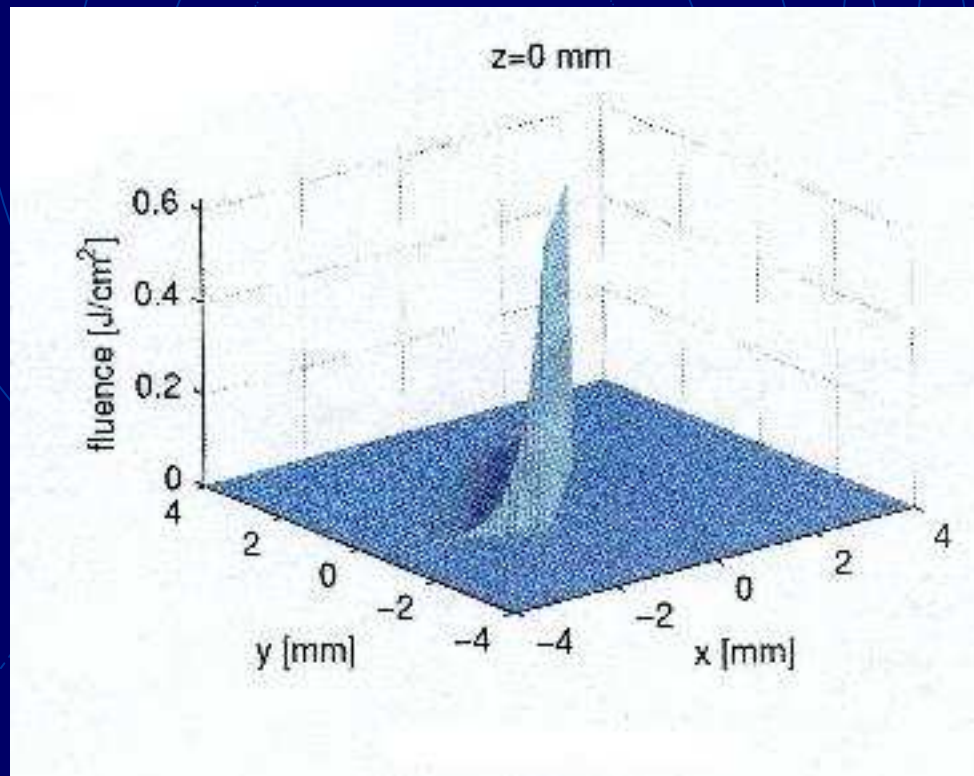
4) Vortex Optiques

5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

2) Gradients forts



$$P_{cr} \sim 2.54 \text{ GW}$$

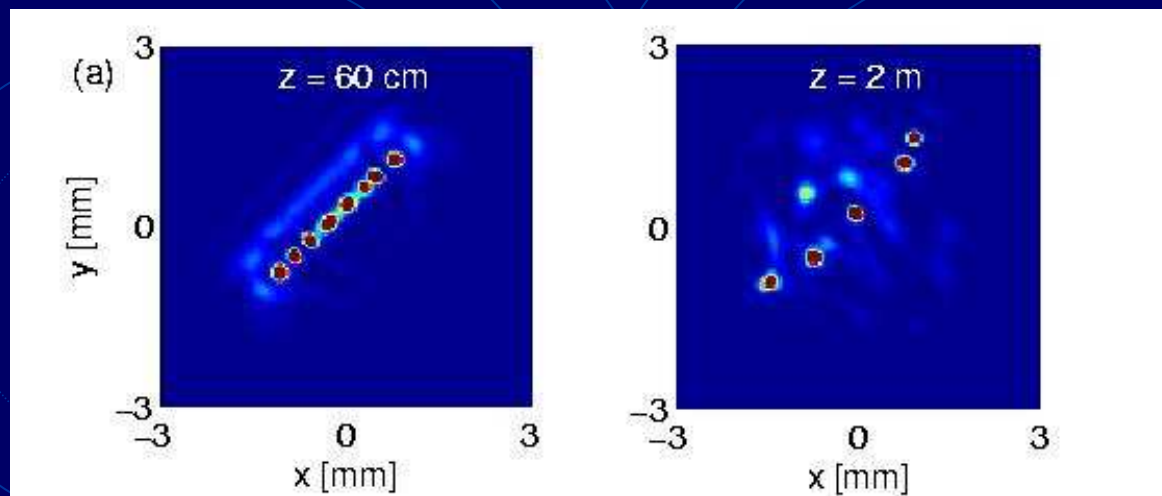
$$P_{in} = 60 P_{cr}$$
$$t_p = 250 \text{ fs}$$
$$w_0 = 3 \text{ mm}$$

+ PROPAGATION 2D/ 3D ...

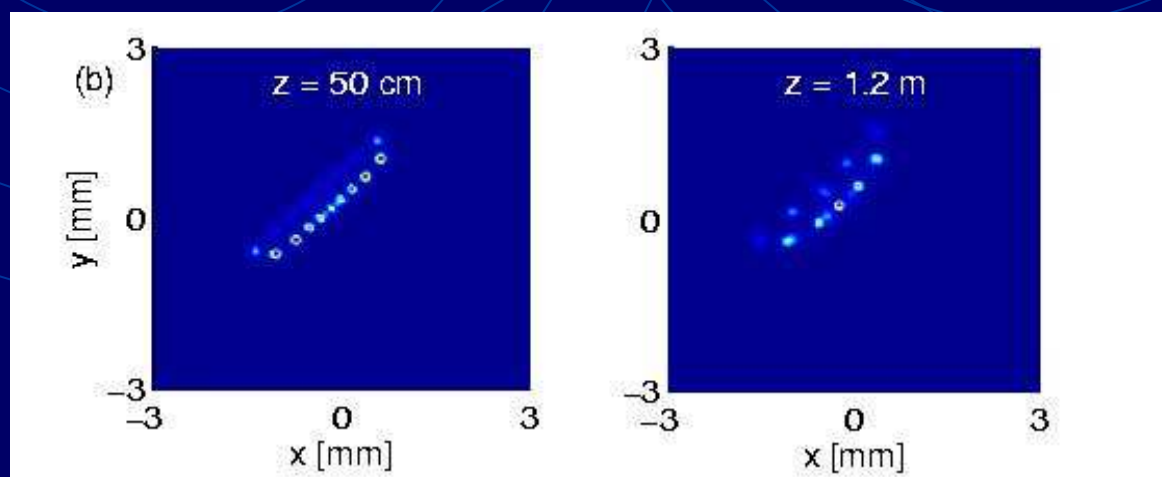
- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

2D →



3D →



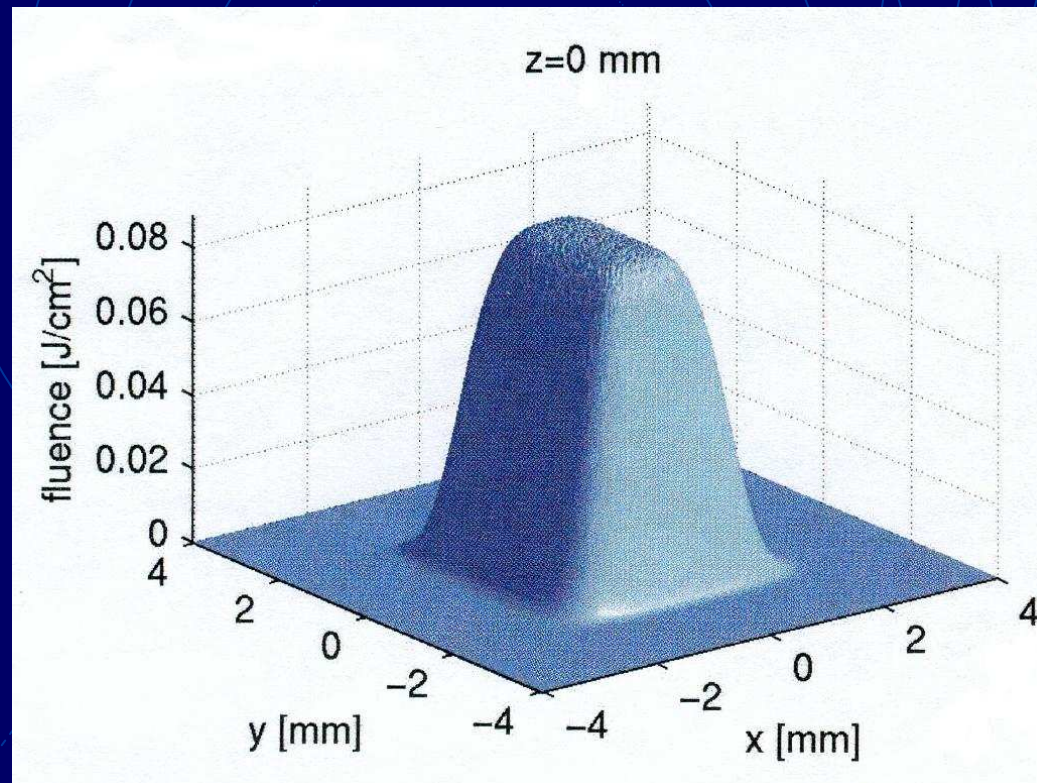
➤ $N_{\text{fil}} = P_{\text{in}} / P_{\text{fil}} \approx (P_{\text{in}} / P_{\text{cr}}) \alpha / 2.65 \approx 9$ bon accord avec les simulations

$\alpha \approx 0.37$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

2) Super-Gaussienne



$$P_{cr} \sim 2.54 \text{ GW}$$

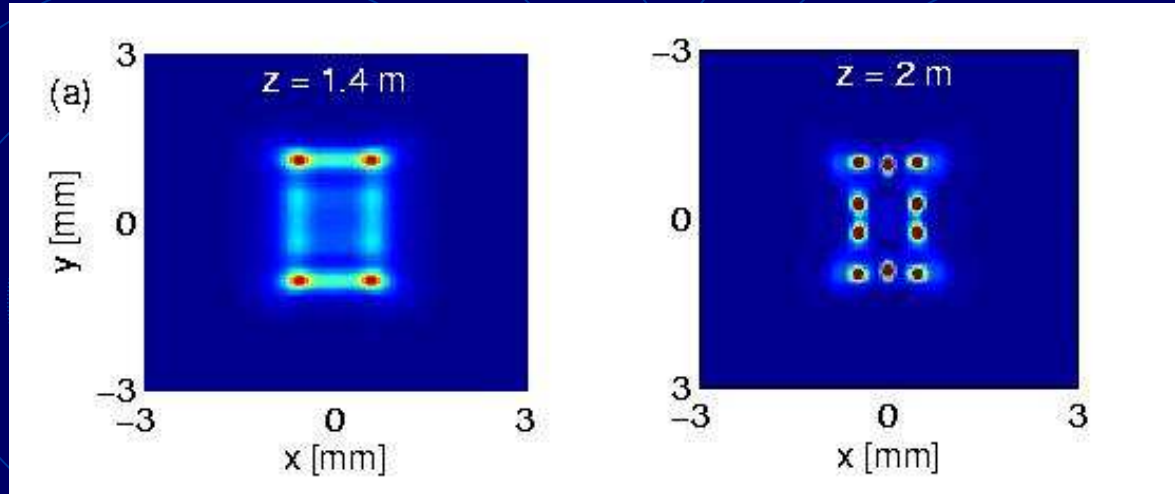
$$P_{in} = 60 P_{cr}$$
$$t_p = 42.5 \text{ fs}/250 \text{ fs}$$
$$w_0 = 3 \text{ mm}$$

+ PROPAGATION 2D...

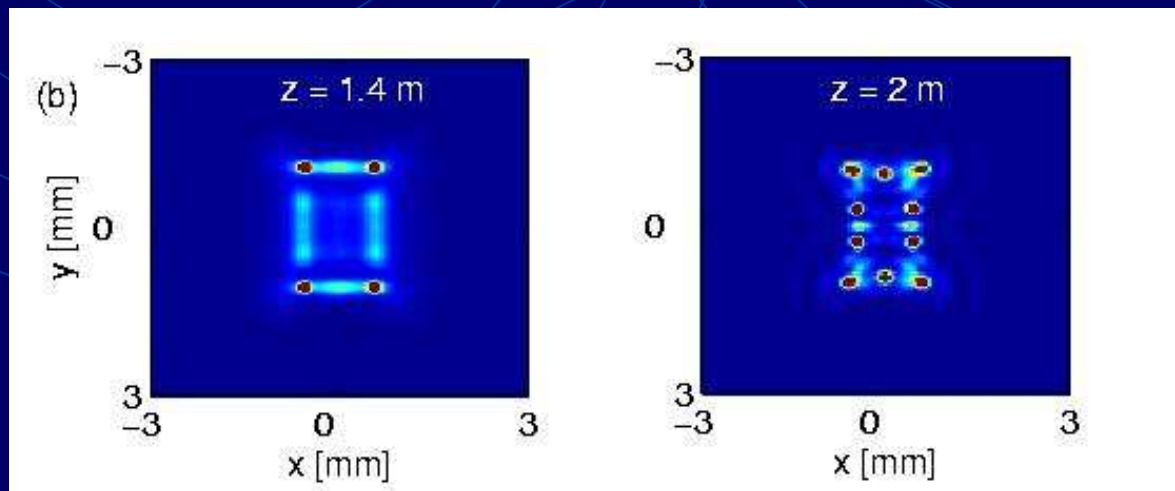
- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard
 - Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

$t_p = 42.5 \text{ fs}$



$t_p = 250 \text{ fs}$



➤ $N_{\text{fil}} \sim \alpha(t_p \text{ grand}) / \alpha(t_p \text{ petit}) \sim 1.2$

➤ $z_{\text{fil}} \sim P_{\text{cr}} / P_{\text{in}}$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences
- Multifilamentation à travers le brouillard

- Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

VORTEX OPTIQUES FEMTOSECONDES

1) Théorie: construction analytique

2) Analyse de stabilité

3) Simulations/Expériences

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences
- Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

1) Construction analytique de vortex optiques

$$\Psi_{m,\lambda} = A_{m,\lambda} r^{|m|} \exp\left(-r^2/(2a_{m,\lambda}^2) + im\theta + i\lambda z\right)$$

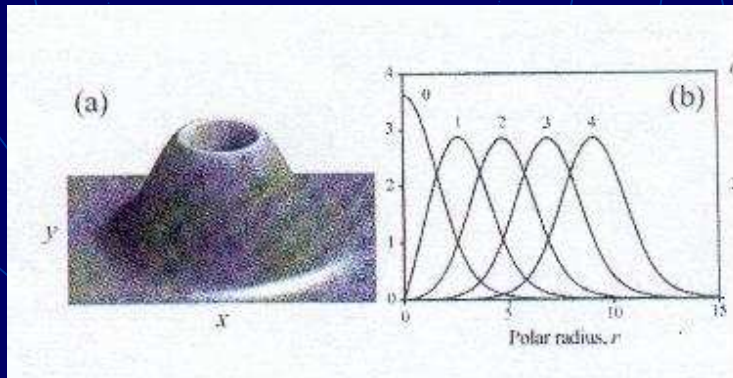
Amplitude

Rayon du vortex

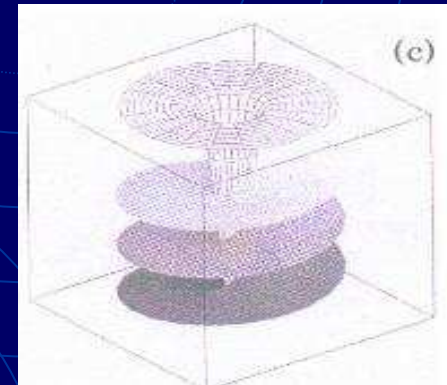
Charge topologique

Angle azimuthal

Paramètre soliton



Amplitude du vortex et distribution radiale



Front d'onde hélicoïdal

Hamiltonien
$$H_{m,\lambda} = 2\pi \int_0^\infty \left[|\partial_r \Psi_{m,\lambda}|^2 + m^2 |\Psi_{m,\lambda}|^2 / r^2 - \int_0^{\Psi_{m,\lambda}} f(u) du \right] r dr$$

Puissance
$$P_{m,\lambda} = 2\pi \int_0^\infty |\Psi_{m,\lambda}|^2 r dr$$

$$\longrightarrow \delta (H_{m,\lambda} + \lambda P_{m,\lambda}) = 0$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

2) Analyse de stabilité

- Perturbation azimuthale sur un anneau (index azimuthal M)
- Intensité constante et uniformité spatiale sur l'anneau (cf. théorie des ondes planes)

$$\Psi = (\Psi_0 + \delta\Psi_1 e^{-i\mu z + iM\theta} + \delta\Psi_2^* e^{i\mu^* z - iM\theta}) e^{i\lambda z + im\theta}$$

Ground state
(solution exacte de NLS)

Perturbation

Taux de croissance de la
perturbation

Index azimuthal de
la perturbation

$$\begin{pmatrix} -\lambda + \hat{D}_{m+M} + f(\Psi_0^2) + \Psi_0^2 f'(\Psi_0^2) & f'(\Psi_0^2) \Psi_0^2 \\ -f'(\Psi_0^2) \Psi_0^2 & \lambda - \hat{D}_{m-M} - f(\Psi_0^2) - \Psi_0^2 f'(\Psi_0^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta\Psi_1 \\ \delta\Psi_2 \end{pmatrix} = -\mu \begin{pmatrix} \delta\Psi_1 \\ \delta\Psi_2 \end{pmatrix}$$

$$\hat{D}_m = -m^2 / \bar{r}_{m,\lambda}^2$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

$$\text{Im}(\mu) = \frac{M}{r_{m,\lambda}} \text{Re} \left[2f'(|\Psi_0|^2) |\Psi_0|^2 - \frac{M^2}{r_{m,\lambda}^2} \right]^{1/2}$$

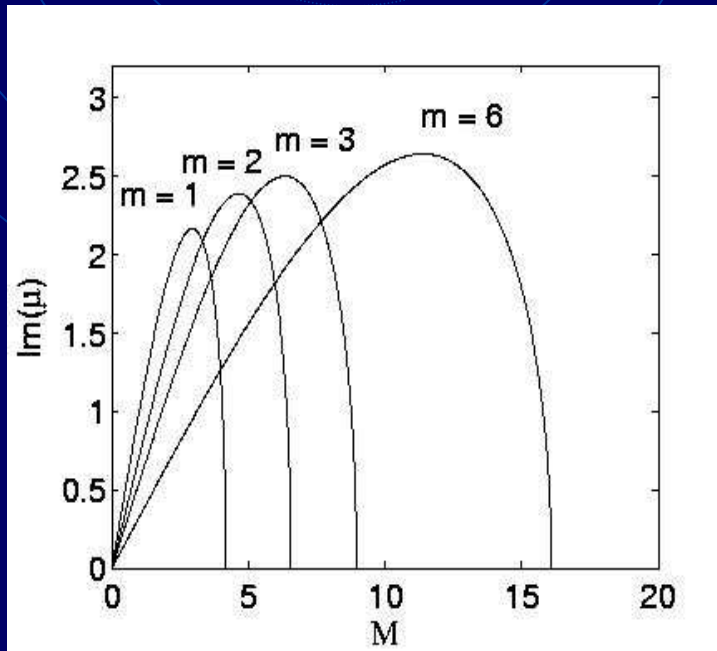
$t_p = 250 \text{ fs}$

$w_0 = 3 \text{ mm } \lambda = 1 \text{ saturations faibles}$

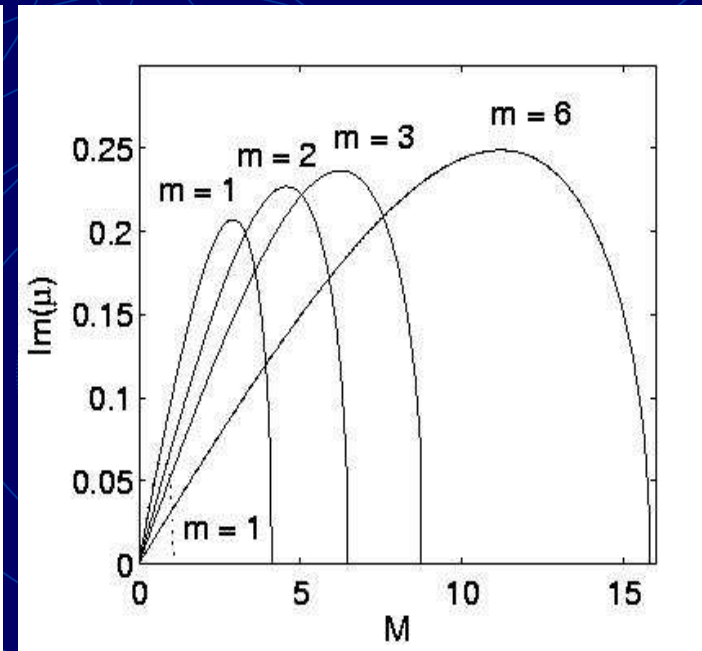
$w_0 = 50 \text{ } \mu\text{m } \lambda = 0.1 \text{ saturations fortes}$

→ α (cubique)

→ α, ε (cubique-quintique)



$M_{max} \sim 2m+1$



$M_{max} \sim 2m$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences

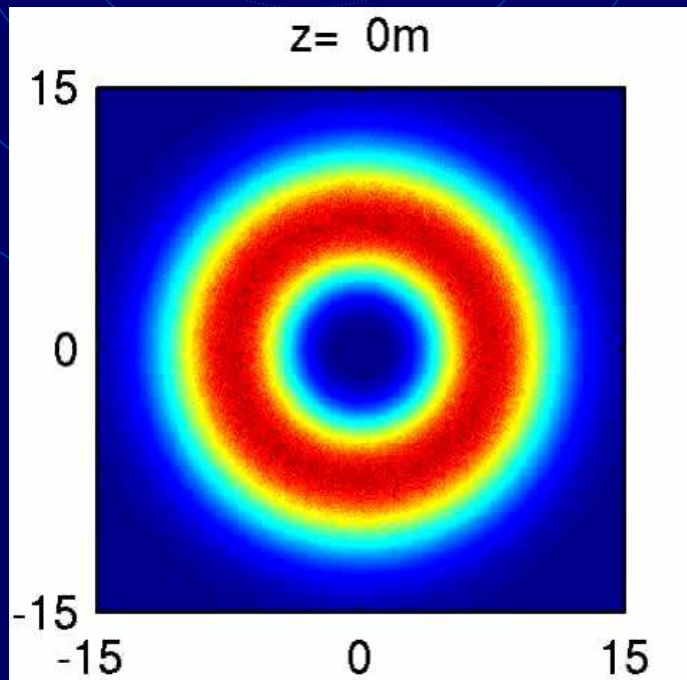
➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

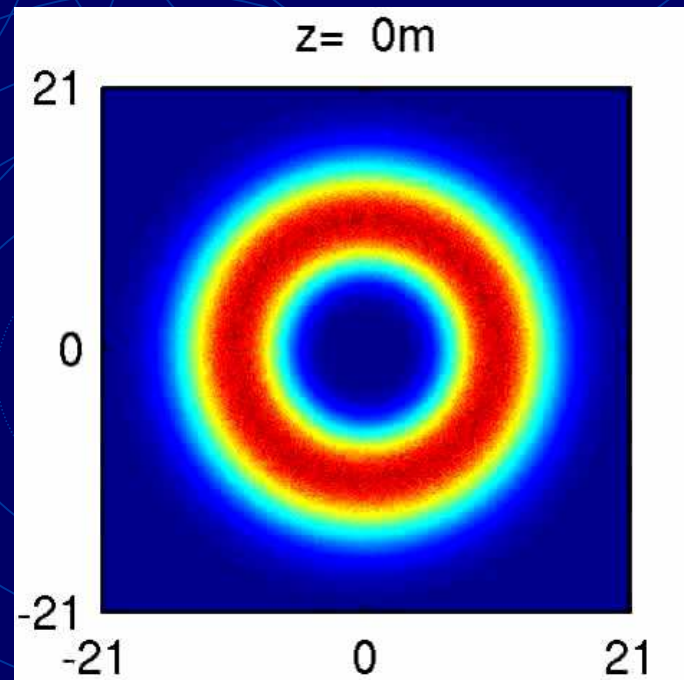
3.1) Simulations 2D de vortex optiques

$$E(z = 0) = A_{m,1} (r/w_0)^{|m|} e^{-r^2/(2\bar{r}_{m,1}^2) + im\theta}$$

$m = 2$



$m = 3$



- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

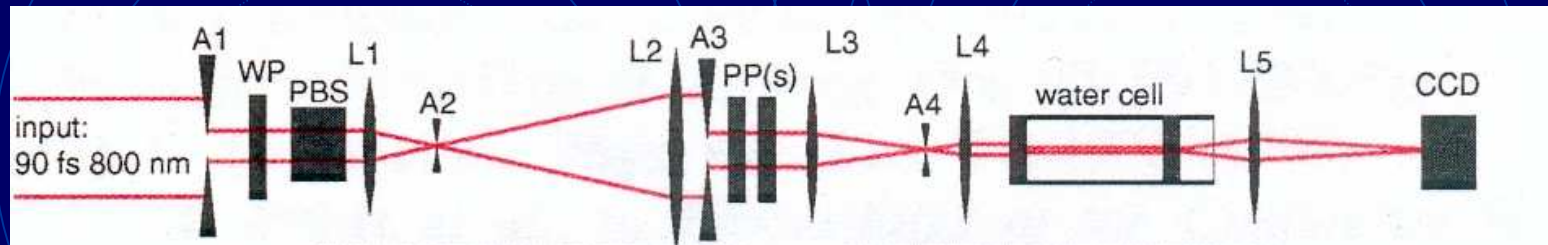
4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

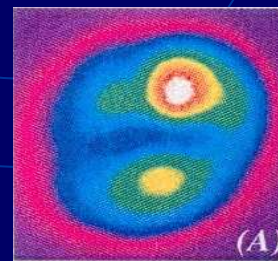
➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

3.2) Expériences/Simulations 2D de vortex optiques

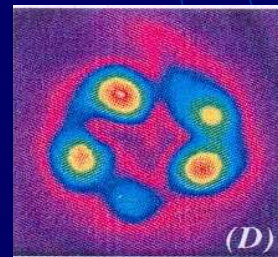


Dispositif expérimental pour la génération de vortex
 Vuong *et al.* PRL 96 (2006)

Expérience

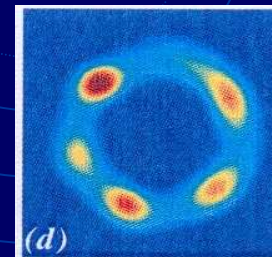
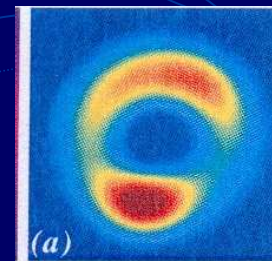


$m = 1$



$m = 2$

Simulations



- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences

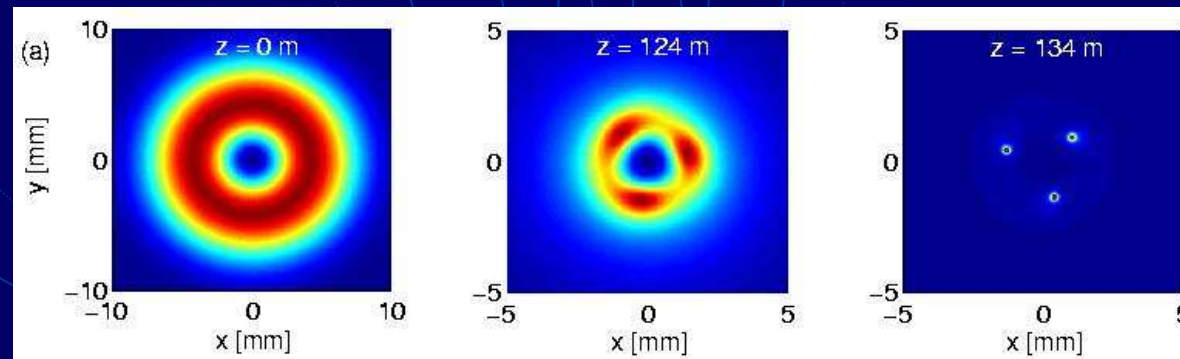
➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

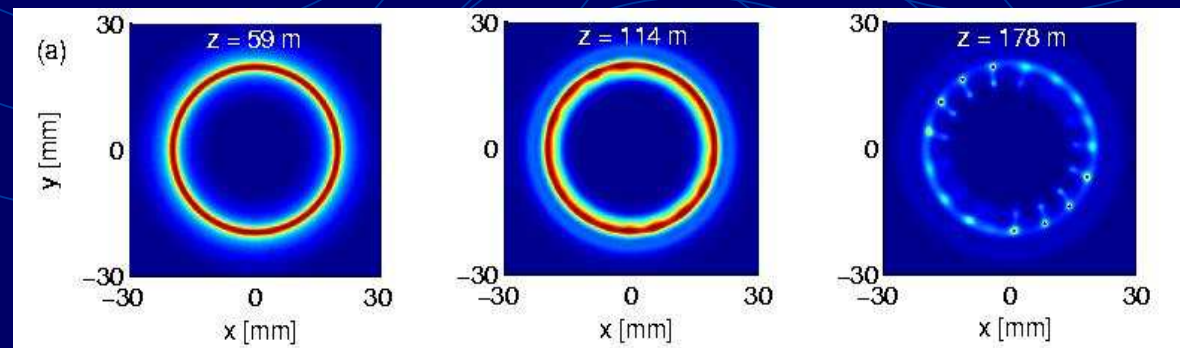
3.3) Simulations 3D de vortex optiques

$$E(z=0) = A_{m,1}(r/w_0)^{|m|} e^{-r^2/(2\bar{r}_{m,1}^2)+im\theta} \times e^{-t^2/t_p^2} \quad w_0 = 3\text{mm}, t_p = 250\text{ fs}$$

$m = 1 (P_1 = 9P_{cr})$



$m = 6 (P_6 = 70P_{cr})$



Nombre de modulations $\sim 2m+1$

→ forme « vortex » assurant la stabilité et la propagation sur de grandes distances.

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

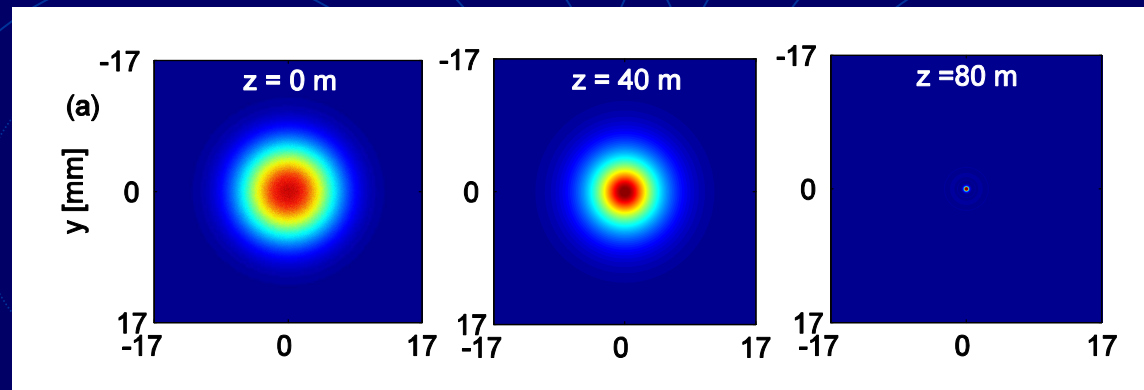
4) Vortex Optiques

- 5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

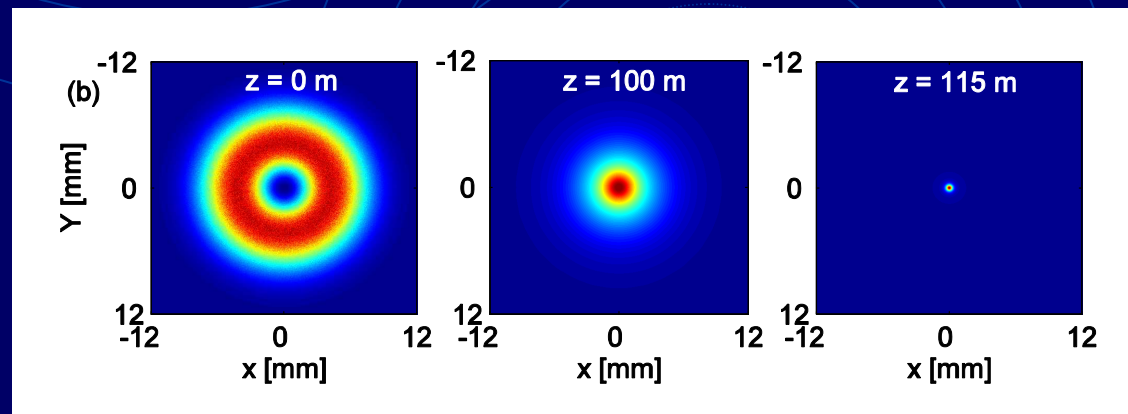
➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

FILAMENTATION DE GAUSSIENNE



$$t_p = 250 \text{ fs}, P_{\text{in}} = 9 P_{\text{cr}}$$

FILAMENTATION D'ANNEAU OPTIQUE SANS ROTATION



Anneau: forme radiale = vortex, $t_p = 250$ fs, pas de rotation

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

PROPAGATION A TRAVERS LE BROUILLARD



Dispositif expérimental

Distance de filamentation

40 m propagation libre

Teramobile

Gouttelettes
d'eau μmétriques

10 m

$$\lambda = 800 \text{ nm}$$

$$t_p = 600 \text{ fs}$$

$$w_0 = 1.5 \text{ cm}$$

$$P_{in} (\sim \text{TW}) \rightarrow 120 P_{cr}$$

Brouillard synthétique homogène

• 50 % transmission :

Densité de gouttes = $2.2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$

Méchain et al. PRE 72 (2005)

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

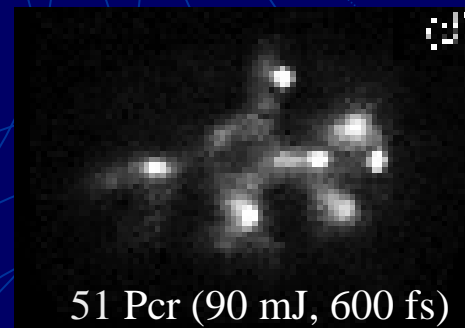
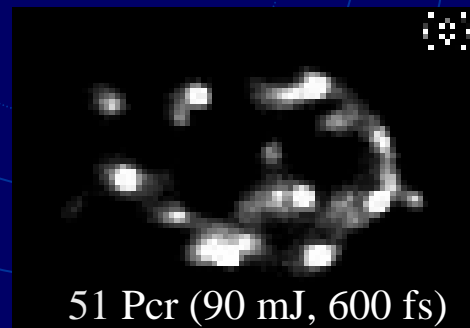
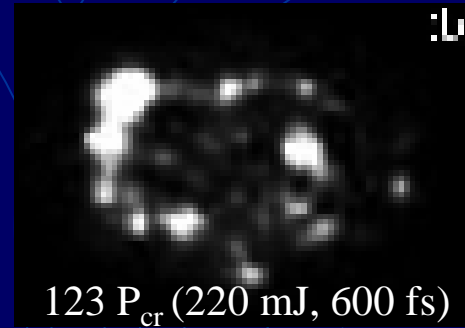
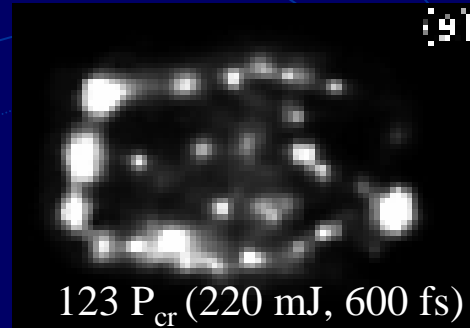
5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

LIBRE

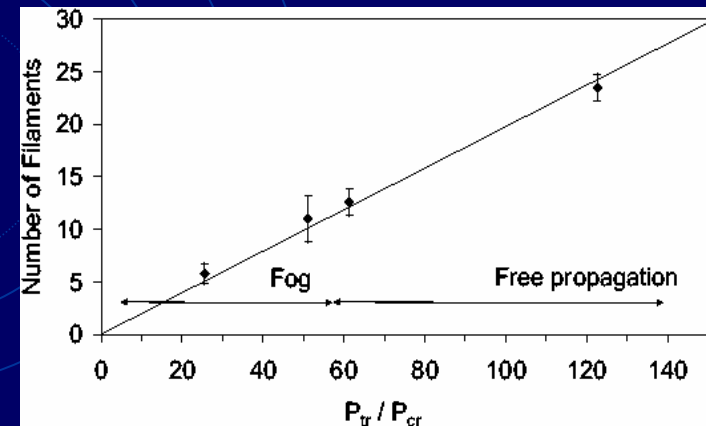
BROUILLARD



P_{in}/P_{cr}	123		51	
Propagation	Libre	brouillard	libre	brouillard
Nombre de filaments	24	13	11	6

$$N_{fil} \longrightarrow N_{fil}/2$$

BROUILLARD = ATTENUATEUR de PUISSANCE



$$P_{fil} \sim 5 P_{cr}$$

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

4) Vortex Optiques

5) Confrontation avec les expériences

➤ Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

modèle numérique

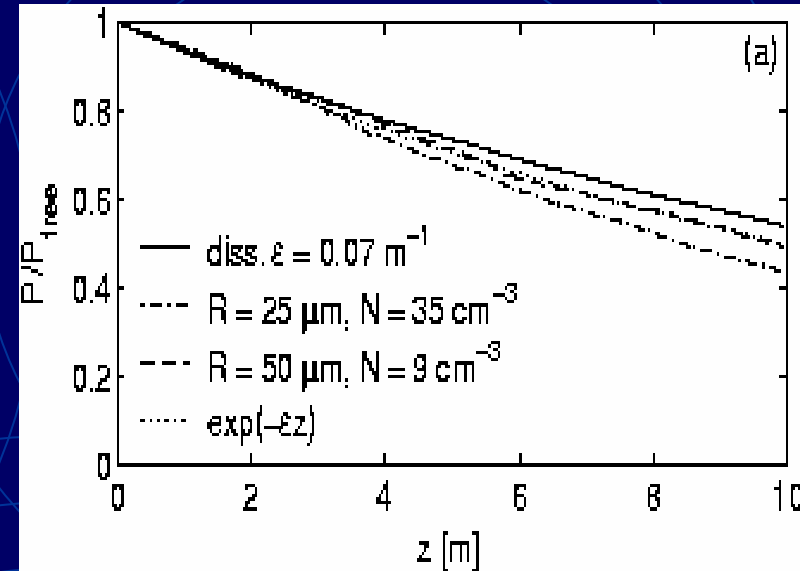
$$\partial_z \psi = \frac{i}{2k_0} \nabla_{\perp}^2 \psi + \dots$$

+ gouttes: Densité de Poisson $P(1) = \lambda^1/1! \times \exp(-\lambda)$



$$\varepsilon = N\pi R^2$$

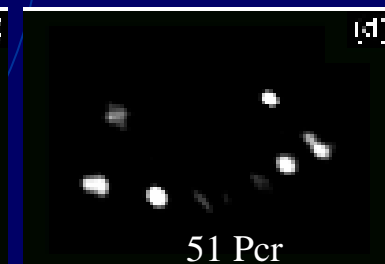
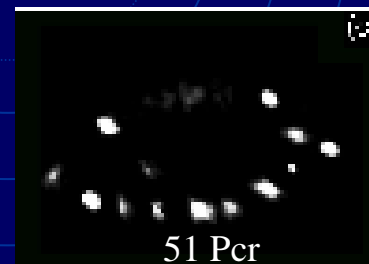
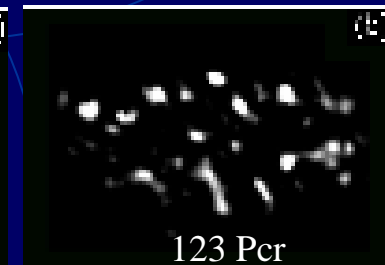
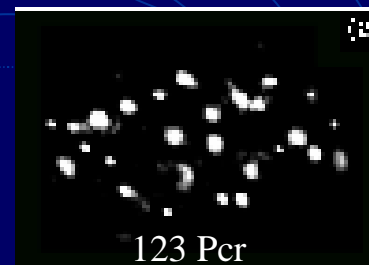
$-\frac{\varepsilon}{2} \psi$ dissipation linéaire $\varepsilon = 0.07 \text{ m}^{-1}$
(perte linéaire de puissance)



P_{in}/P_{cr}	123		62		51	
Propagation	libre	brouillard	libre	libre	brouillard	
filaments	25	12-15	13	12	6	

LIBRE

BROUILLARD



$N_{fil} \longrightarrow N_{fil}/2$ Modèle \approx Expériences

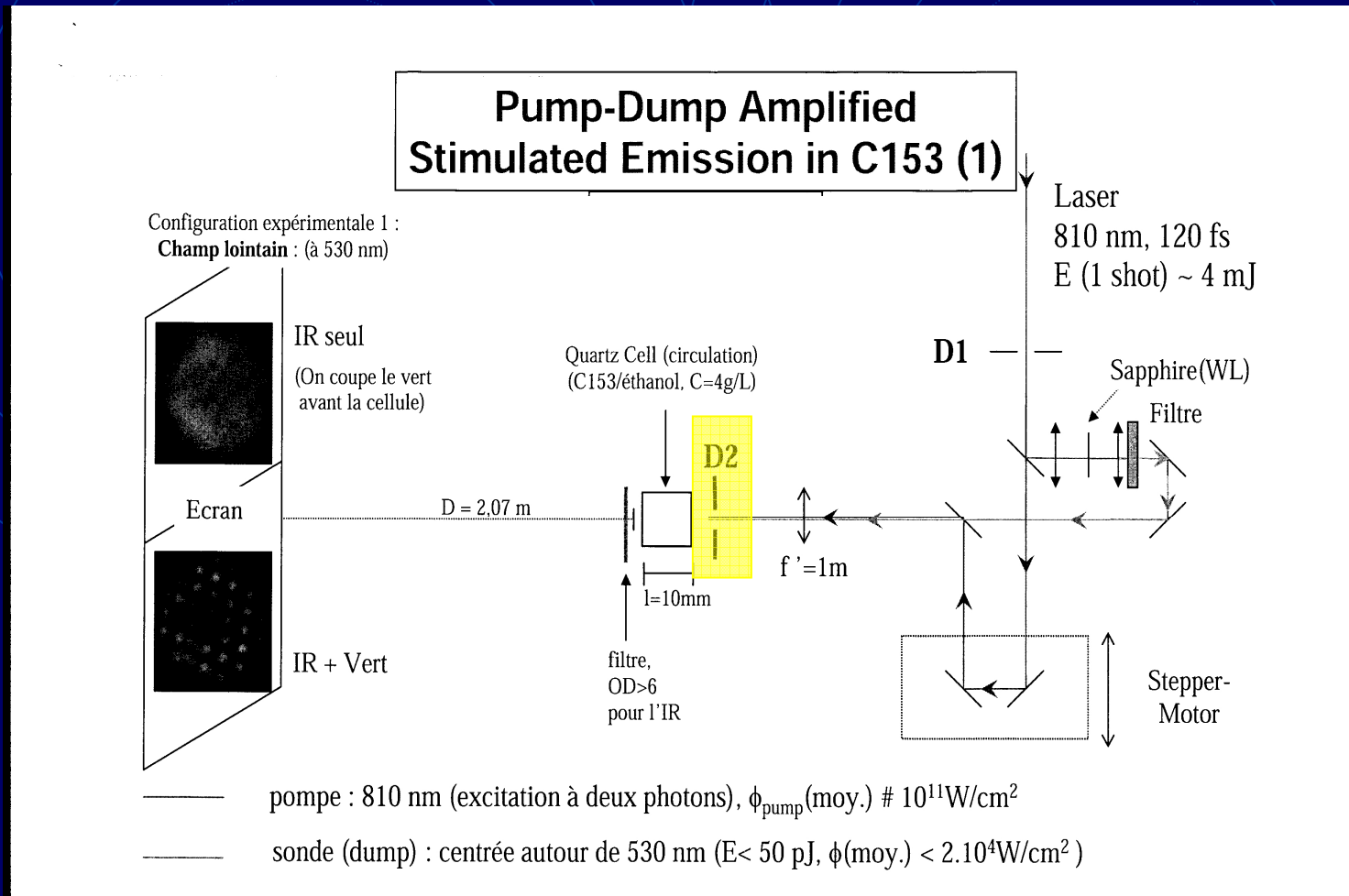
BROUILLARD = ATTENUATEUR de PUISSANCE

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

MULTIFILAMENTATION DANS UNE CELLULE D'ETHANOL



DISPOSITIF EXPERIMENTAL

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

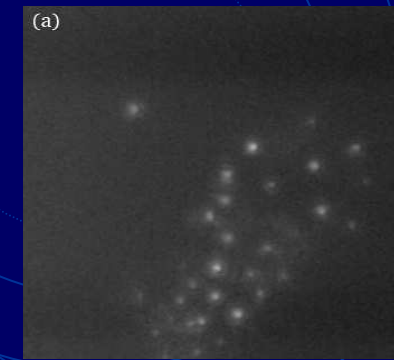
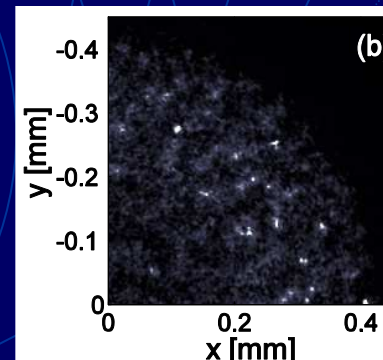
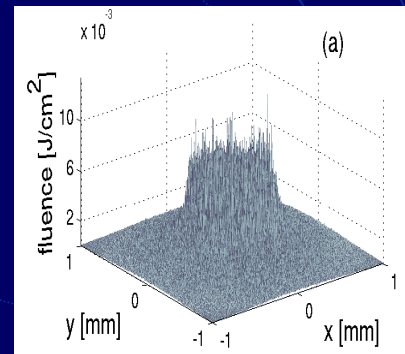
Propagation dans une cellule d'éthanol pur

SIMULATIONS

EXPERIMENTAL

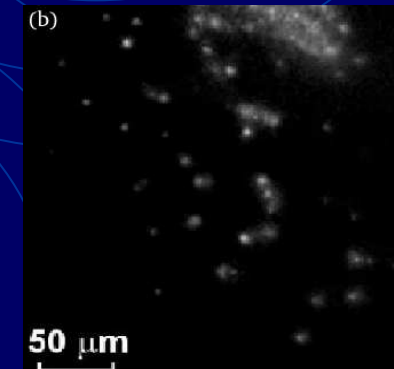
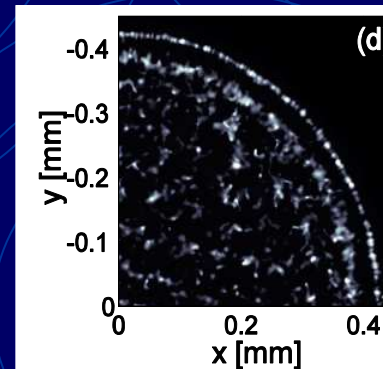
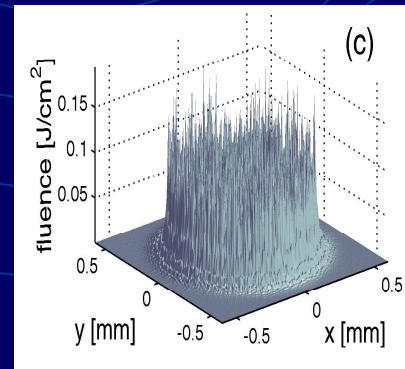
FAISCEAU
NON DIAPHRAGME

$z = 1 \text{ cm}$



FAISCEAU
DIAPHRAGME

$z = 1 \text{ cm}$



STRUCTURE FILAMENTEUSE

➤ $N_{\text{filaments}} (\text{faisceau diaphragmé}) > N_{\text{filaments}} (\text{faisceau non-diaphragmé})$

Ø FILAMENTS = quelques MICRONS

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard

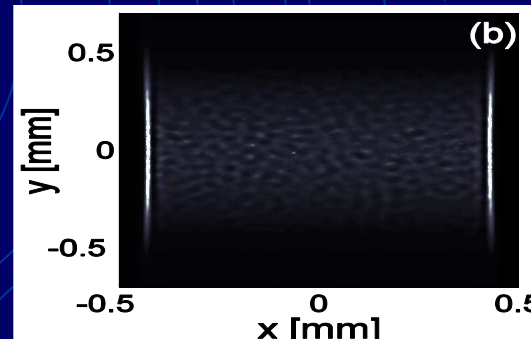
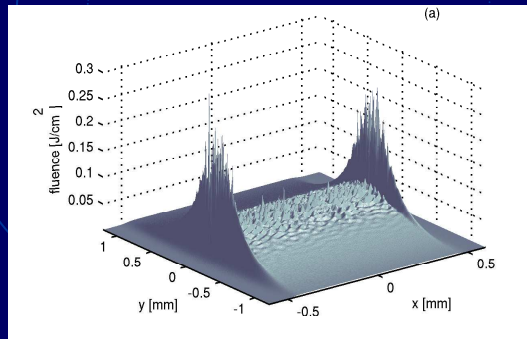
➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Propagation à travers une fente dans l'éthanol pur

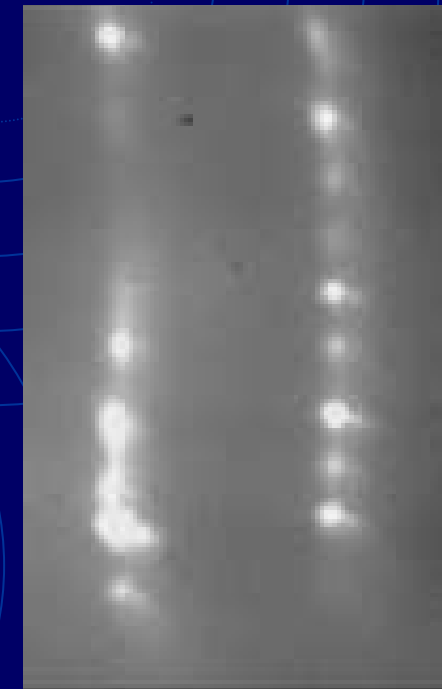
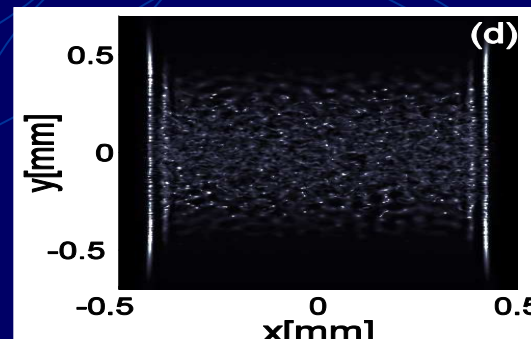
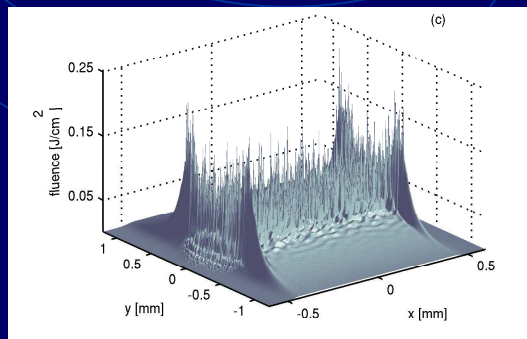
NOS SIMULATIONS

EXPERIMENTAL

$z = 0.7 \text{ cm}$



$z = 1 \text{ cm}$



$w_0 = 0.5 \text{ mm}$

$t_p = 102 \text{ fs}$

$P_{in} \approx 4.7 \text{ GW}$

cellule d'1 cm de long

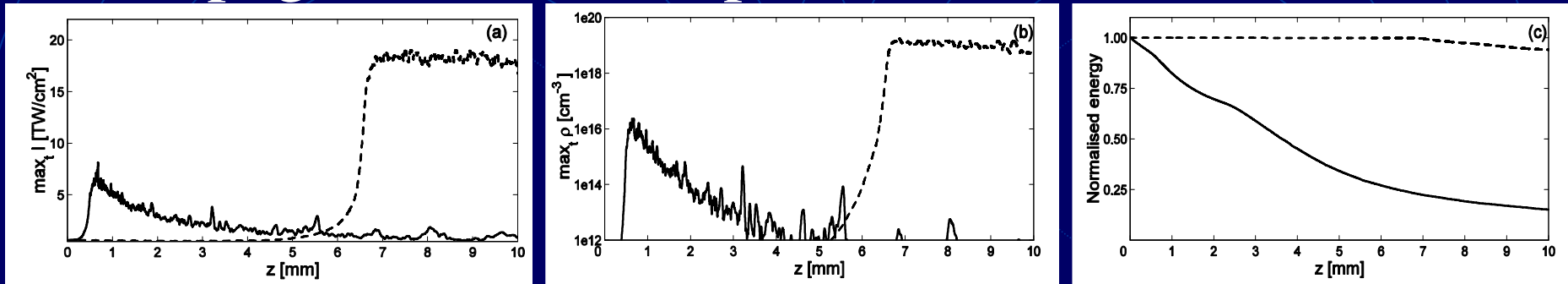
Filamentation sur la zone de gradient en intensité
 Filamentation multiple au centre

- 1) Propagation d'impulsions laser ultra-courtes: le modèle
- 2) Non-linéarités optiques d'ordre élevé
- 3) Propagation atmosphérique d'impulsions avec gradient fort

- 4) Vortex Optiques
- 5) Confrontation avec les expériences
 - Multifilamentation à travers le brouillard

➤ Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dopées à la coumarine

Propagation: éthanol pur/éthanol + coumarine



— éthanol dilué
 - - - éthanol pur

éthanol dilué:
 foyer non-linéaire plus tôt (cf. n₂ fort)
 pic d'intensité atteint plus faible
 pas d'équilibre dynamique atteint: perte d'énergie importante dès le début
 pas de nouvelle phase de refocalisation

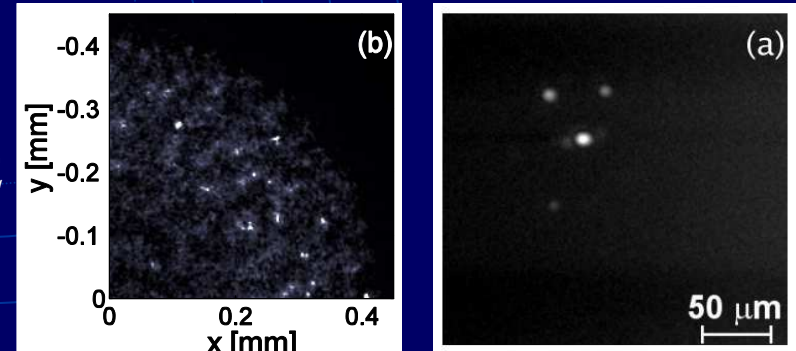
$$\partial_z \mathcal{E} = i \frac{\Delta_{\perp}}{2k_0} \mathcal{E} + \dots$$

$$- \frac{\sigma_{abs}^{(2)}}{2} \rho_{abs} |\mathcal{E}|^2 \mathcal{E}$$

TPA

ETHANOL DILUE

NOS SIMULATIONS EXPERIMENTAL



...seuls quelques filaments subsistent

Modélisation de la propagation

- Saturation quintique → Restitution des résultats expérimentaux

Propagation d'impulsions avec gradient fort et vortex optiques

- VORTEX OPTIQUES FS → Maîtriser le nombre de filaments et prévoir leur évolution
- Repousser leur distance à des centaines de mètres

Propagation à travers le brouillard

- Possibilité de propager en atmosphère → LIDAR ...

Multifilamentation dans les cellules d'éthanol dilué ou non

- COUMARINE → Contrôler la filamentation multiple