

Contrôle et application des faisceaux “non diffractants” ultrabrefs à l’ablation à haut rapport de forme

Francois Courvoisier

M. K. Bhuyan

L. Froehly

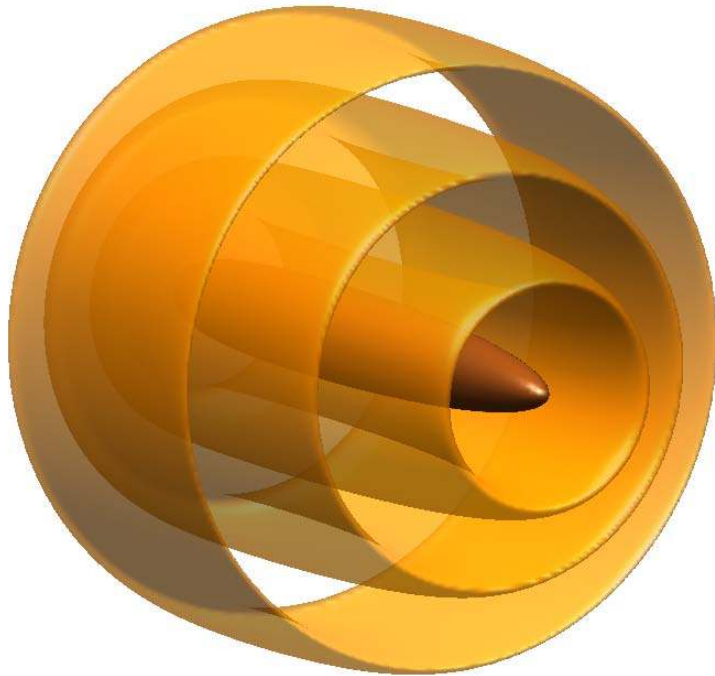
P.-A. Lacourt

A. Mathis

M. Jacquot,

L. Furfaro

John M. Dudley



Département d’Optique PM Duffieux

Institut FEMTO-ST

UMR 6174 CNRS / Université de Franche-Comté

Besançon, FRANCE

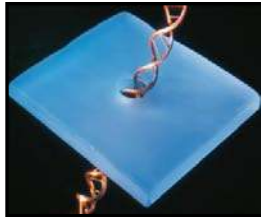


Franche-Comté
Conseil régional



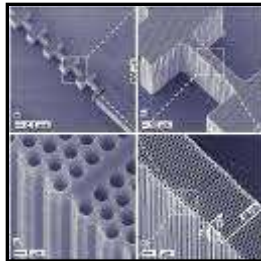
Motivation

La modification des matériaux est un thème de recherche important à la fois au point de vue fondamental et appliqué.



Micro/nano fluidique

Optofluidique, Lab-on Chips,
électrophorèse nanocapillaire



Nano-photonique

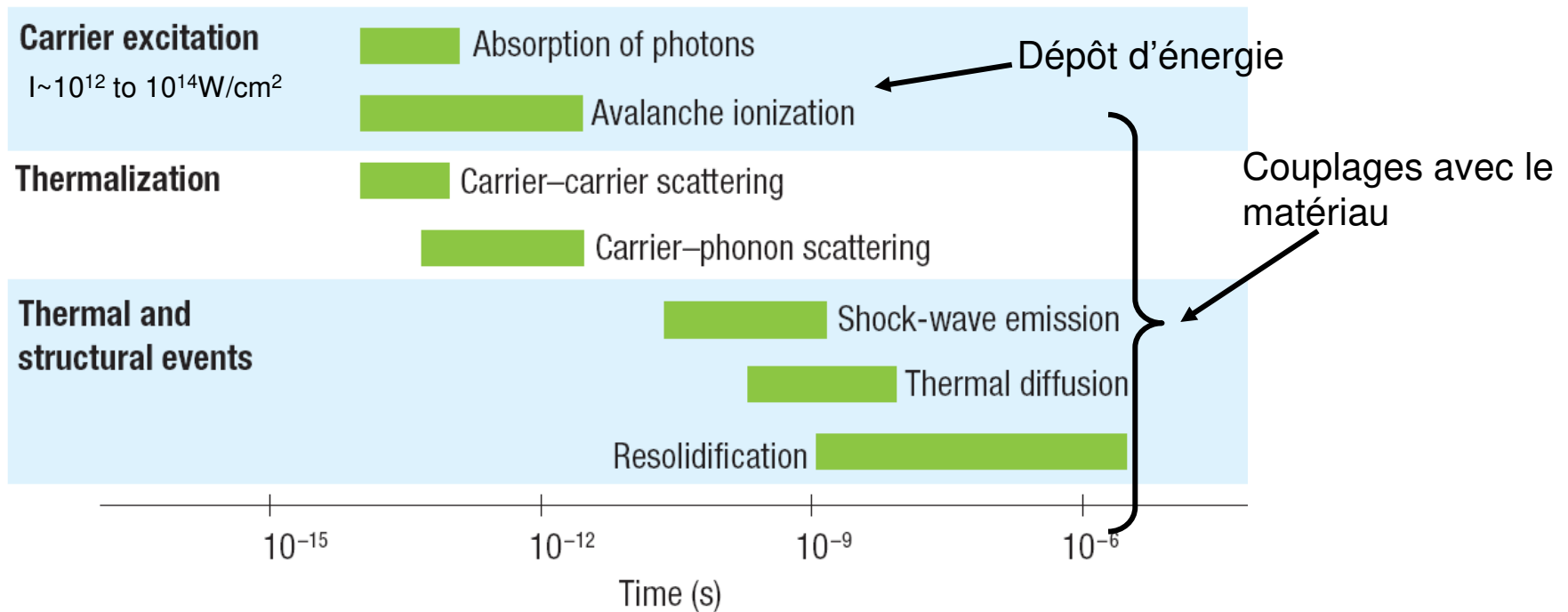
2D photonic crystals

Spécifiquement, le domaine de l'ablation à haut rapport de forme est un point crucial pour ces applications. Nous montrons ici comment nous pouvons adresser ce problème à l'aide des faisceaux non-diffractants.

Outline

- Une introduction “ultrarapide” à l’ablation par laser femtoseconde
- Faisceaux de Bessel “non-diffractants”
- Perçage de microcanaux en régime multi-coups
- Nano-Ablation monocoup à très haut rapport d’aspect
- Une classe plus générale de faisceaux “accélérateurs”

Ablation par laser femtoseconde

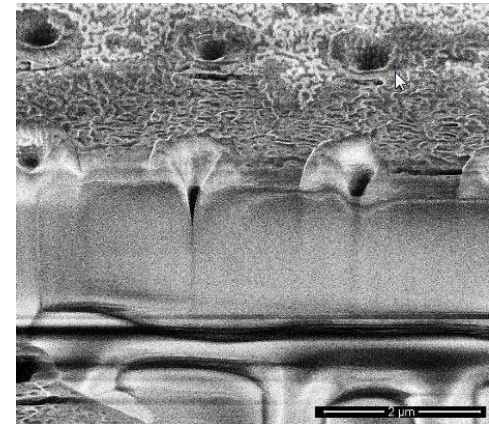
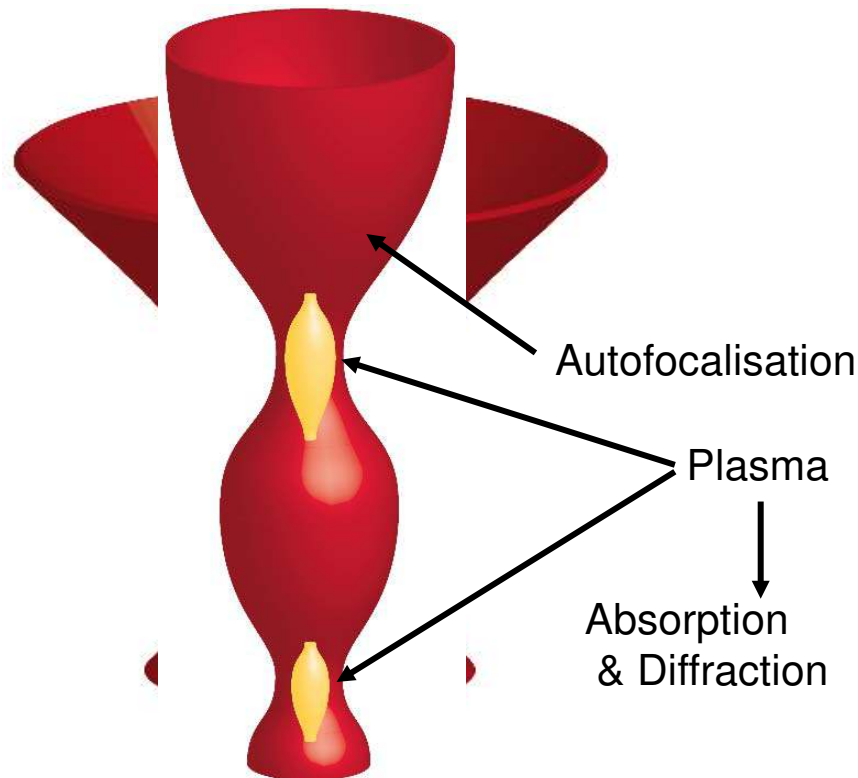


Gatass,R and Mazur,E. Nature Photonics, **2**, 219 (2008)

- Transfert d'énergie sur une échelle sub-ps
- Les électrons excités thermalisent avec le réseau
- L'ablation par laser femtoseconde a une résolution sub-micrométrique avec peu de dommages collatéraux.

Limites des faisceaux gaussiens pour l'ablation en profondeur

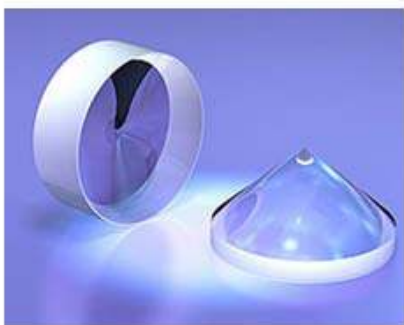
- La longueur de Rayleigh et le waist ont le même ordre de grandeur.
 - Focalisation forte: profondeur de cratère $< 1 \mu\text{m}$
 - Faible focalisation: distorsion du faisceau (filamentation)



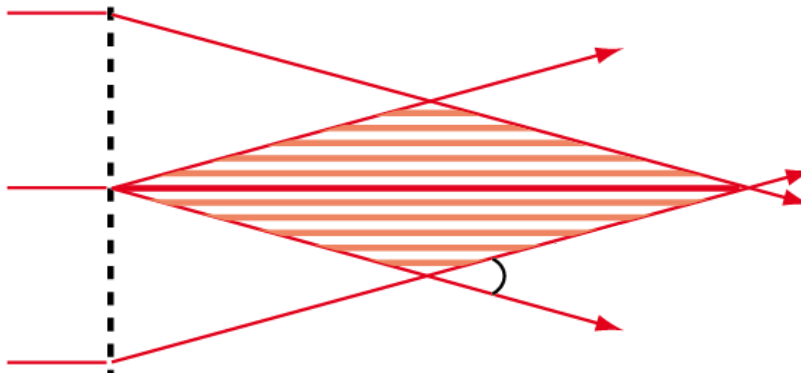
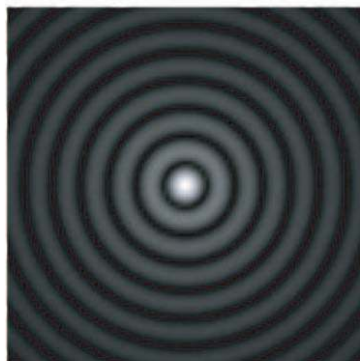
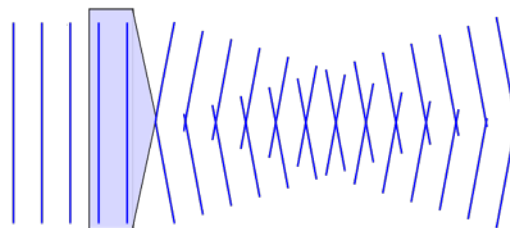
White, Y. et al, *Opt. Express*
16,14411 (2008)

Faisceaux de Bessel non-diffractants

- Les faisceaux de Bessel sont une solution invariante de l'équation d'onde
- Ils sont générés par superposition d'ondes planes (vecteurs k sur un cône)

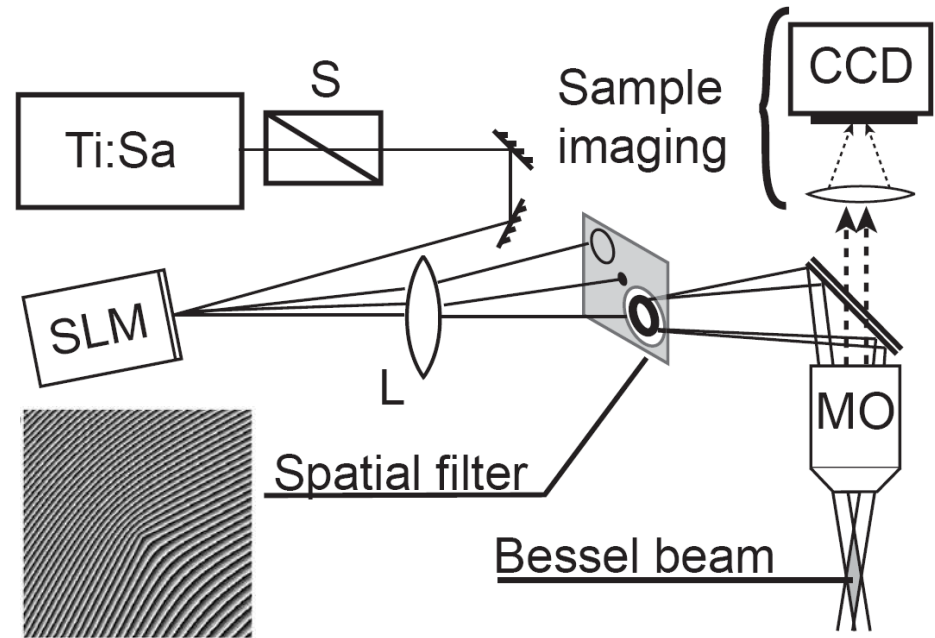
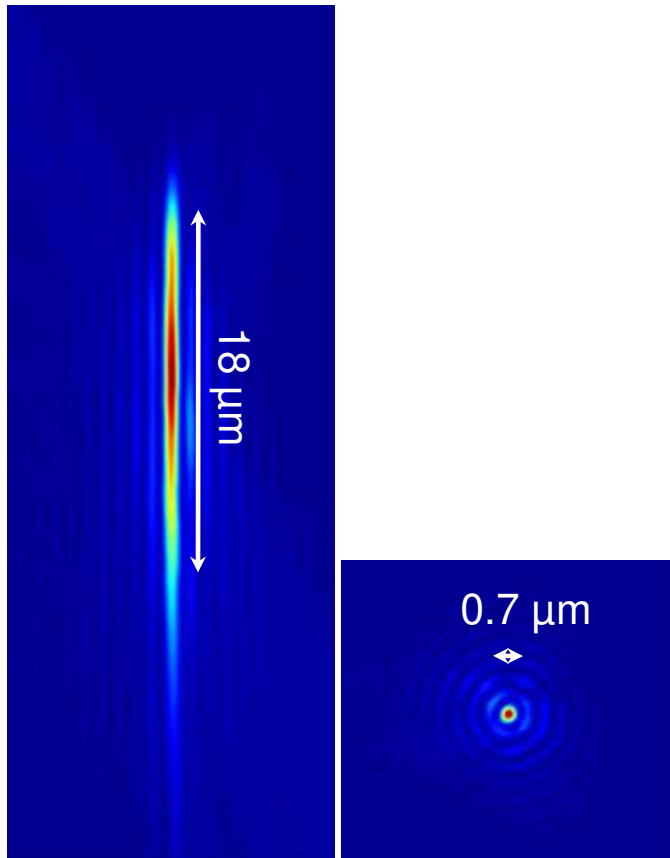


J.H. McLeod, "Axicons and Their Uses",
JOSA, 60(2), 1960, p. 166



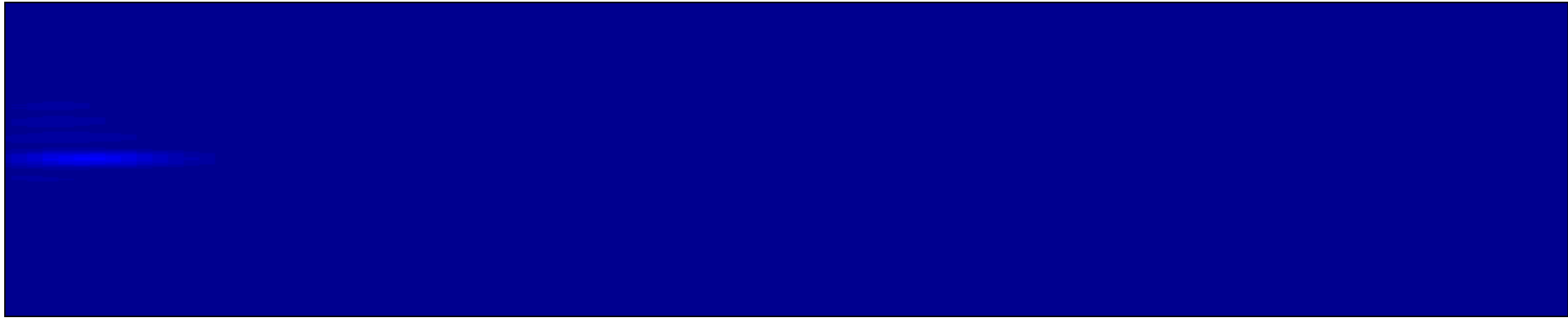
Dispositif experimental

- Modulation de phase par un SLM



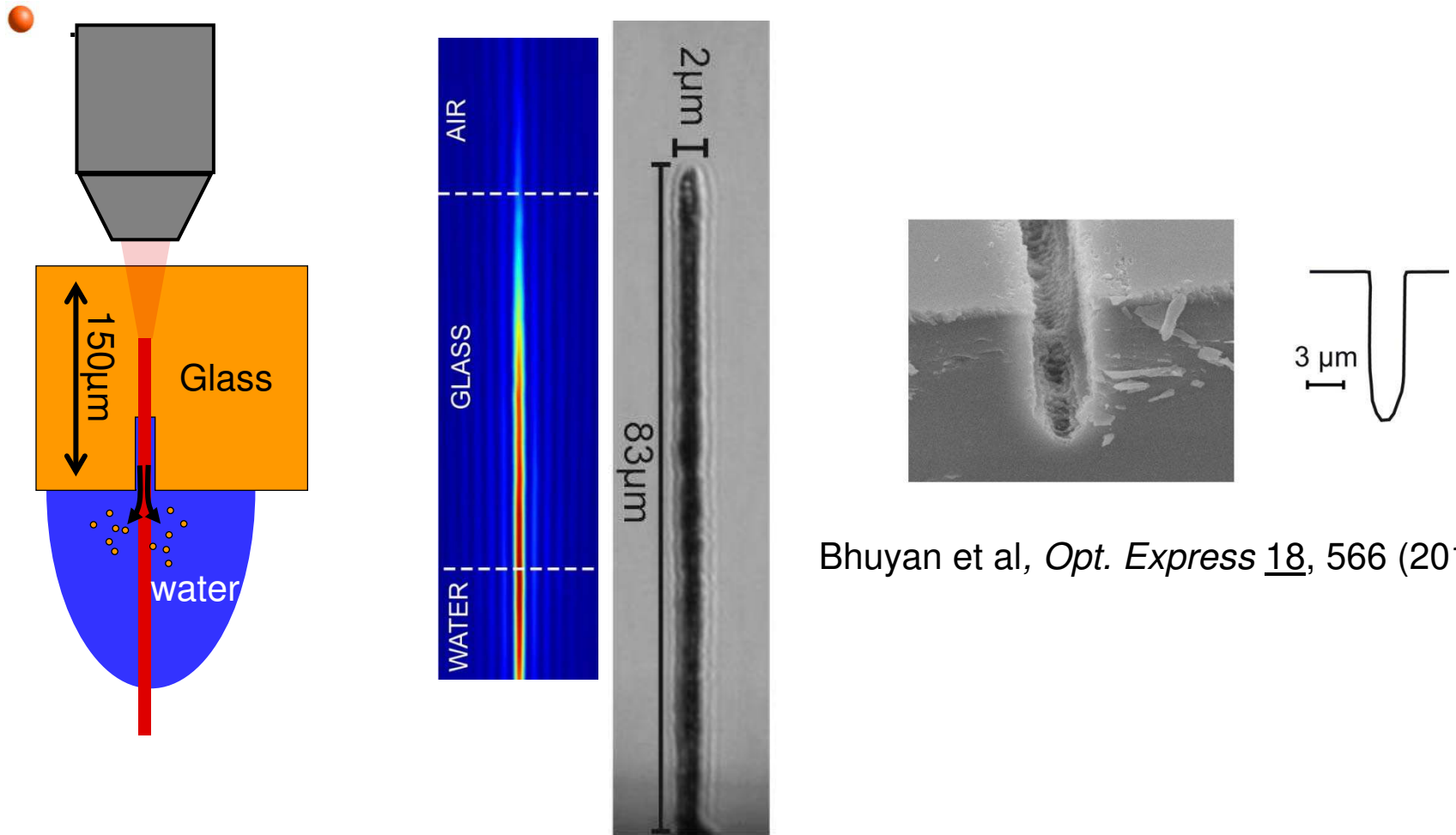
Courvoisier et al, Opt. Lett. 34, 3163 (2009)

Simulation d'un pulse de Bessel généré par notre setup



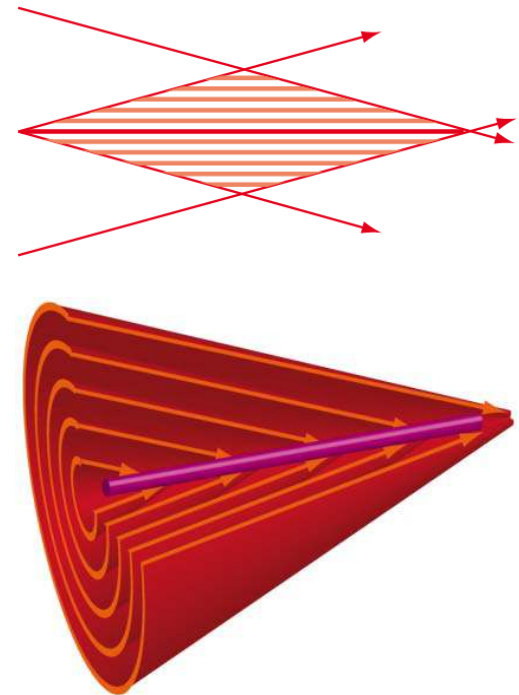
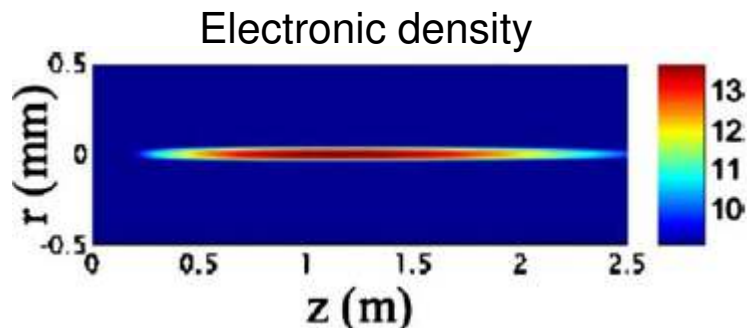
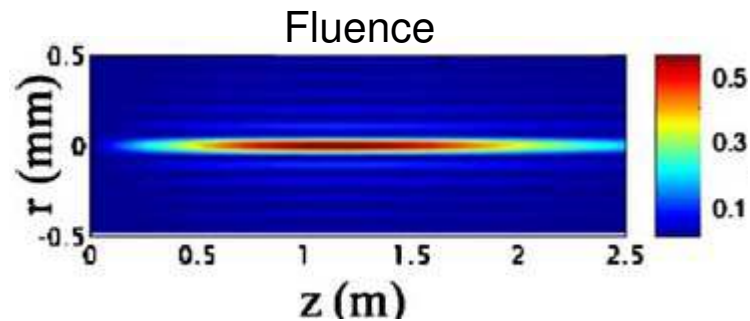
Micro-usinage « taper-free » dans le verre

- Usinage en face arrière par un fais. de Bessel 1.5 μm diamètre et de longueur 150 μm



Filaments de Bessel

- Les faisceaux de Bessel ont un régime de filamentation stable

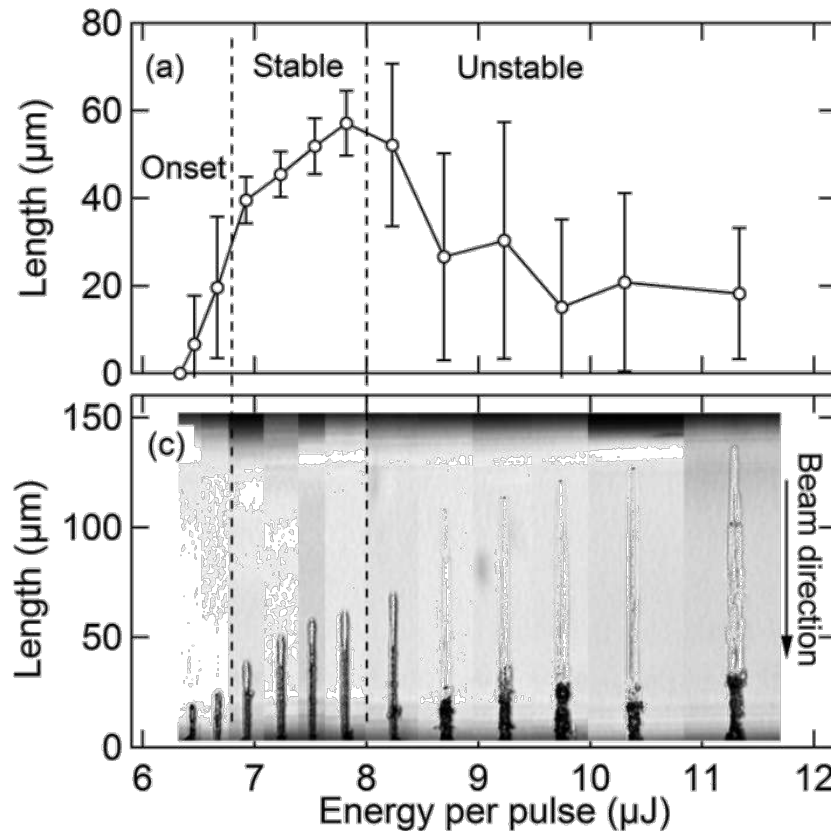


Di Trapani group, Phys. Rev. A. **77**, 043814
(2008)

- Flux d'énergie cône qui compense les pertes au centre

Filaments de Bessel

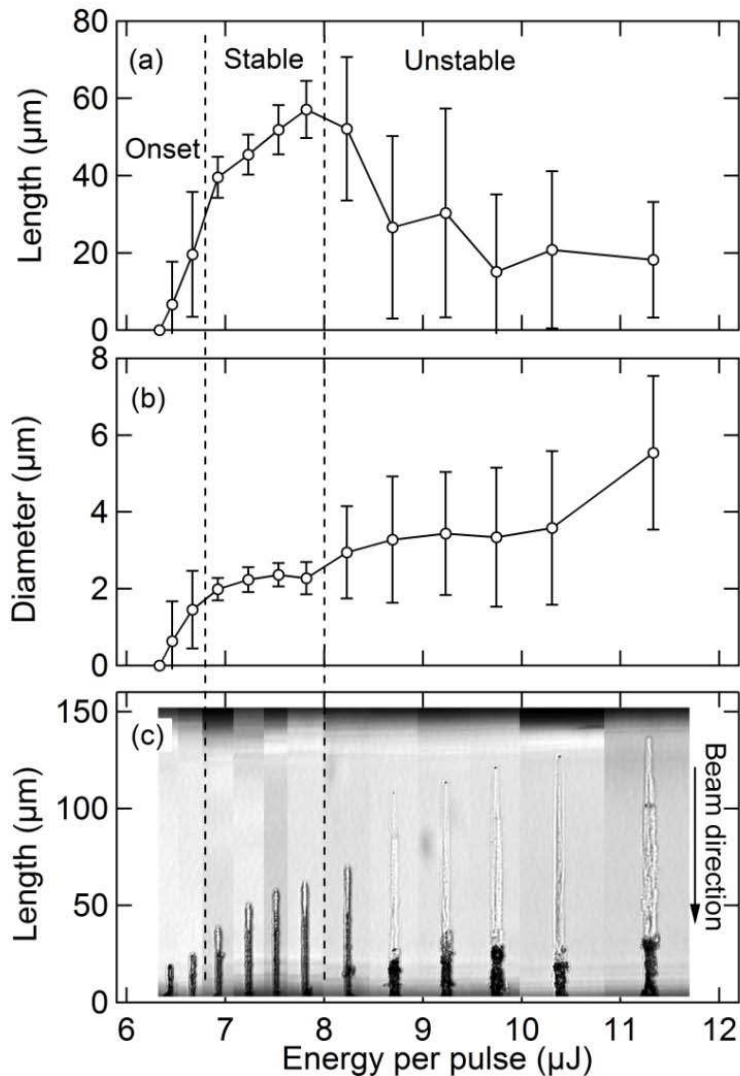
- Les faisceaux de Bessel ont un régime de filamentation stable



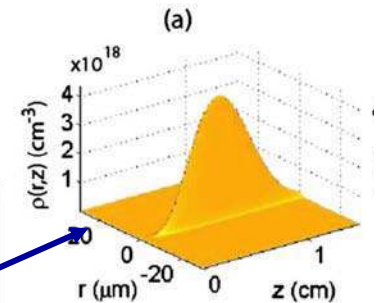
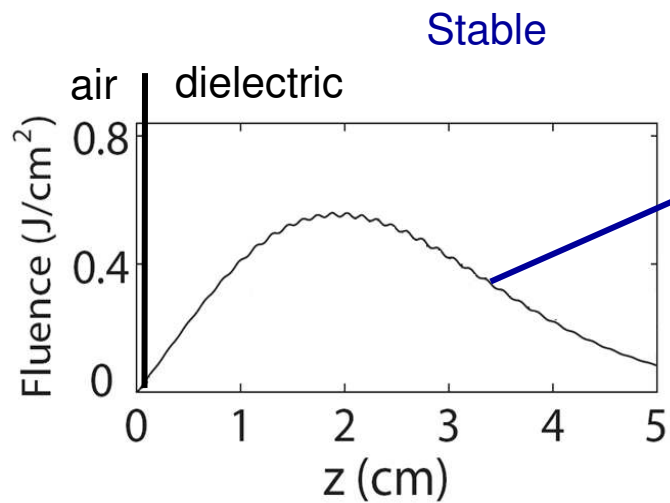
Bhuyan et al,
Opt. Express 18, 566 (2010)

- Flux d'énergie cône qui compense les pertes au centre

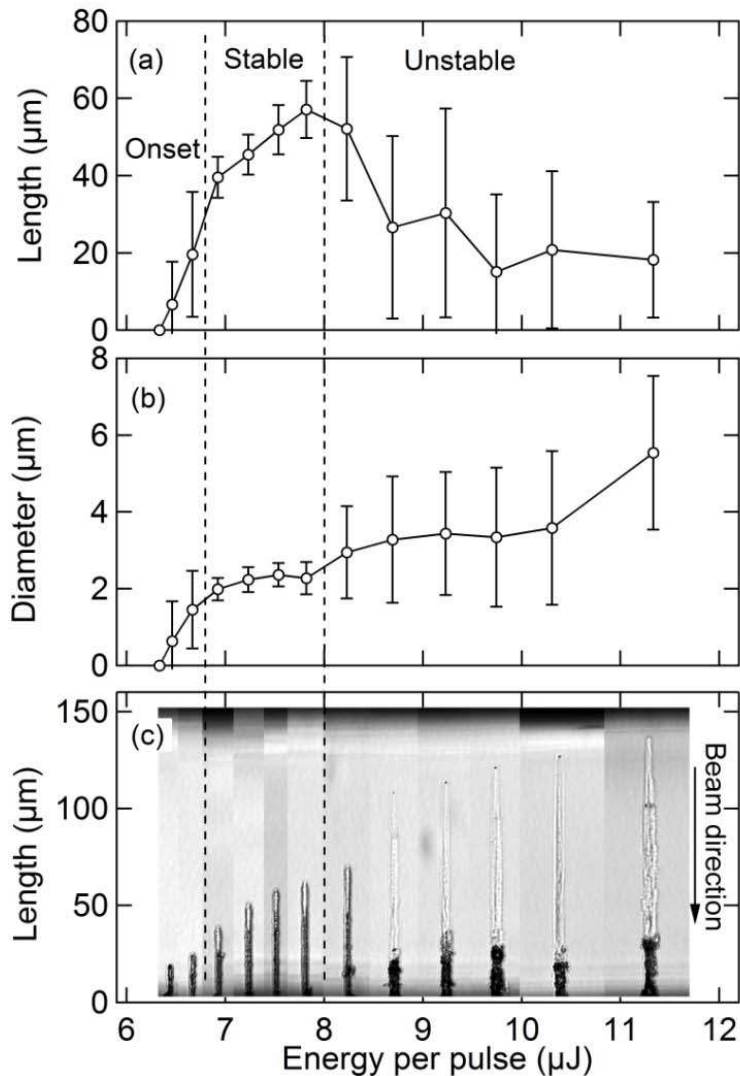
Confirmation expérimentale



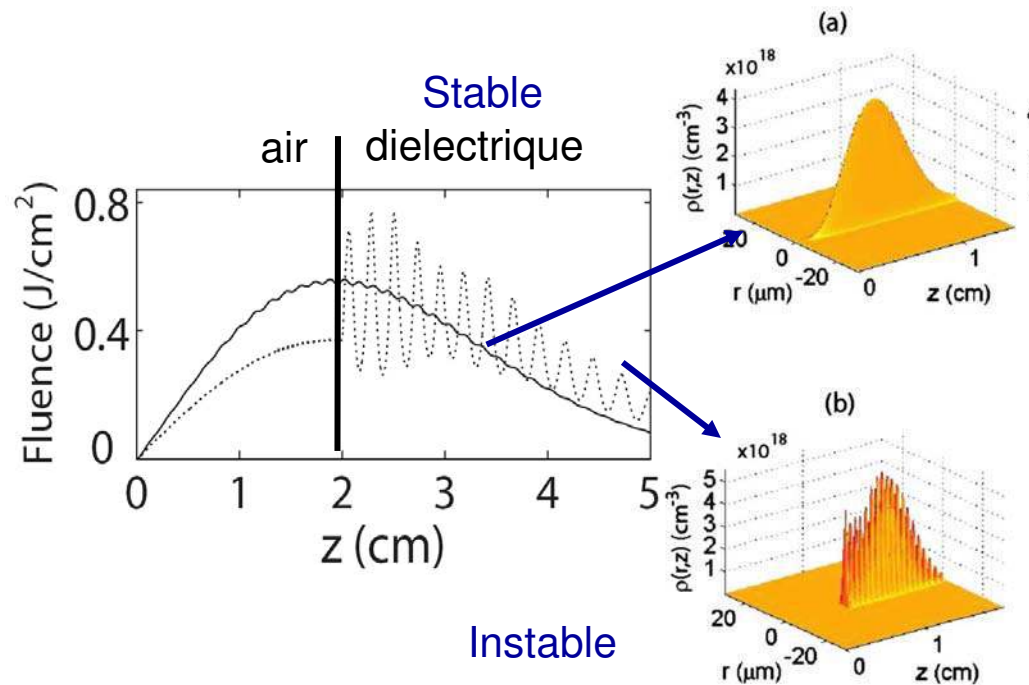
Nous attribuons cette transition à un passage du régime stable à instable des faisceaux de Bessel



Confirmation expérimentale



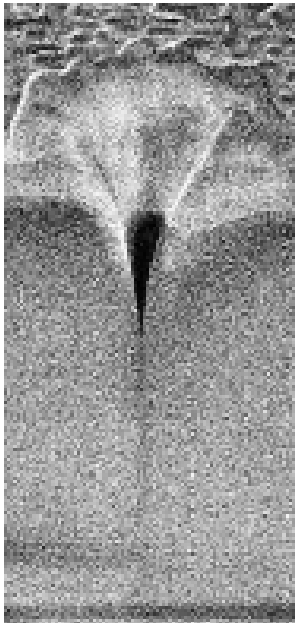
Nous attribuons cette transition à un passage du régime stable à instable des filaments de Bessel



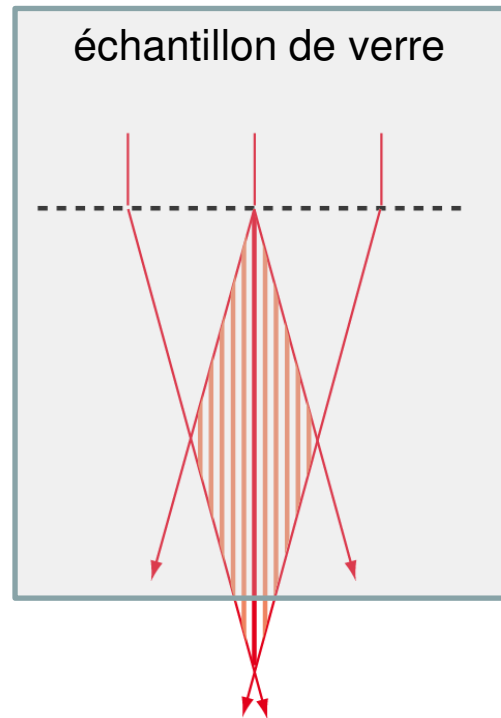
Di Trapani group, Phys. Rev. A. 77, 043814 (2008)

Ablation mono-coup du verre

- Filamentation stable: forts angles côniques
- Ablation en face arrière avec un fort angle : 17° .



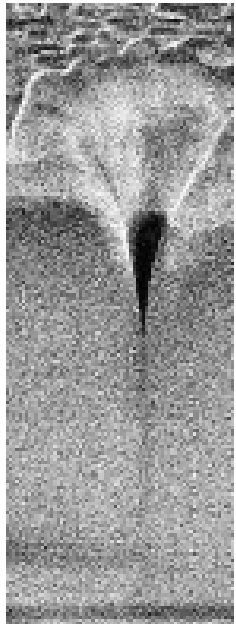
White, Y. et al, *Opt. Express* 16, 14411 (2008)



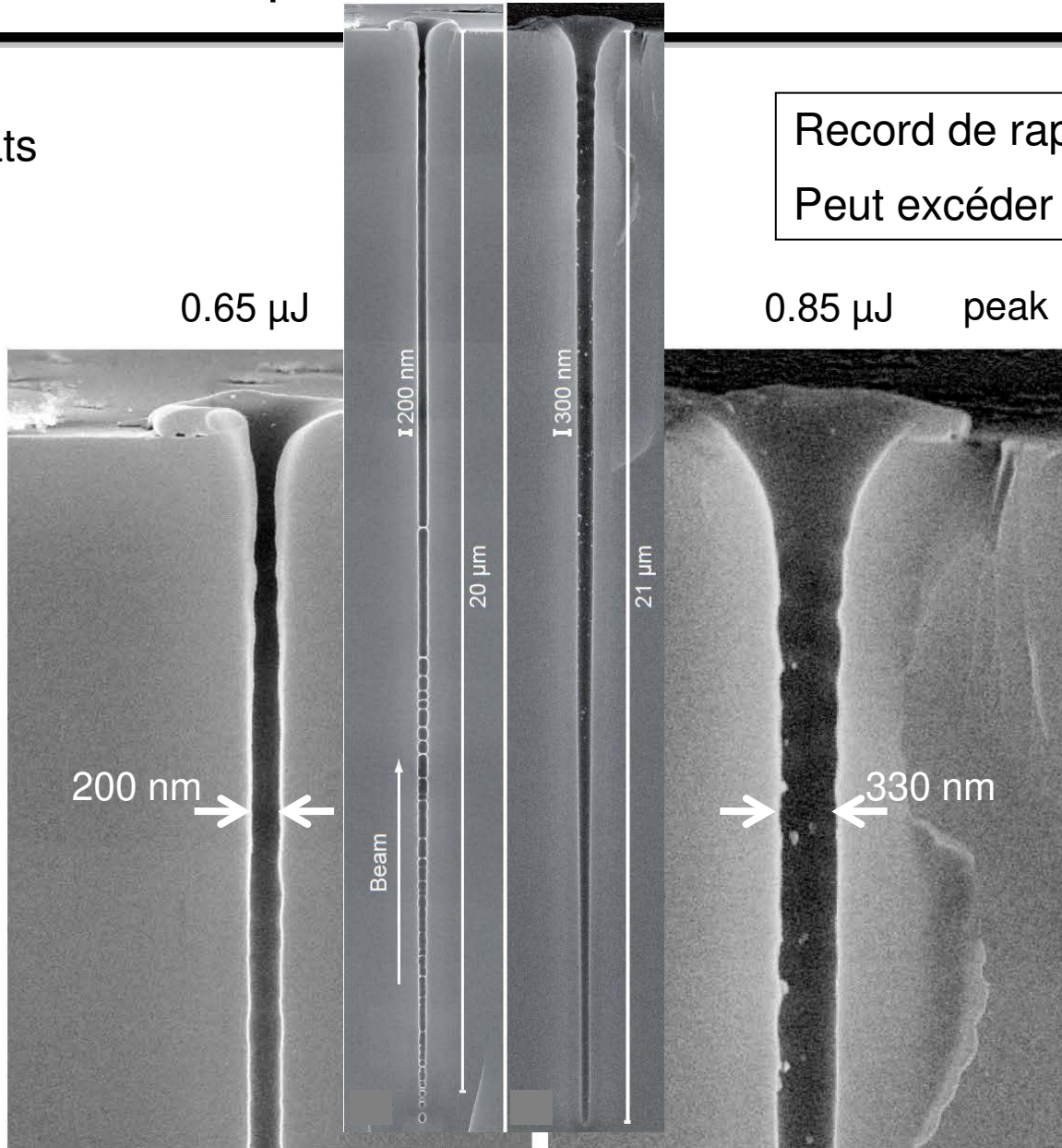
Kudryashov, S. et al, *Appl. Phys. Lett.*, 91, 14111 (2007)

Ablation mono-coup du verre

- Resultats



White, Y. et al, *Appl. Phys. Lett.* **16**, 14411 (2007)



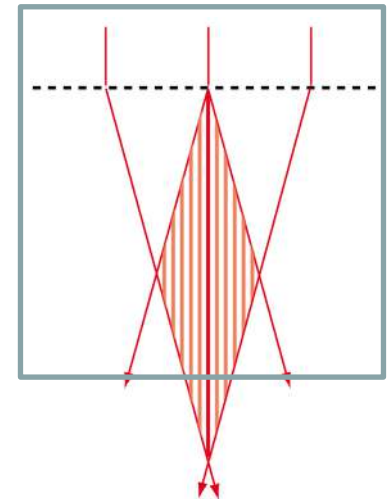
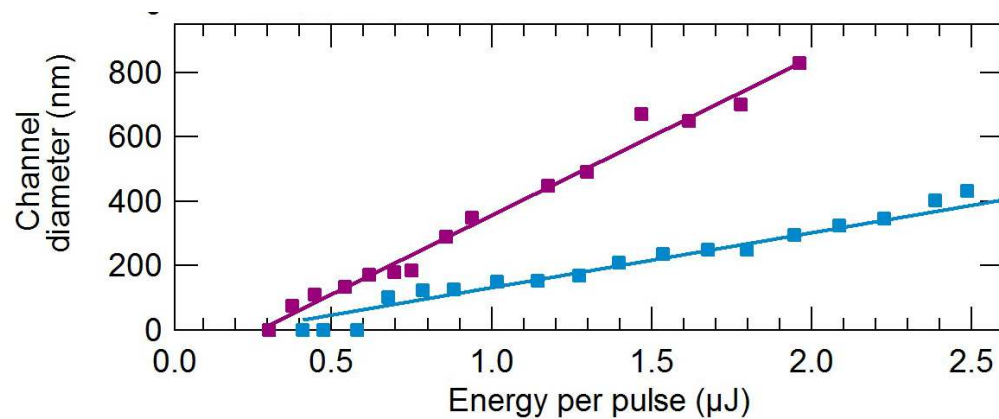
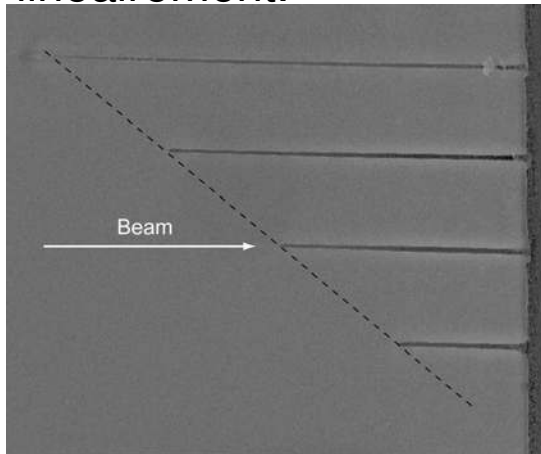
Record de rapport d'aspect
Peut excéder 100:1



White, Y. et al, *Appl. Phys. Lett.* **16**, 14111 (2007)

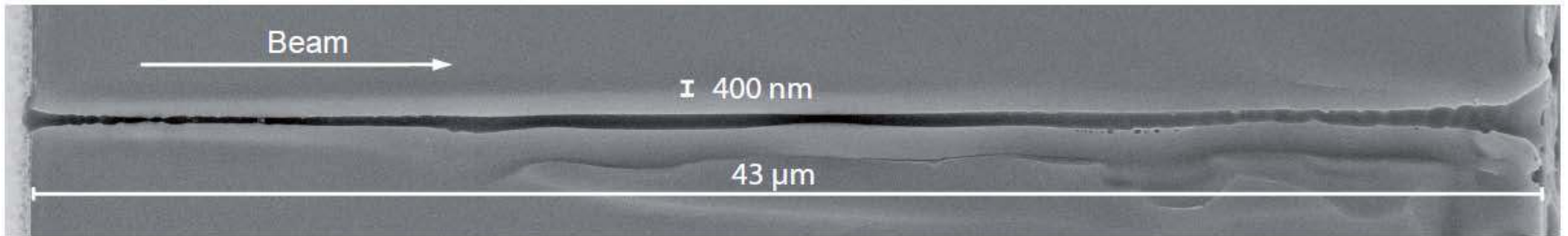
Contrôle linéaire des dimensions des canaux

- Longueur et diamètre peuvent être contrôlés indépendamment et linéairement.

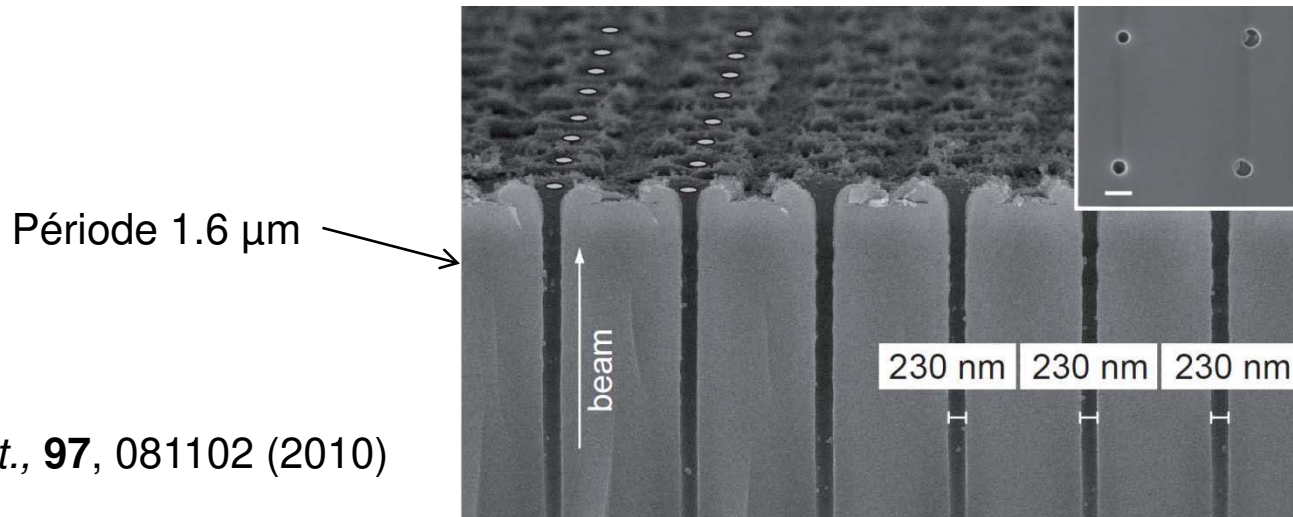


Applications potentielles

- Nanofluidique



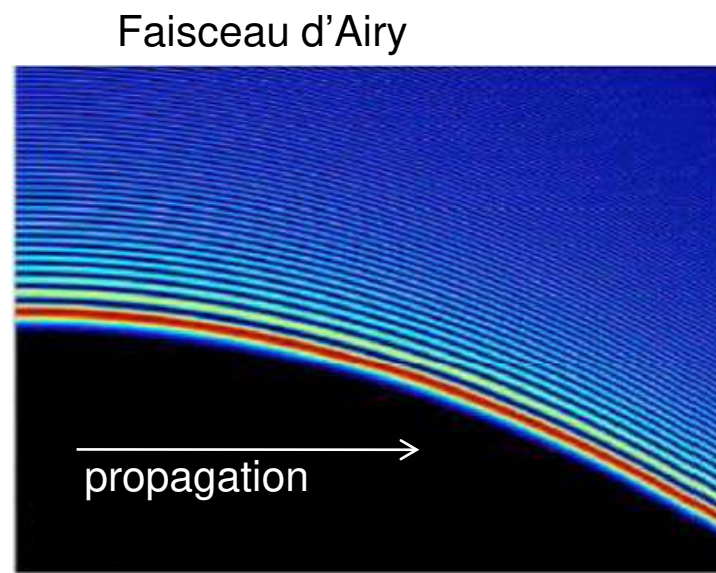
- Nano-Photonique



Bhuyan et al,
Appl. Phys. Lett., **97**, 081102 (2010)

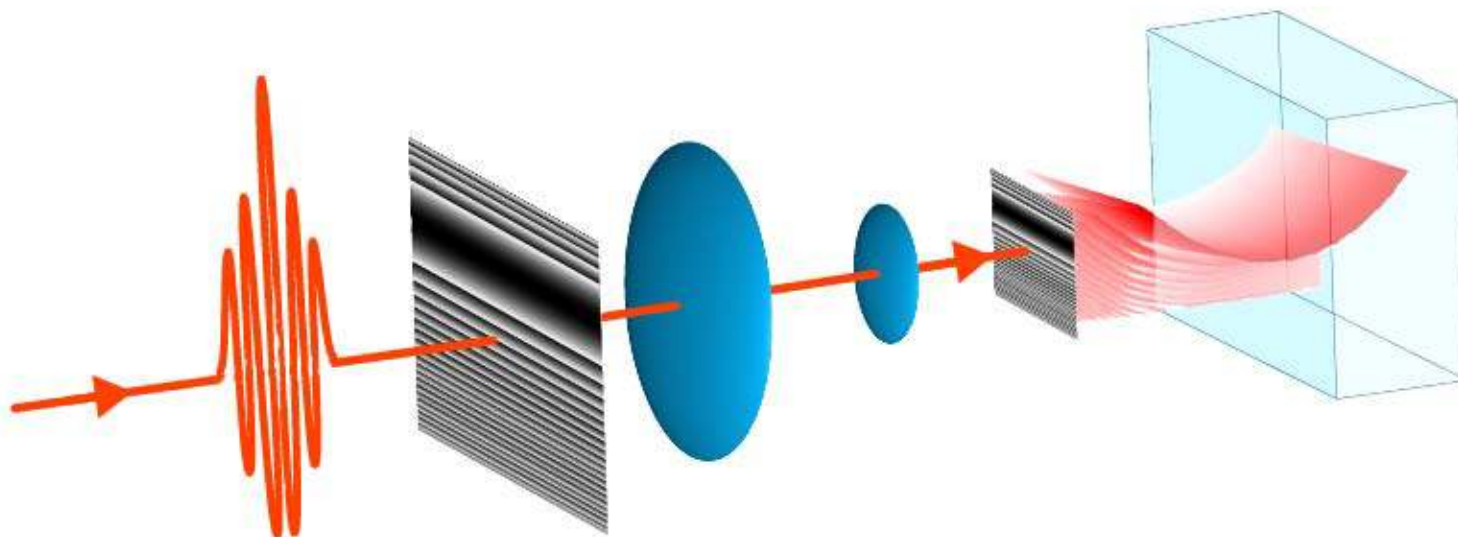
Des faisceaux femtoseconde accélérants

- Les propriétés “non diffractantes” ne sont pas restreintes aux seuls faisceaux de Bessel.
- Les faisceaux d’Airy sont une caustique particulière



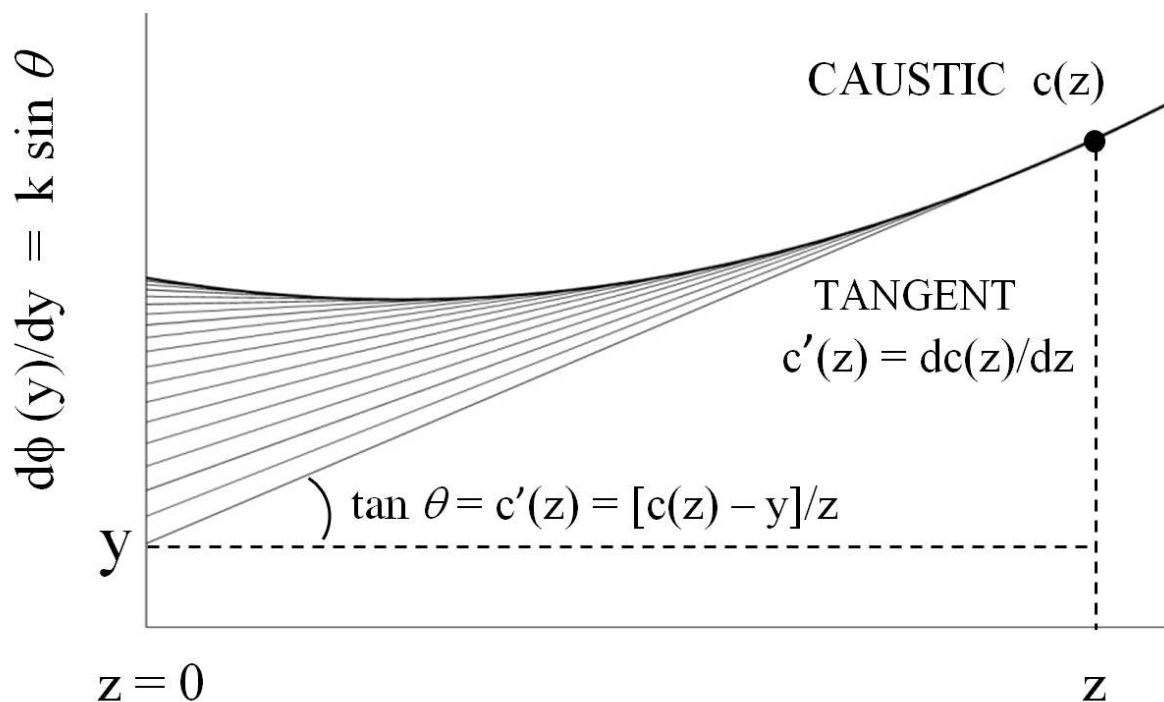
Des faisceaux femtoseconde accélérants

- Les propriétés “non diffractantes” ne sont pas restreintes aux seuls faisceaux de Bessel.
- Les faisceaux d’Airy sont une caustique particulière
- Cette identification permet de générer des faisceaux avec une trajectoire arbitraire convexe.



Masque de phase pour une trajectoire arbitraire

- “Vieux problème” résolu simplement avec l’optique géométrique



M. V. Berry and N. L. Balazs

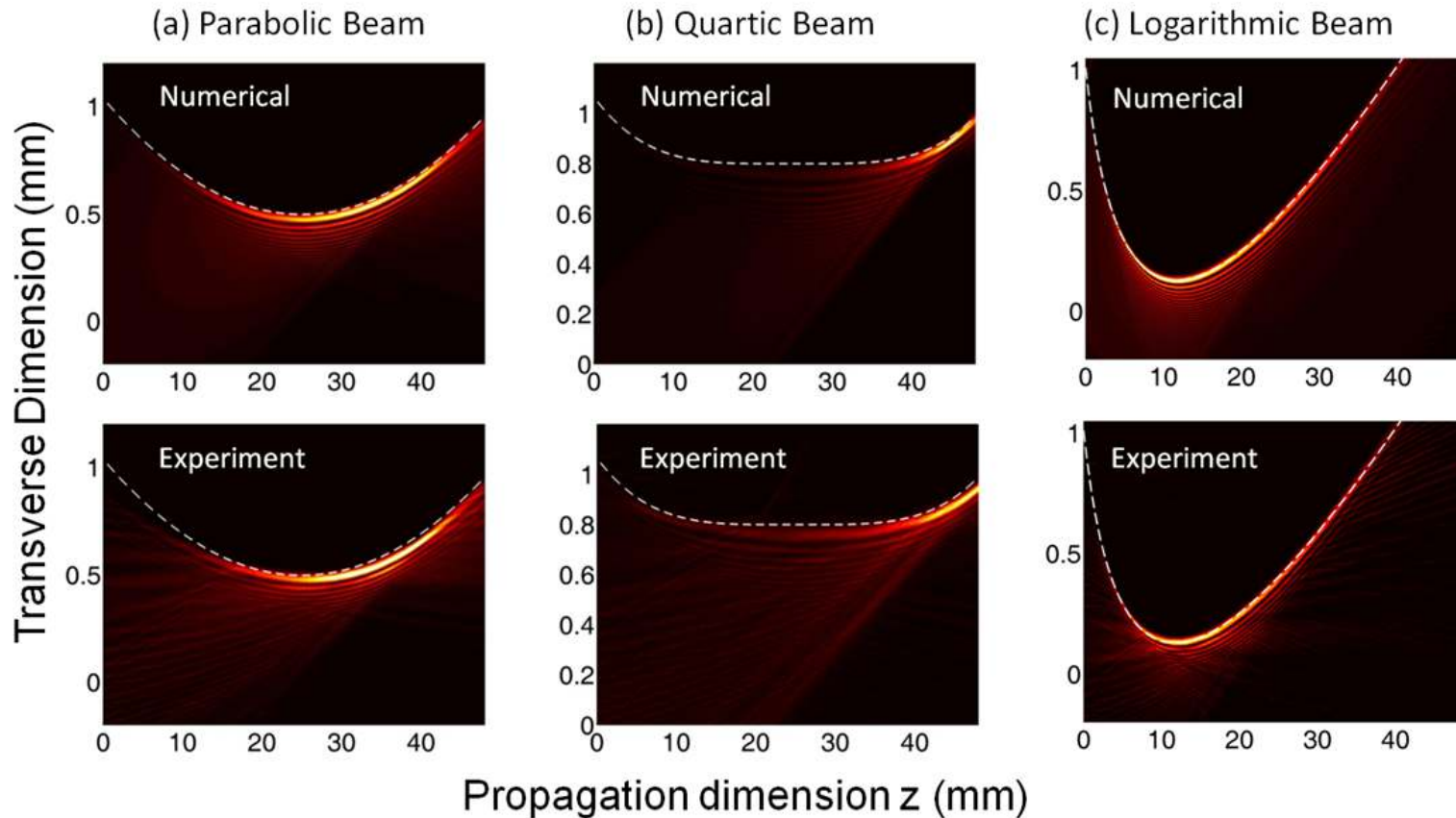
American Journal of Physics **47**, 264–267 (1979)

C. Bellver-Cebreros and M. Rodriguez-Danta

Opt. Commun. **92** 187-192 (1992)

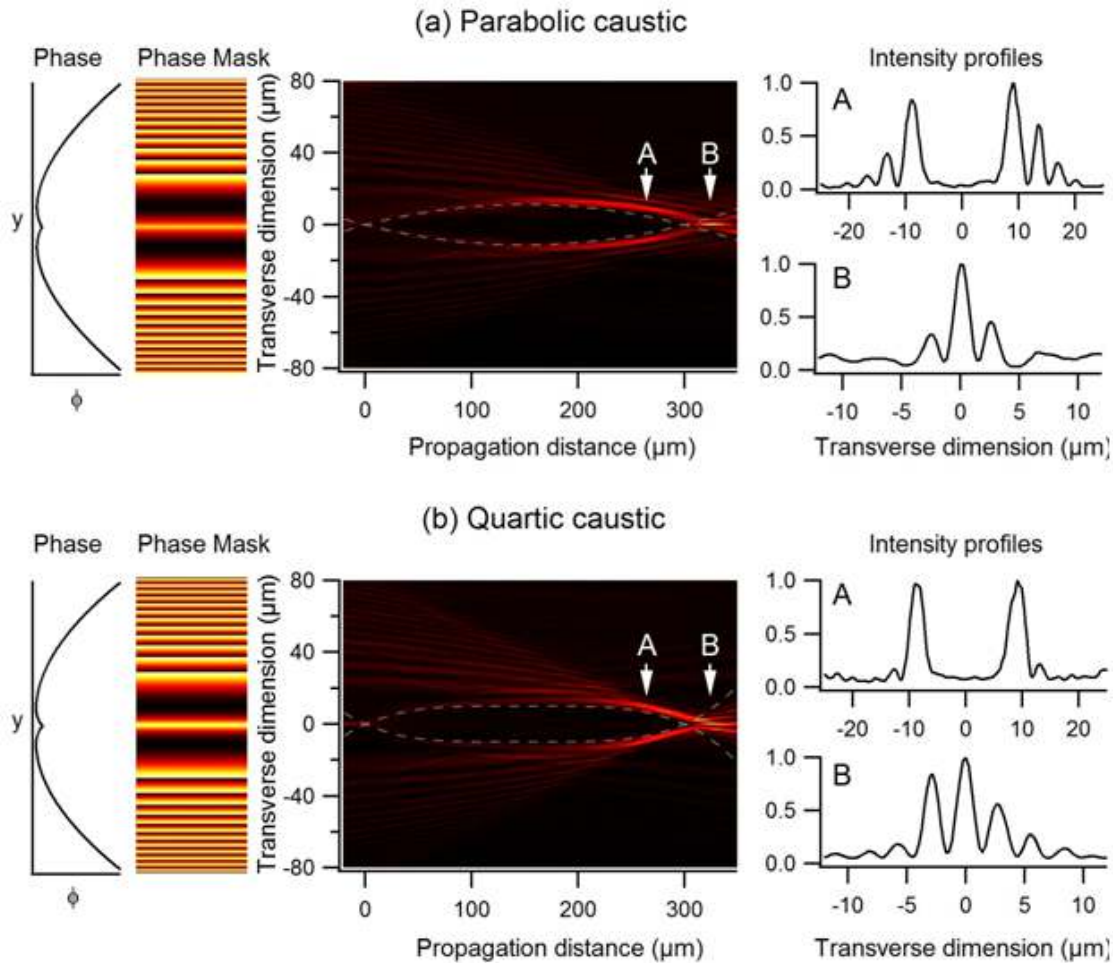
Faisceaux caustiques

- Comparaison des résultats expérimentaux et numériques.



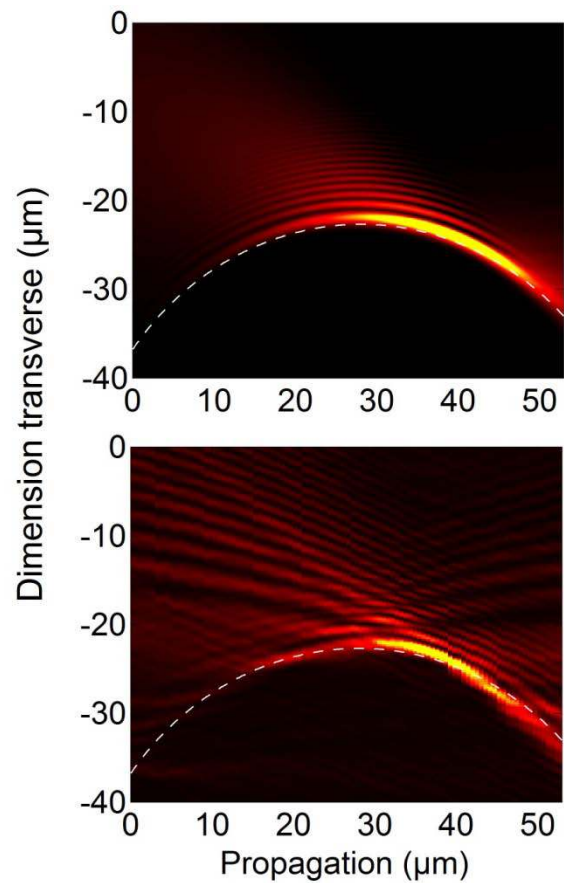
Faisceaux caustiques

- Caustiques doubles “convergentes”.



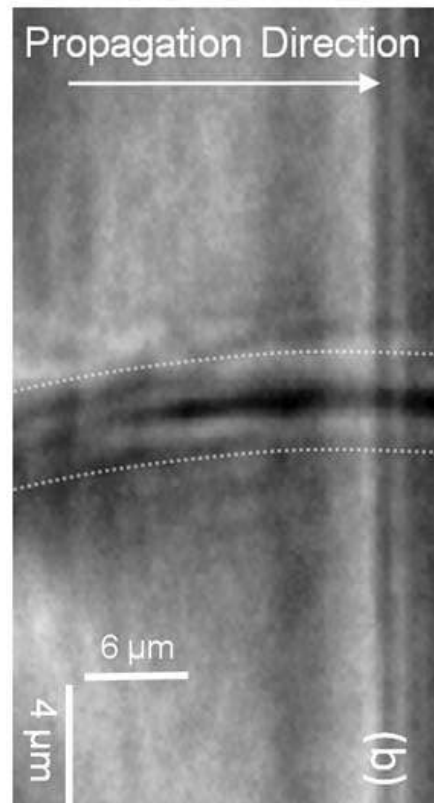
Faisceaux caustiques

- Régime fortement hors paraxial. Caustique circulaire



Application aux modifications d'indice “en courbe”

Faisceau parabolique



Froehly et al, Opt. Express
19, 16455-16465 (2011)

Conclusions

- Les propriétés de stabilité des faisceaux de Bessel non-diffractants sont une clé pour l'ablation à très haut rapport de forme.
- Génération de faisceaux à trajectoires arbitraires via une approche de faisceaux "caustiques".
- Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives technologiques.

