

Mise en forme spatiale de lasers - le modulateur spatial de lumière à base de cristaux liquides

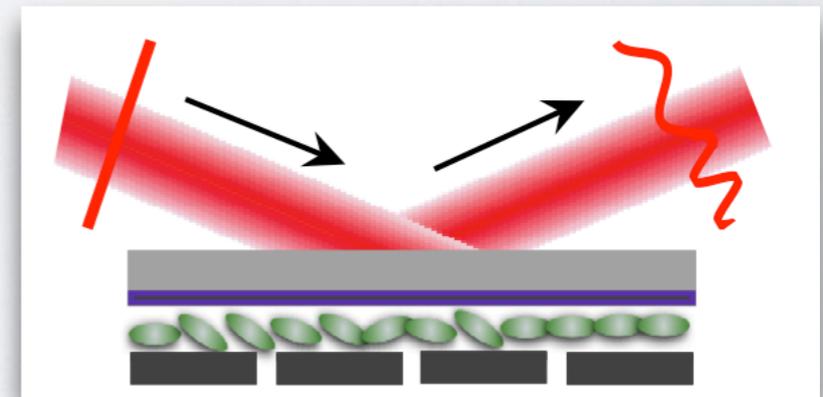
Aurélie Jullien

Institut de Physique de Nice, Université Côte d'Azur, CNRS, France

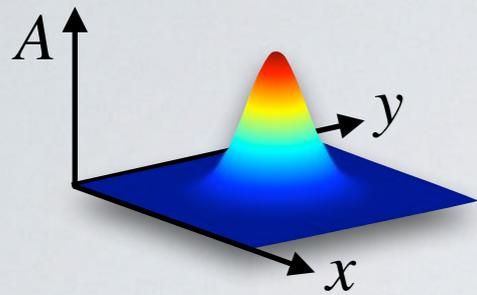
Aurelie.Jullien@inphyni.cnrs.fr

Mise en forme spatiale de lasers

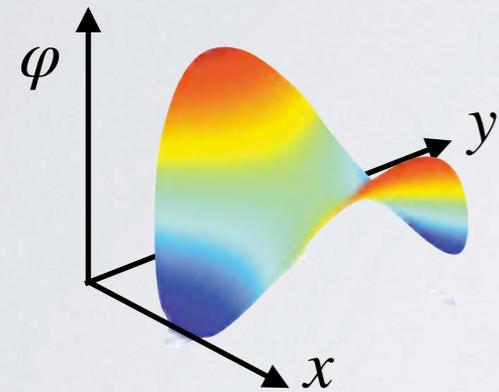
- ▶ Introduction
- ▶ Le SLM à cristaux liquides : définition et caractéristiques
- ▶ Le SLM dans le contexte femtoseconde
- ▶ Autres technologies : les miroirs déformables
- ▶ Programmation arbitraire
- ▶ Quelques applications



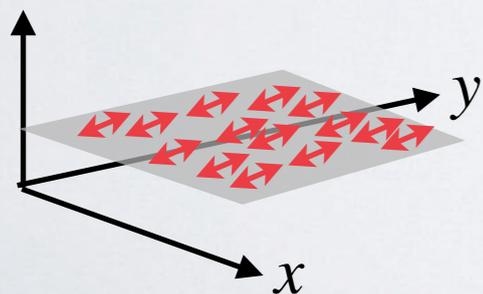
Amplitude complexe du champ électrique d'une onde lumineuse



Amplitude



Phase (front d'onde)

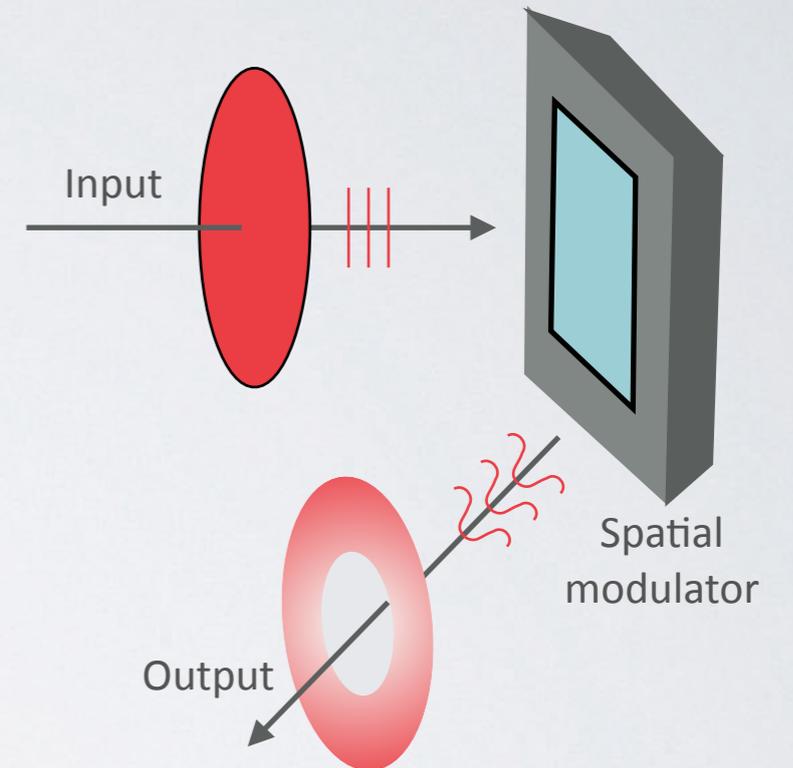


Polarisation

Apodiseurs
Filtres
Miroir à gradient réflectivité
Matrices micro-miroirs (DMD)
SLM

Miroirs et lames de phase
SLM
Miroirs déformables
MEMS

Lames à biréfringence variable
SLM

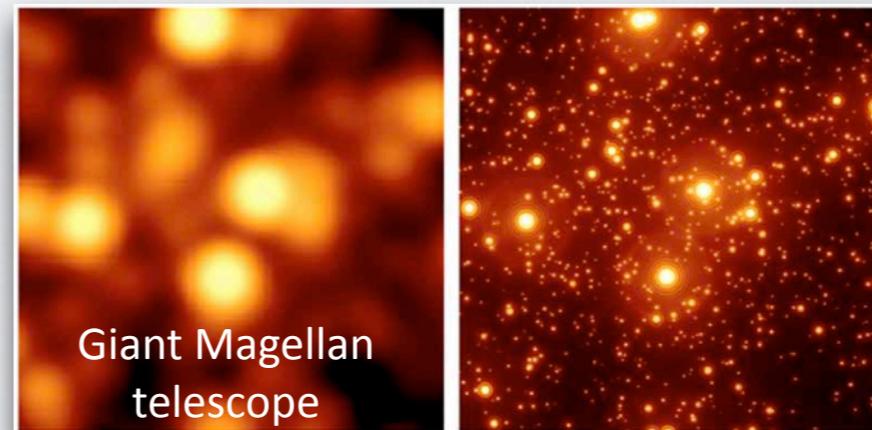


=> Dispositifs pour un contrôle actif de la phase spatiale

Pourquoi ?

=> Compenser les turbulences atmosphériques

Astronomie

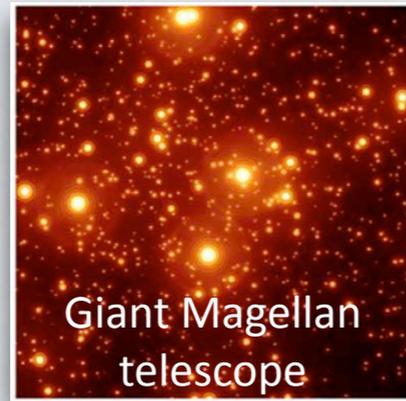


**Télécommunications
en espace libre**



Pourquoi ?

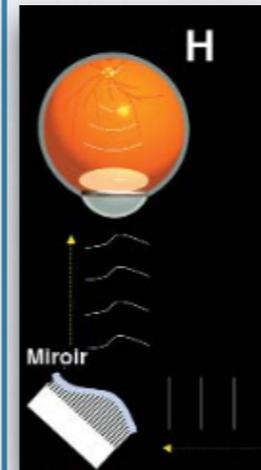
=> Compenser les turbulences atmosphériques



=> S'adapter aux déformations de front d'onde introduites par les milieux diffusants et complexes

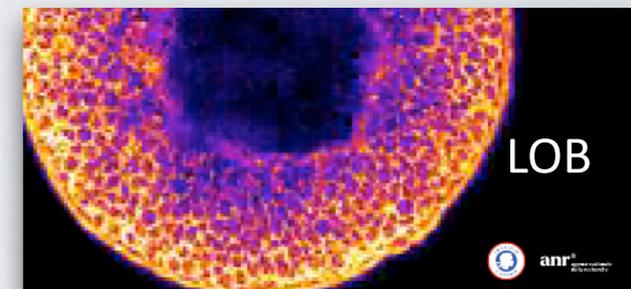
Biophotonique

Ophtalmologie



Hôpital Bichat

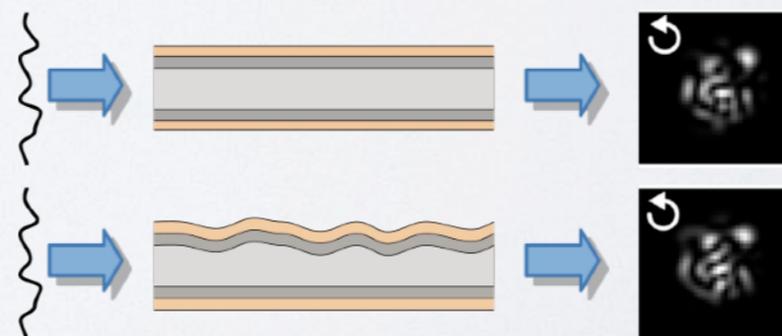
Microscopie super-résolue



Opto-génétique des circuits



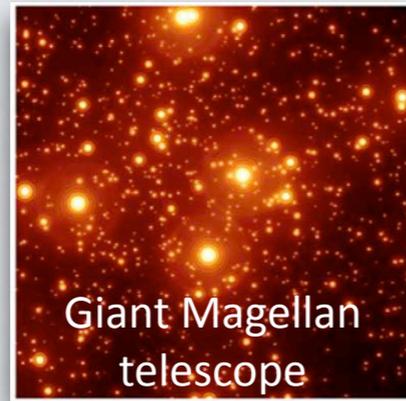
Ondes et images en milieux complexes



Popoff et Gigan, Photoniques (2021)

Pourquoi ?

=> Compenser les turbulences atmosphériques

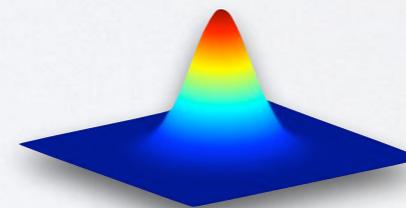


=> S'adapter aux déformations de front d'onde
introduites par les milieux diffusants et complexes

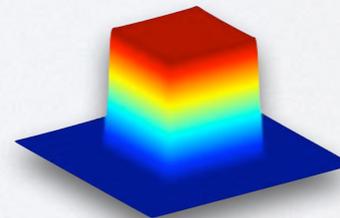


=> Compenser les aberrations des chaînes laser

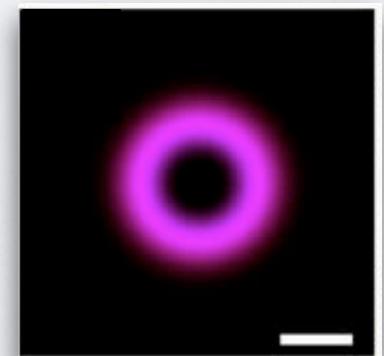
Lasers intenses



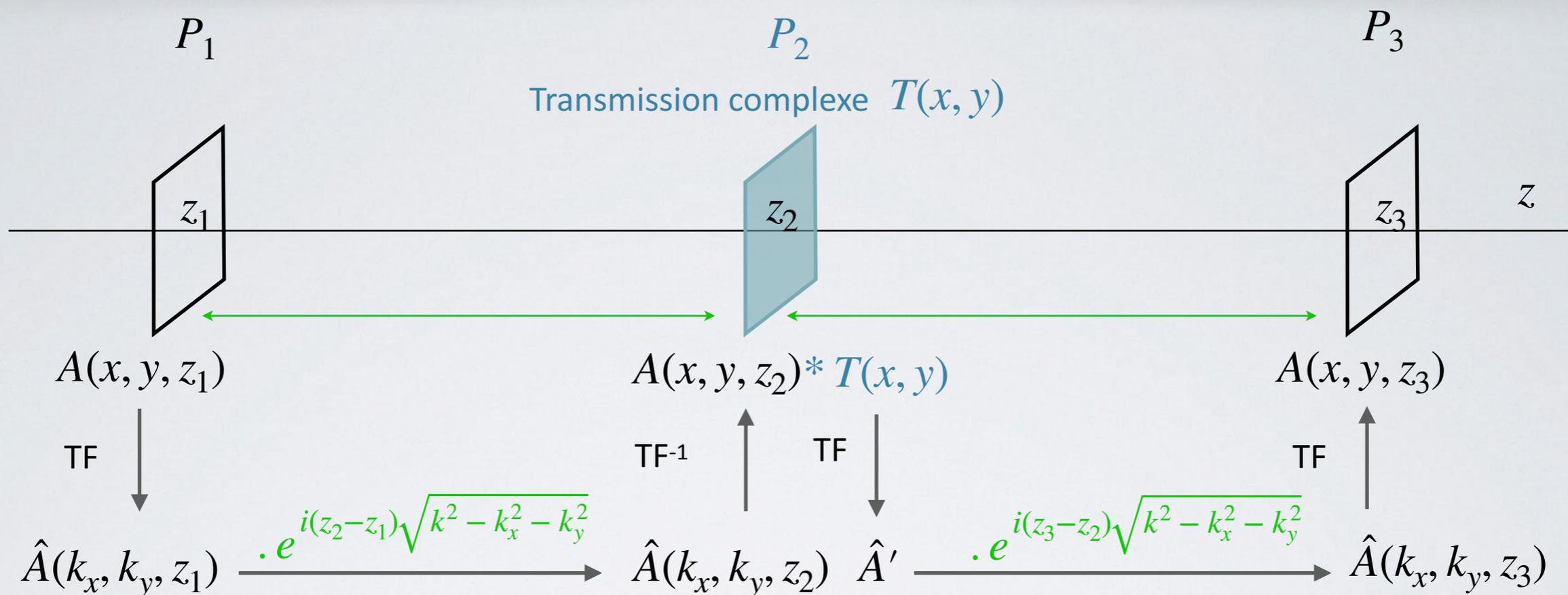
Optimisation de la PSF



Génération de faisceaux
non triviaux



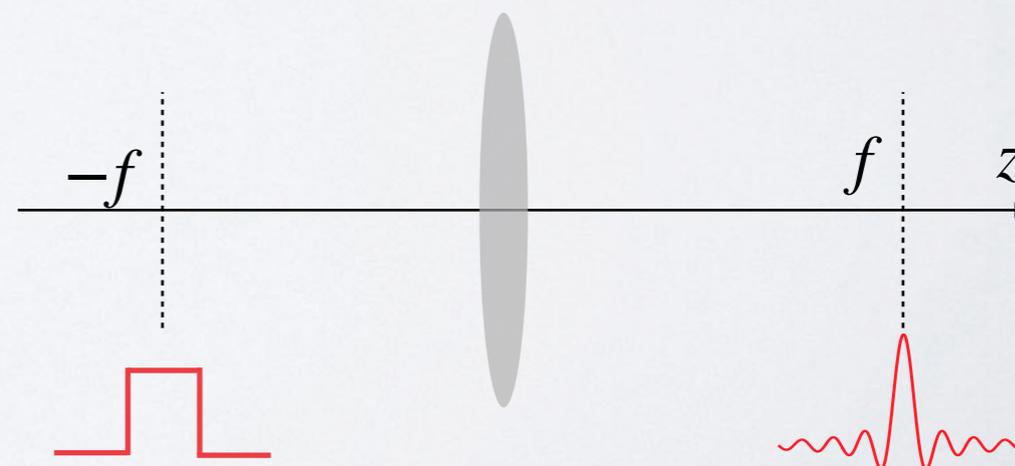
Modulation de la phase spatiale



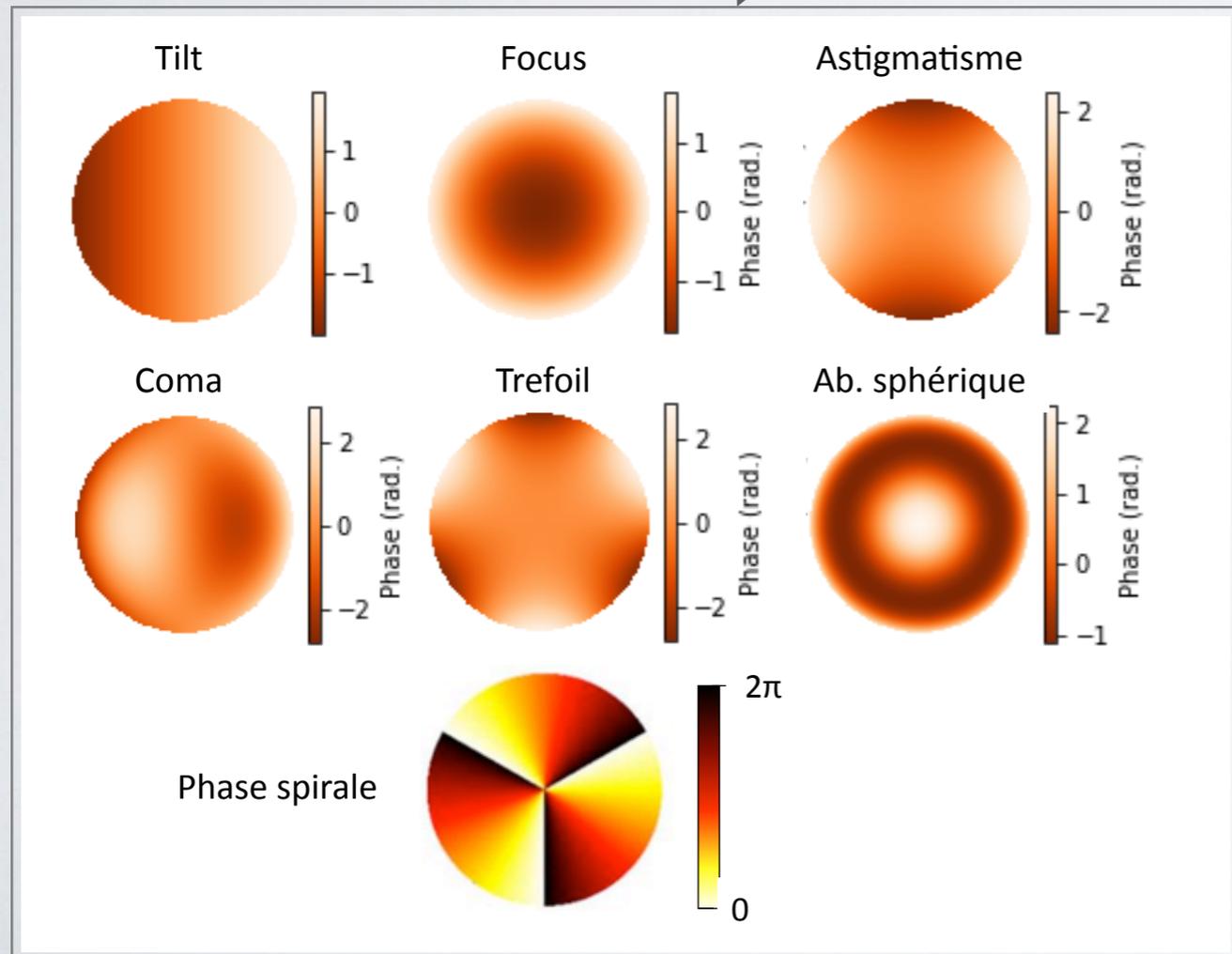
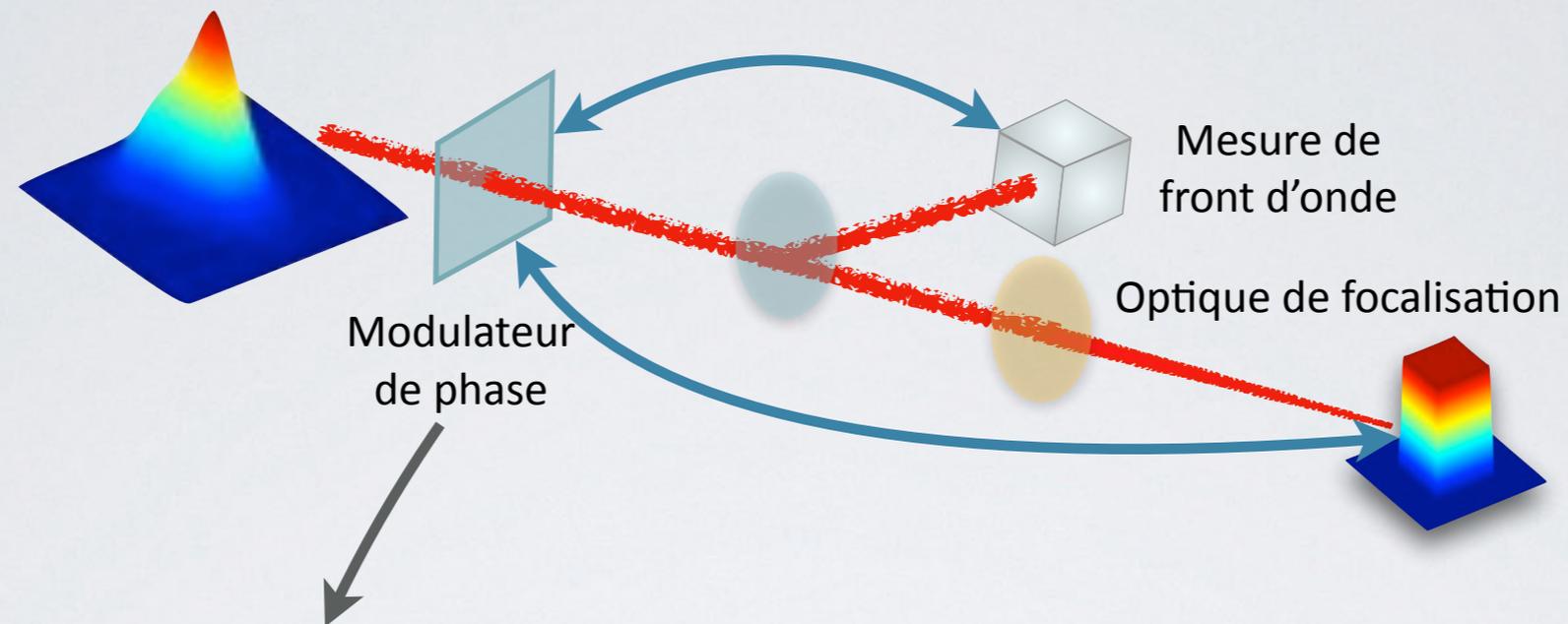
Born and Wolf, 1980

=> Un modulateur optique conçu pour une mise en forme spatiale donnée n'est efficace que dans la configuration de conception.

1 cas particulier :
la lentille comme Transformée de Fourier



Modulation de la phase spatiale



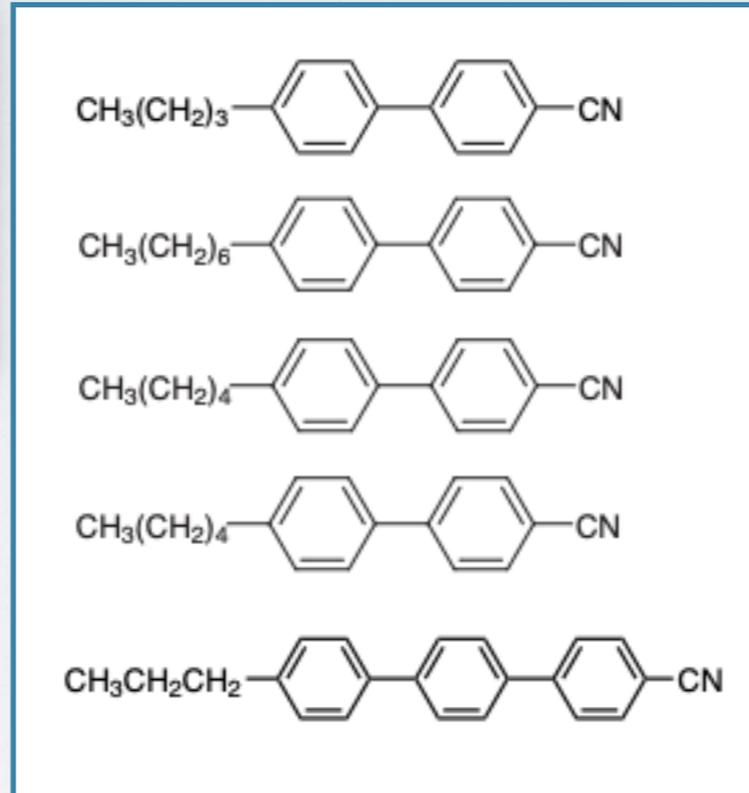
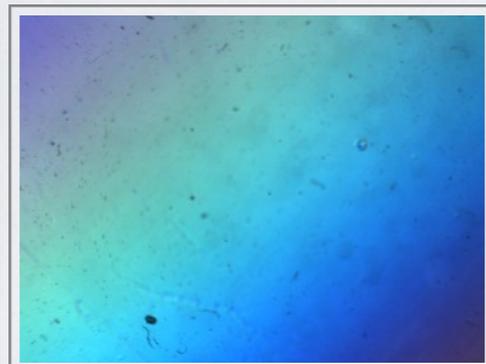
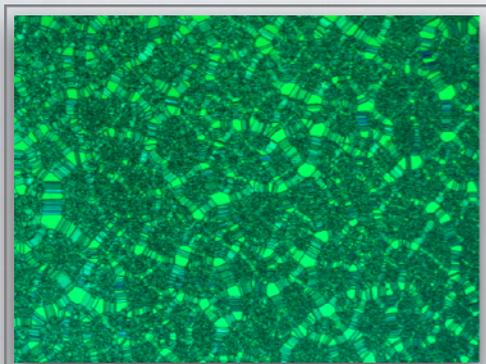
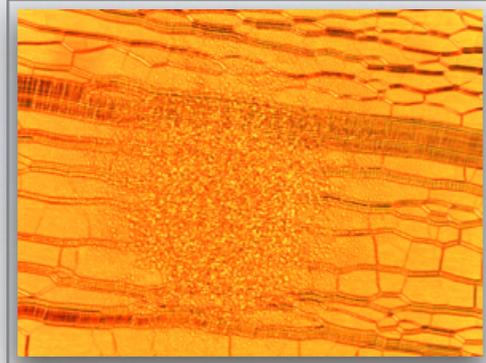
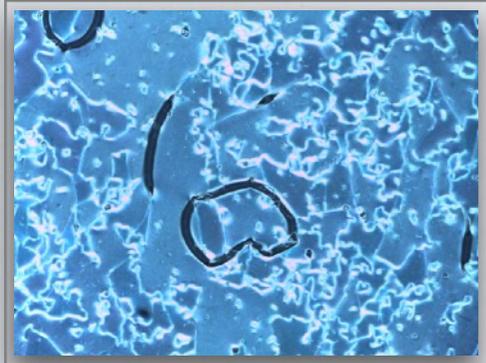
- ▶ Nombre de points de contrôle (actionneurs) par unité de surface
- ▶ Pupille
- ▶ Modulation de phase accessible

$$\varphi(\lambda, x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} n(\lambda, x, y) L$$

Les cristaux liquides sont un milieu mince, dispersif et programmable.

Cristaux liquides nématiques

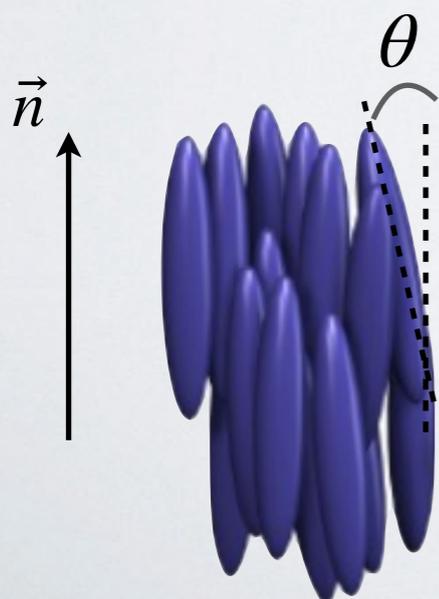
Cristaux liquides



Principales caractéristiques physiques :

- ▶ Anisotropie
 - ▶ Diélectrique $\Delta\epsilon = \epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}$
 - ▶ Optique $\Delta n = n_e - n_o$
- ▶ Viscosité $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$
- ▶ Température critique T_c

Cristaux liquides nématiques



Paramètre d'ordre

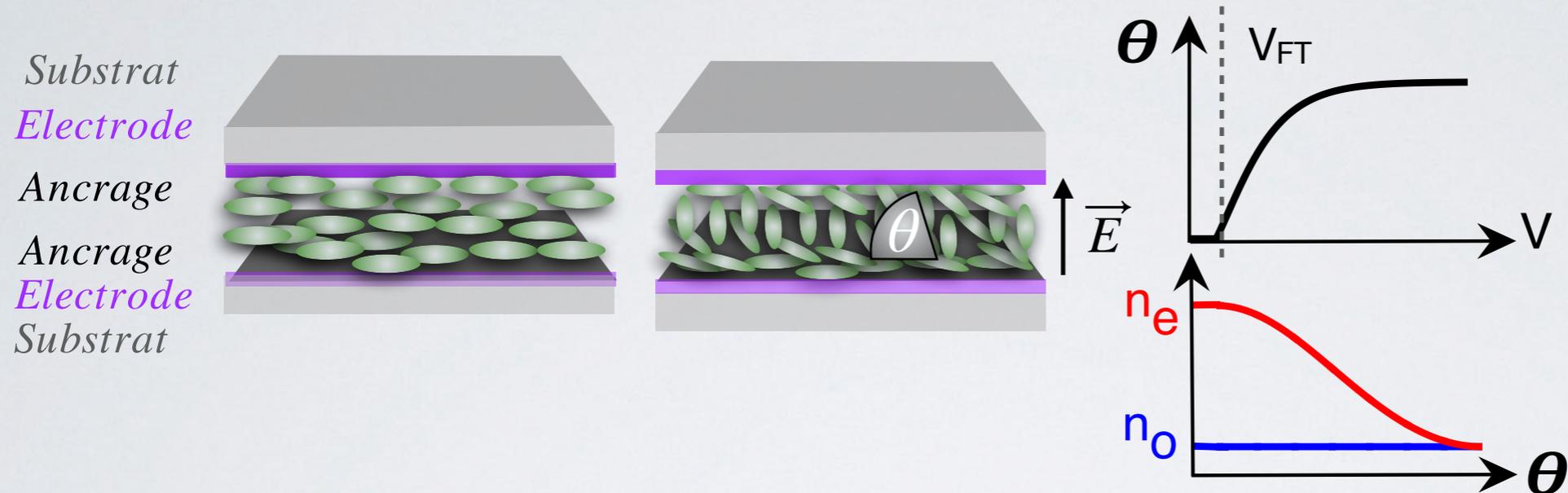
$$S = \left\langle \frac{3\cos^2\theta - 1}{2} \right\rangle$$

Propriétés optiques des nématiques :

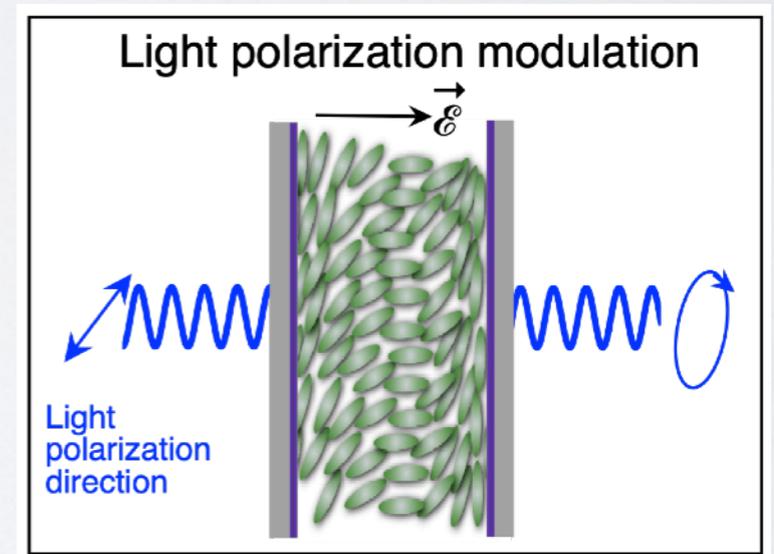
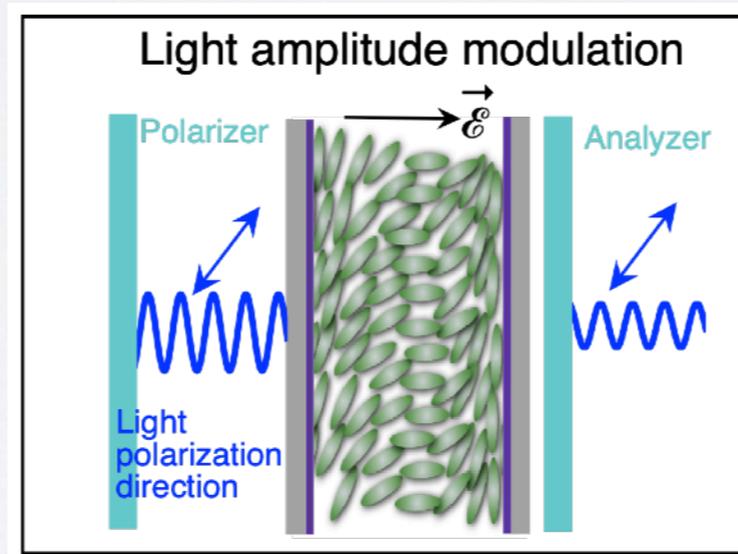
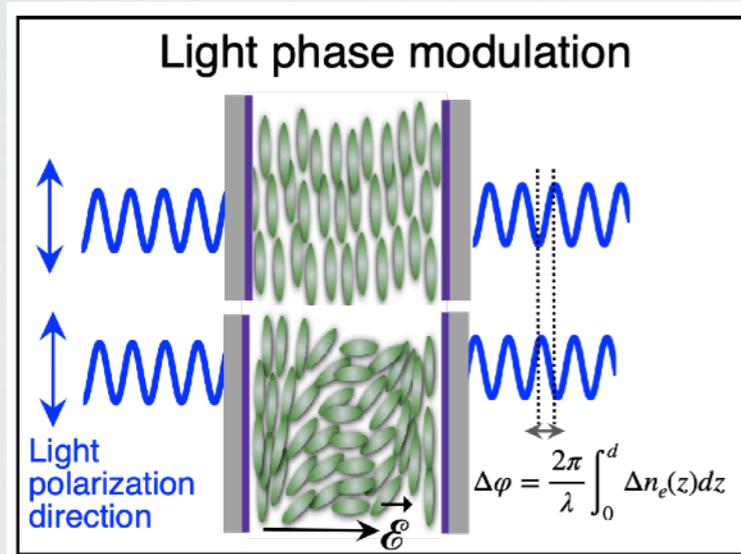
- ▶ Transparence (250 nm - 3 μm)
- ▶ Biréfringence élevée ($\Delta n=0.2$ for E7 @800nm, 25°)
- ▶ Biréfringence constante (250 nm - 3 μm)
- ▶ Biréfringence ajustable

Cristaux liquides nématiques

Cellule de cristal liquide



Modulation de la lumière

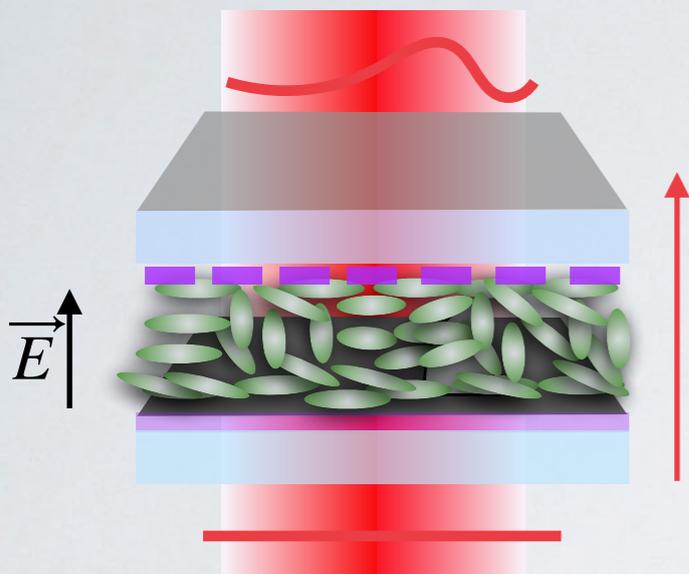


A.J., Spatial Light Modulator, Photoniques 62 (2020)

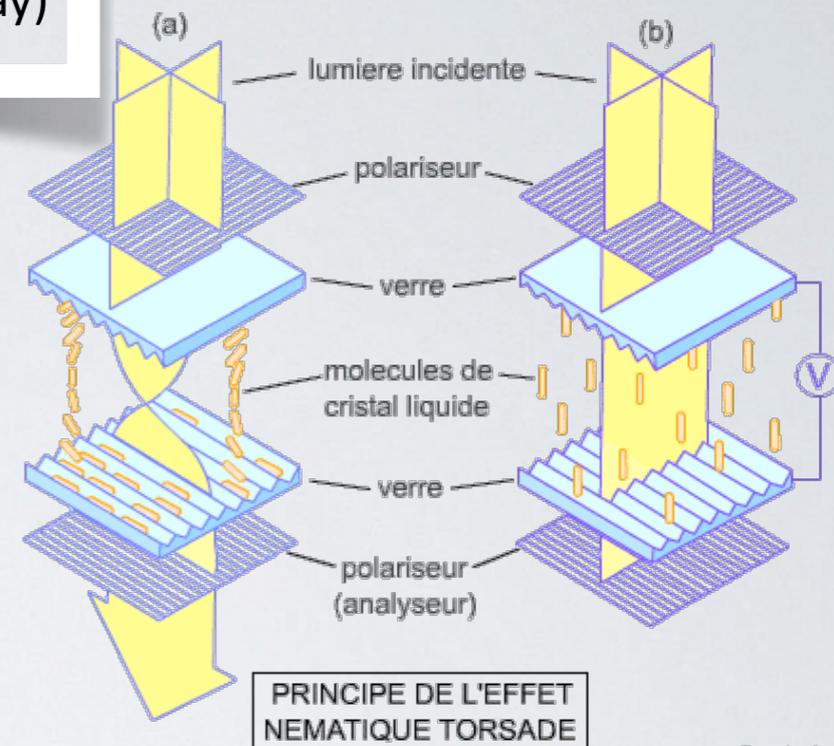
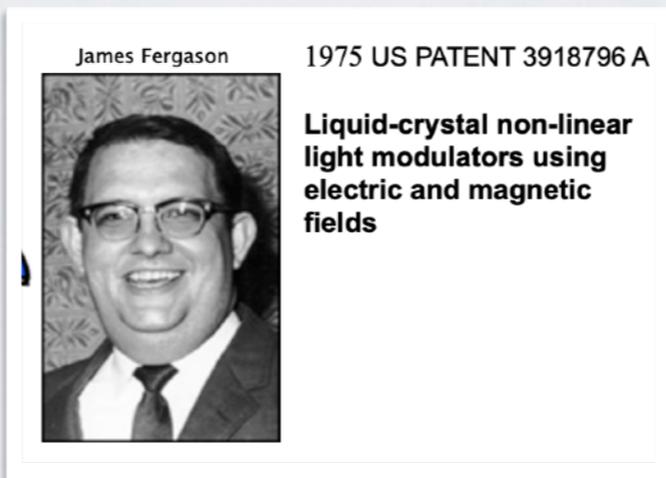
=> Ce dispositif simple permet de moduler la phase, l'amplitude ou la polarisation de la lumière en fonction de la présence ou absence d'éléments polarisants.

Modulateur spatial de lumière (SLM)

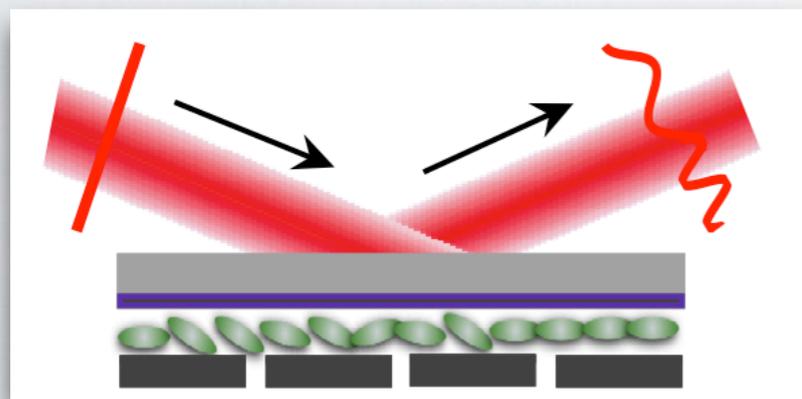
SLM en transmission



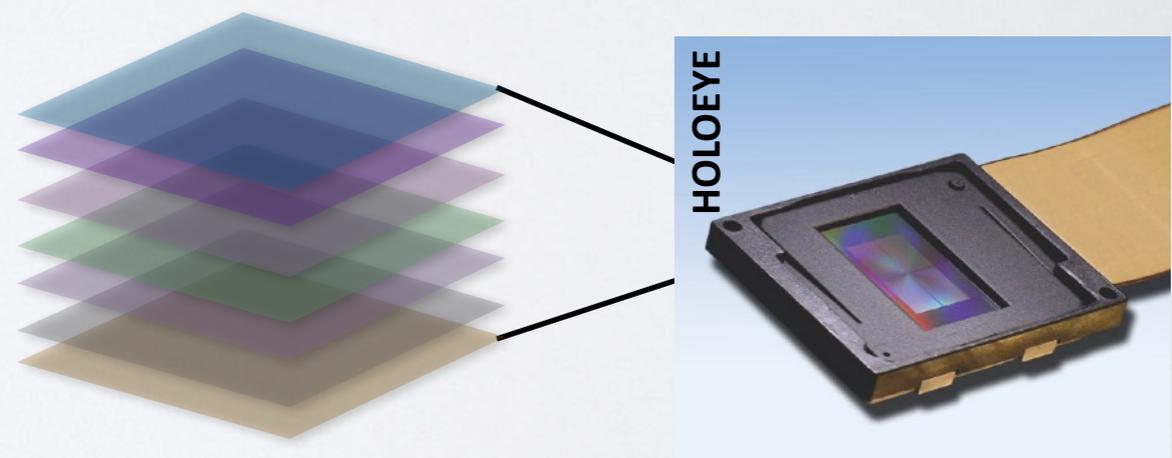
Un SLM particulier : le LCD (Liquid Crystal Display)



SLM en réflexion : LCoS (Liquid Crystal on Silicium)



- Glass
- Electrode
- Anchoring layer
- Liquid crystal layer
- Anchoring layer
- Reflective layer (pixelized)
- CMOS



A.J., Spatial Light Modulator, Photoniques 62 (2020)

=> La majorité des SLMs à adressage électrique commerciaux sont des LCoS.

Fournisseurs de SLMs



Critères de performance



SLM (LCoS)

Fonction

Phase ou amplitude
ou polarisation

Transmission / Reflection

???

Modulation de phase

???

Pupille

???

Résolution spatiale

???

Points de contrôle

???

Temps de réponse (on-off)

???

Temps de rafraichissement

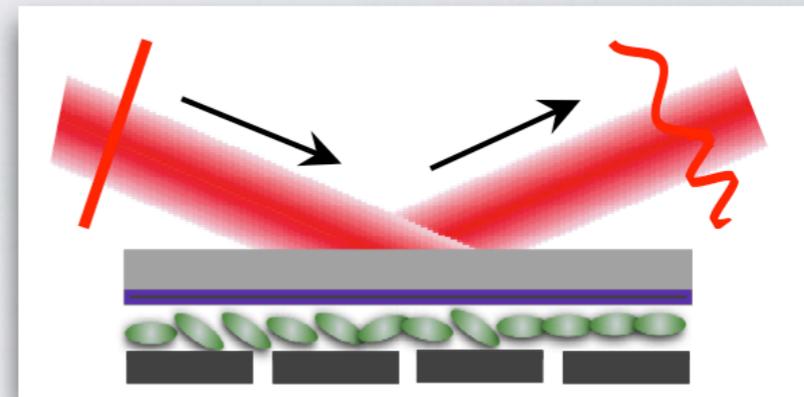
???

Adressage

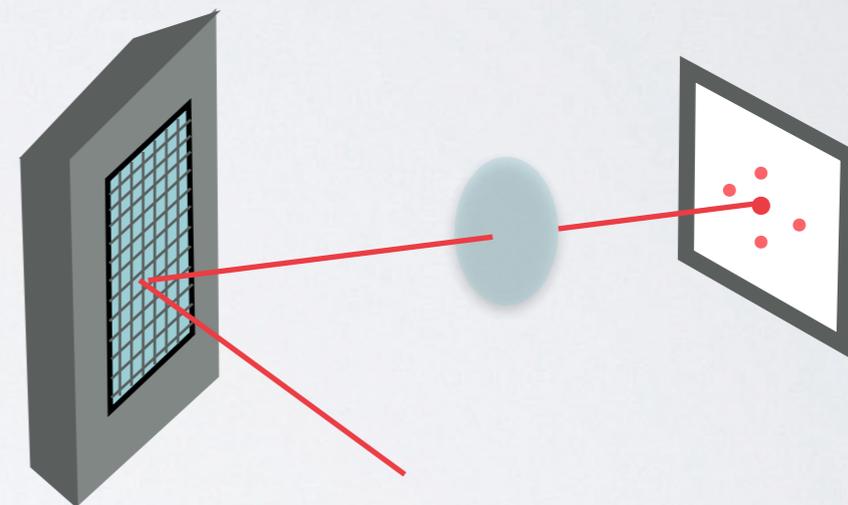
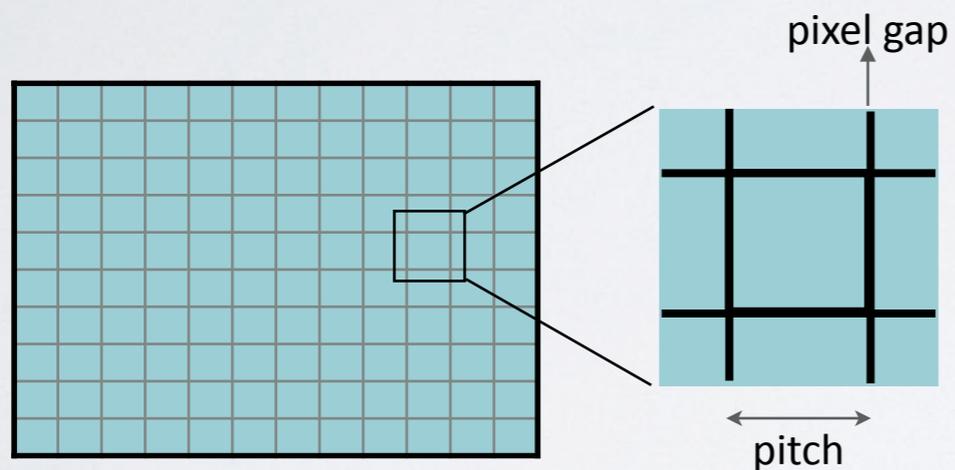
Pixellisé

Efficacité (transmission, réflexion)

Pertes de Fresnel aux (nombreuses) interfaces



Pertes par diffraction

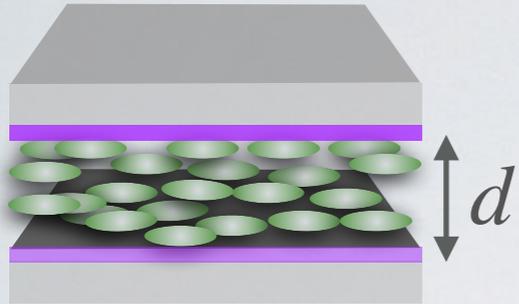


Facteur de remplissage $\approx 90\%$ \Rightarrow Pertes par diffraction $\approx 20\%$

\Rightarrow Réflectivité 75% - 80% en moyenne

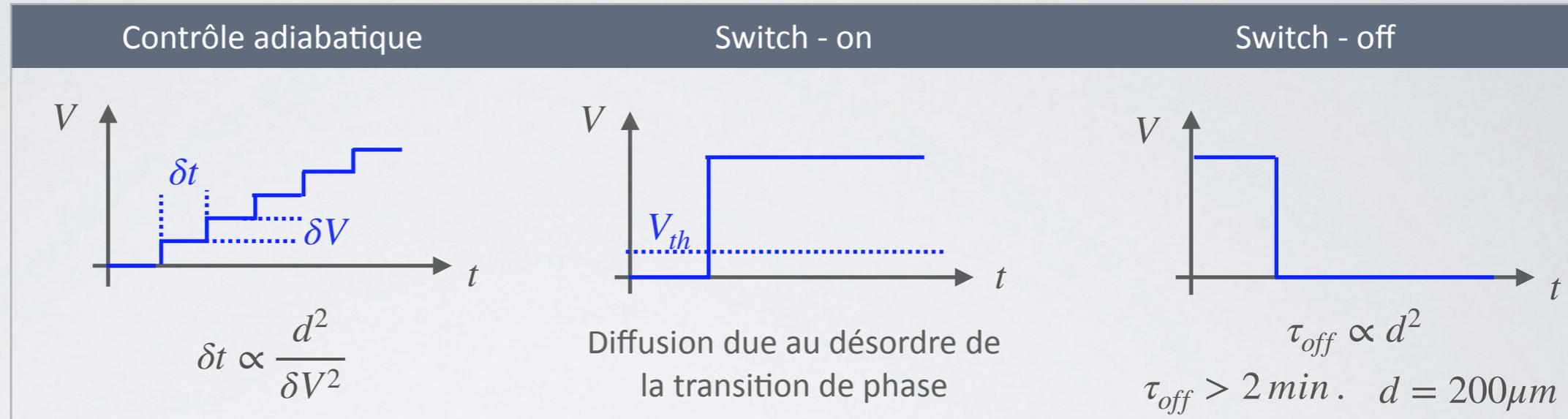
Dynamique de modulation de phase

Epaisseur de la couche de cristal liquide



$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda} \int_0^d \Delta n_e(z, \theta) dz$$

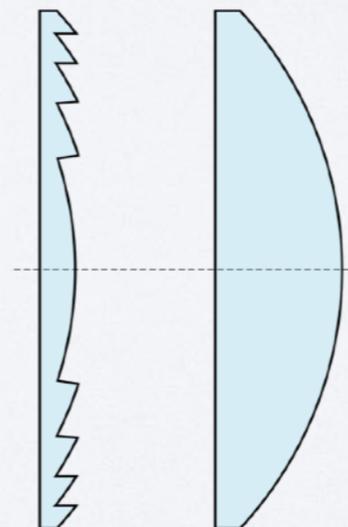
$$\tau_{ON,OFF} \propto d^2$$



Epaisseur de cristal liquide limitée à $\sim < 20 \mu\text{m}$

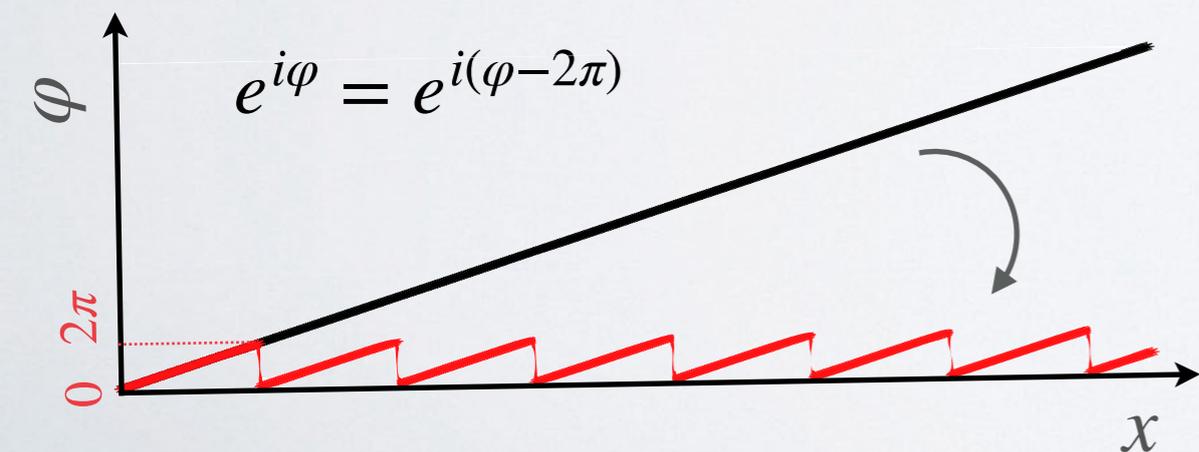
Modulation de phase limitée à 2π

Lentille de Fresnel



Echantillonnage => limitations pour la propagation grande distance, forte focalisation de faisceau de grand diamètre

Limite l'application aux grandes longueurs d'onde



Critères de performance



Take home messages

	SLM (LCoS)
Fonction	Phase ou amplitude ou polarisation
Transmission / Reflection	80 %
Modulation de phase	2π
Pupille	1-2 cm ²
Résolution spatiale	20 μm
Points de contrôle	10 ⁶ pts/cm ²
Temps de réponse (on-off)	100 ms
Temps de rafraichissement	ms
Adressage	Pixellisé

Polyvalent

Pertes de Fresnel à chaque interface
+ pertes par diffraction

Pupille limitée

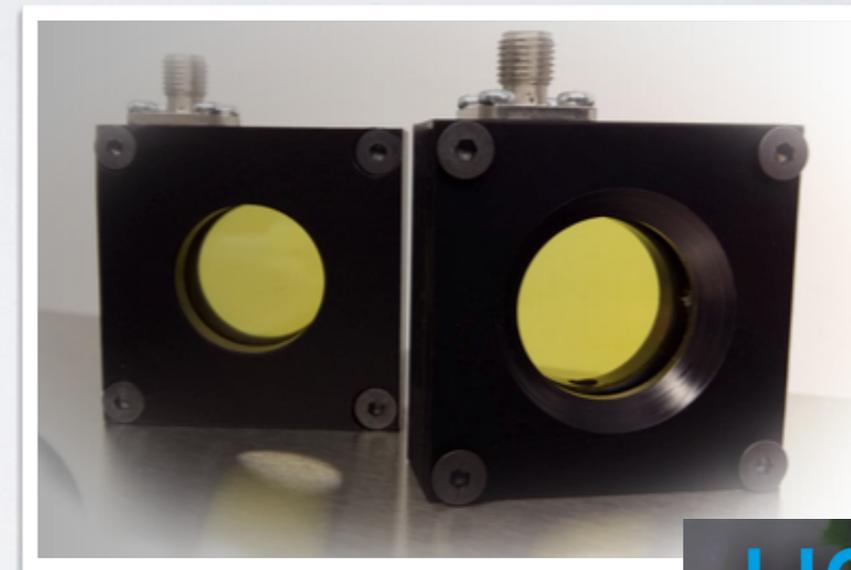
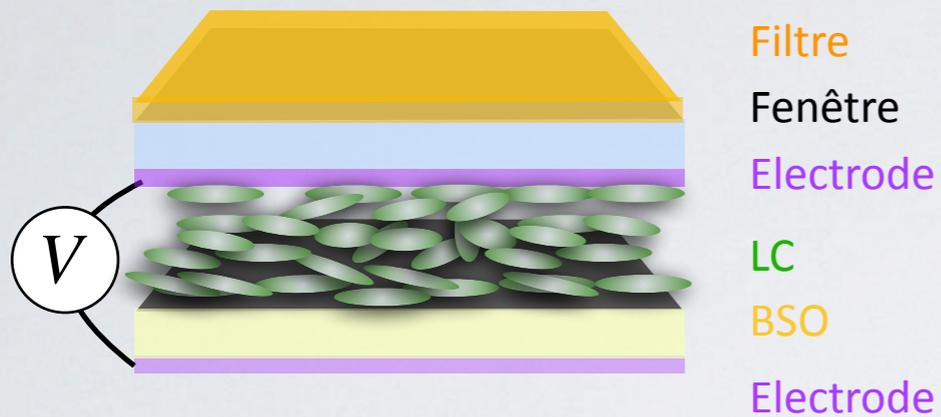
Excellente résolution spatiale

100 Hz - 10 Hz

Segments inactifs entre les pixels

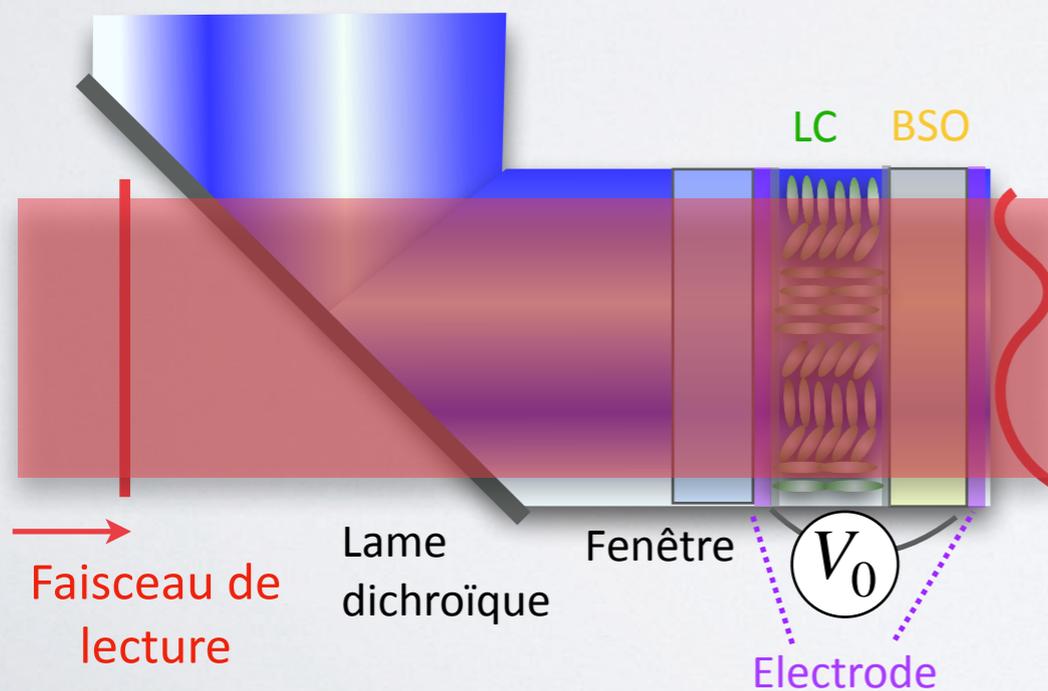
Valves optiques

Brevet Thales (Thomson) 1982



HOASYS

Faisceau d'écriture (450 nm)



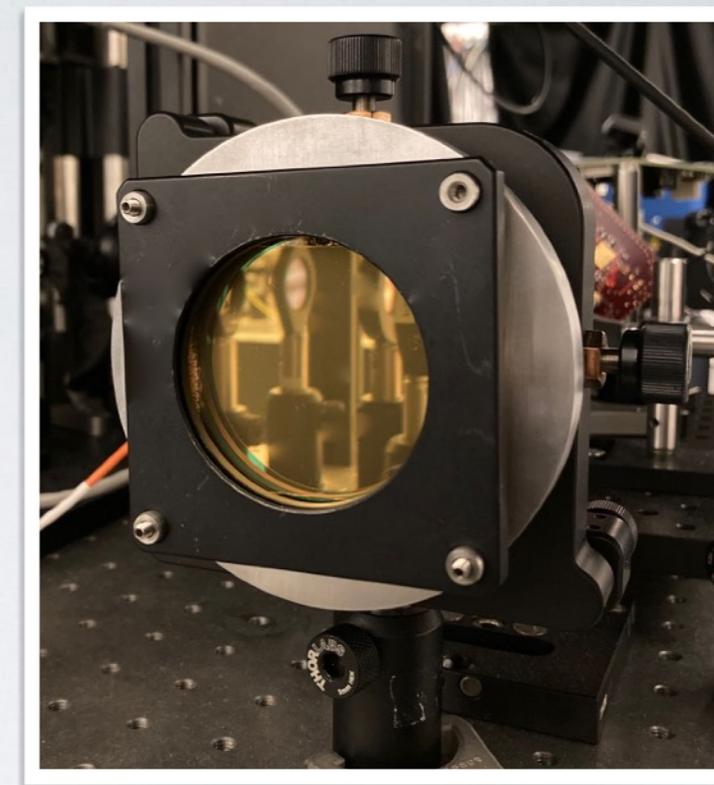
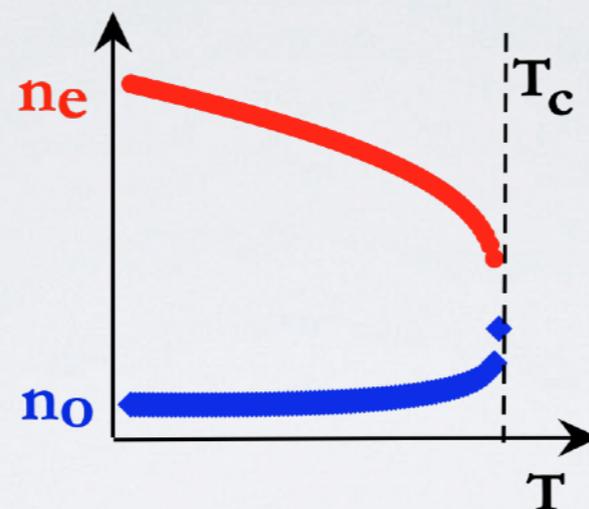
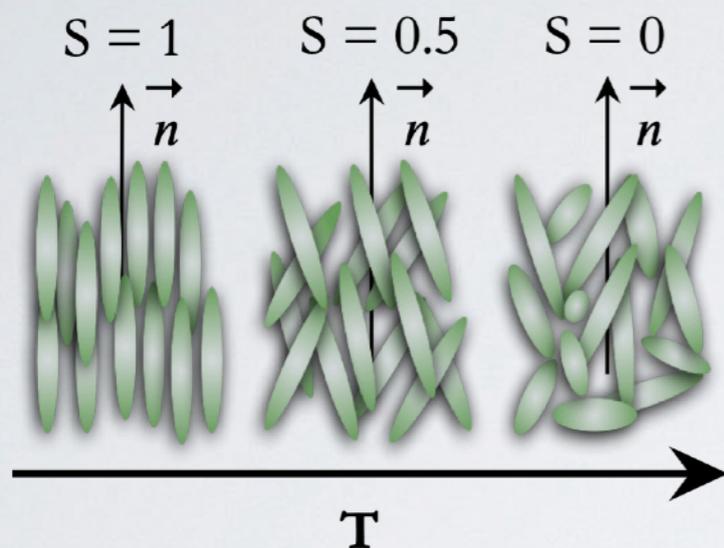
- ✓ Adressage optique continu
- ✓ Compatible épaisseur de LC ~ 50 μm
- ❖ BSO...

Thèse N. Sanner (2005)

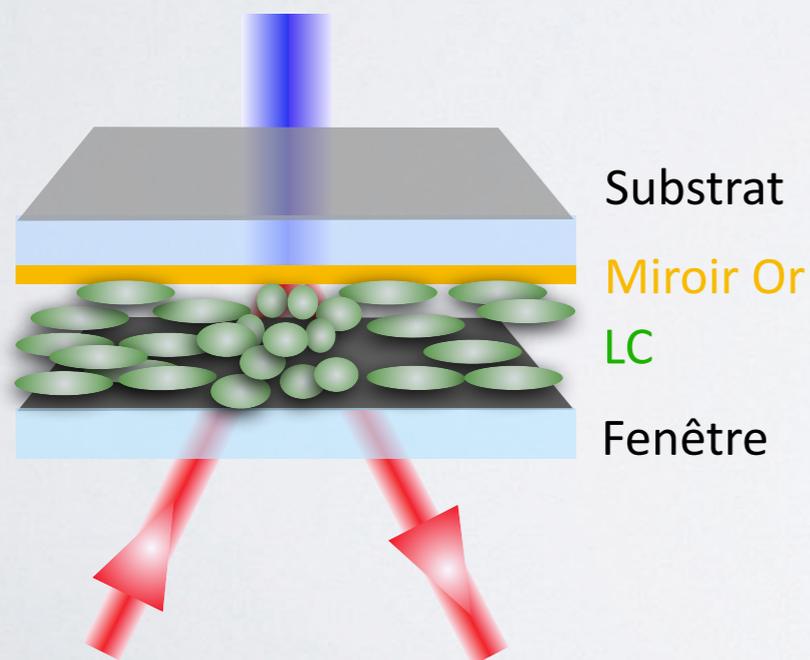
S. Residori et al., *Liquid Crystal Review* (2018)

Valves thermo-optiques (TOA-SLM)

Biréfringence contrôlée par la température



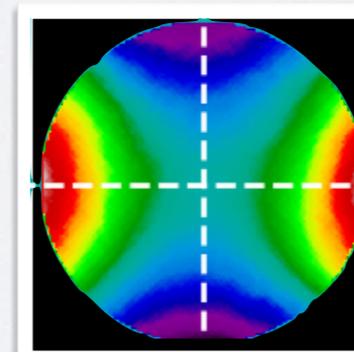
Faisceau d'écriture



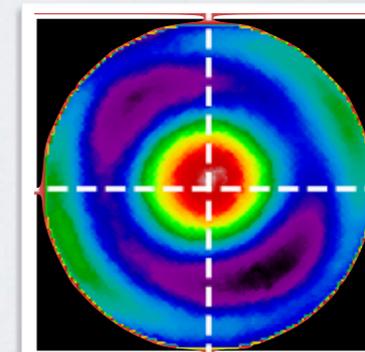
Faisceau de lecture

- ✓ Structure multi-couche simplifiée
- ✓ Adressage optique continu
- ✓ Compatible épaisseur de LC $\sim 80 \mu\text{m} * 2$
- ✿ Diffusion thermique

Astigmatisme



Aberration sphérique

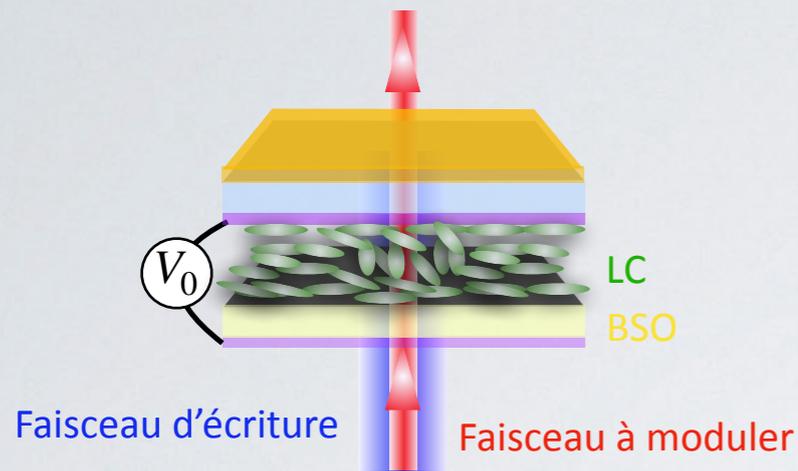


Brevet CNRS Fastlite 2019

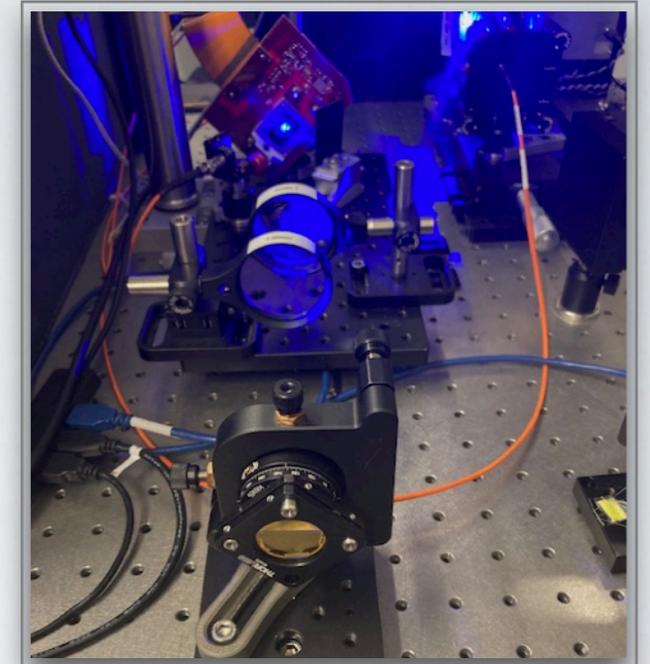
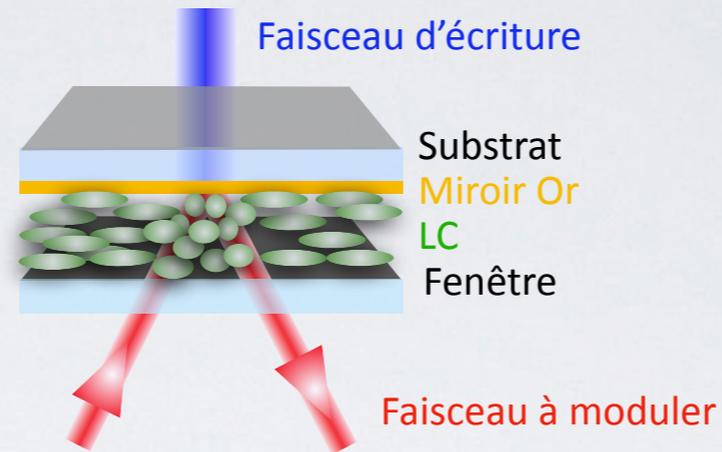
Li et al., Journ. of App. Phys. (2004)
V. Di Pietro et al., Optics Letters (2020)
S. Barland et al., Optics Express (2023)

Modulation en amplitude du faisceau d'écriture

Valve électro-optique

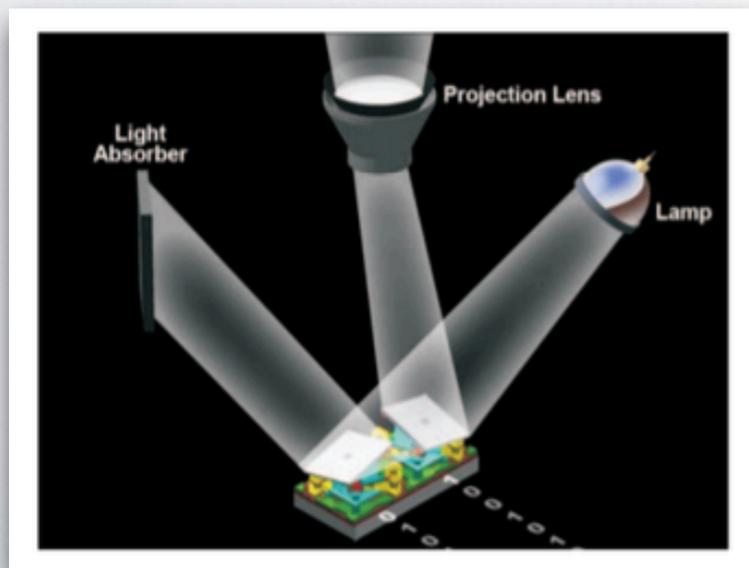


Valve thermo-optique



Les dispositifs à adressage optique requièrent la modulation en amplitude, en 2D, du faisceau d'écriture.

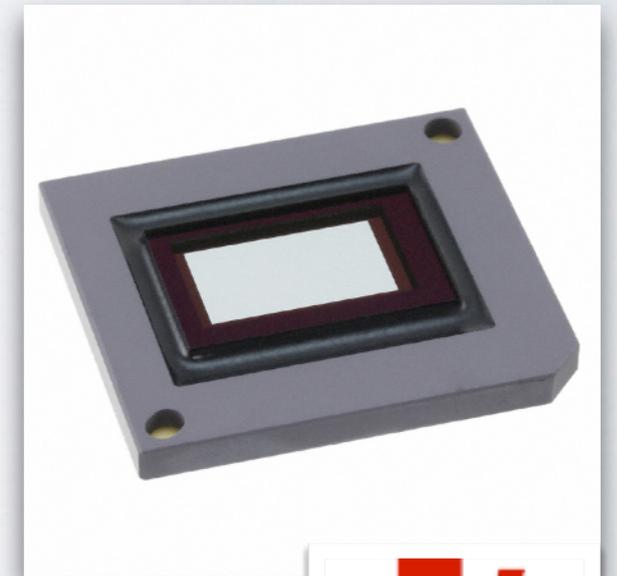
Digital Micromirror Device (DMD)



@ Texas Instruments

Matrice de micro-miroirs

- ▶ Modulation amplitude 0-1
- ▶ Encodage du motif sur 8 bits
- ▶ Haute résolution (1080x1920 pixels)
- ▶ Surface : ~ 1 cm²



Critères de performance



Take home messages

	SLM (LCoS)	Valve optique	TOA-SLM
Fonction	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation
Transmission / Reflection	80 %	< 80 %	90 %
Modulation de phase	2π	$> 2\pi$	$\gg 2\pi$
Pupille	1-2 cm ²	1-2 cm ²	$> 5\text{ cm}^2$
Résolution spatiale	20 μm	100 μm	500 μm
Points de contrôle	10 ⁶ pts/cm ²	10 ⁴ pts/cm ²	400 pts/cm ²
Temps de réponse (on-off)	100 ms	100 ms	1 s
Temps de rafraichissement	< ms	< ms	100 ms
Adressage	Pixellisé	Continu	Continu

Polyvalent

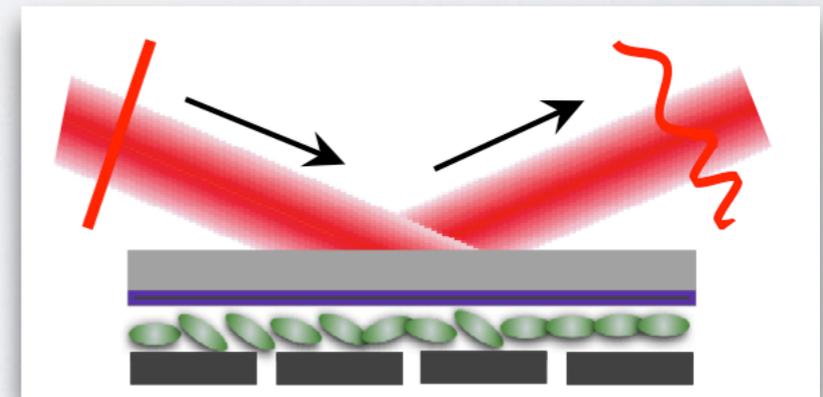
Dynamique de modulation de phase élevée

Résolution spatiale moindre

Adressage continu

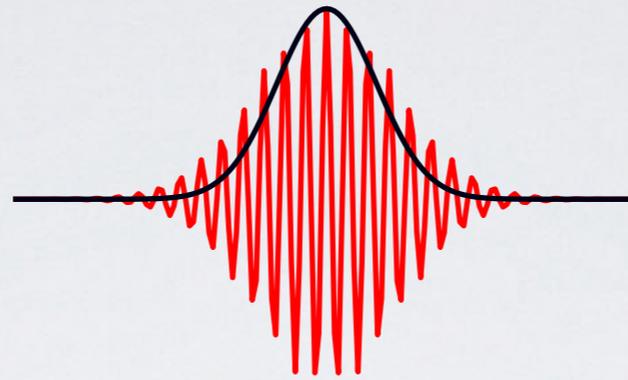
Mise en forme spatiale de lasers

- ▶ Introduction
- ▶ Le SLM à cristaux liquides : définition et caractéristiques
- ⇒ ▶ Le SLM dans le contexte femtoseconde
- ▶ Autres technologies : les miroirs déformables
- ▶ Programmation arbitraire
- ▶ Quelques applications



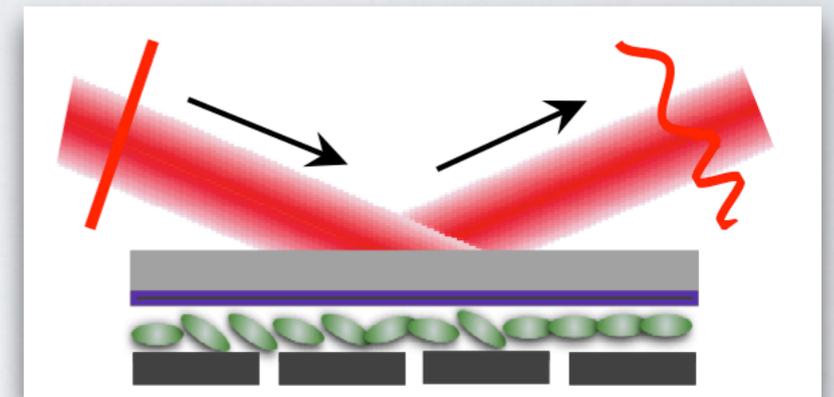
Contexte : sources femtosecondes

Cristaux liquides nématiques



?

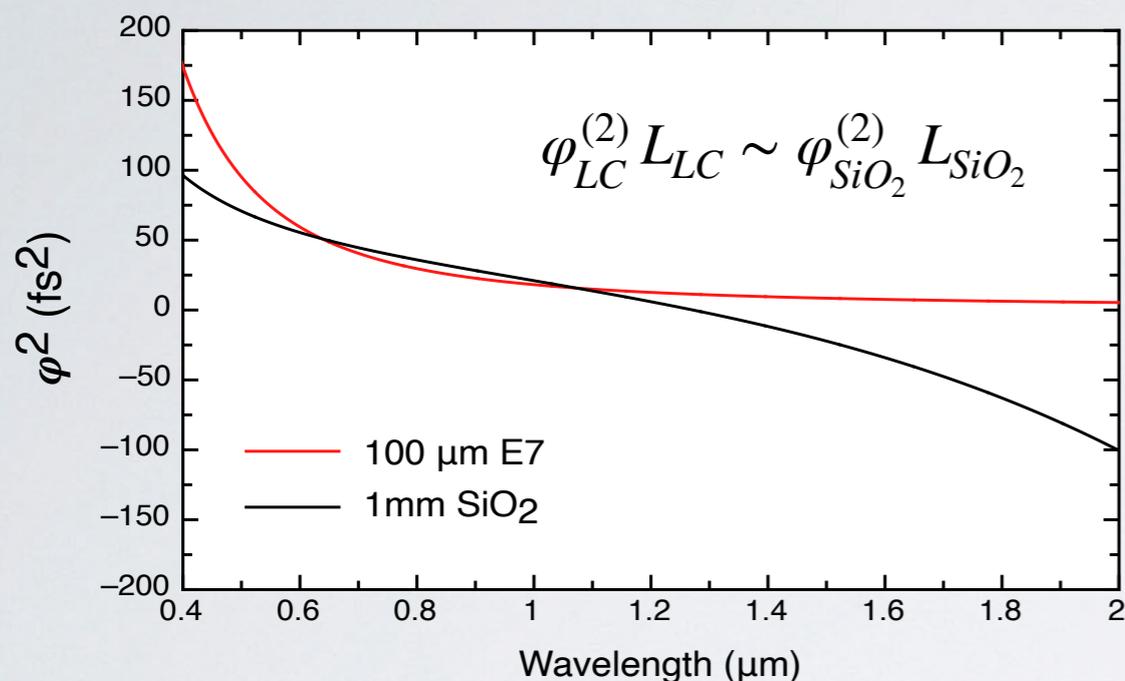
SLMs



250 - 3000 nm	Acceptance spectrale => maximale	???
???	Dispersion => minimale	???
???	Coefficient non linéaire => minimal	???
???	Résistance au flux laser => maximale	???

Cristaux liquides nématiques

Dispersion



Li et al., Journ. of App. Phys. (2004)
V. Di Pietro et al., Applied Sciences (2020)

Coefficient non linéaire (n_2)

CL	n_2^o (cm ² /W)	n_2^e (cm ² /W)
E7	$(2.44 \pm 0.3) 10^{-16}$	$(15.5 \pm 0.3) 10^{-16}$

$$B = \frac{2\pi}{\lambda} \int n_2 I(z) dz \quad B_{LC} \sim 0.7 \times B_{substrat}$$

E. Neradovskaia et al., APL photonics (2022)
B. Maingot et al., Optics Letters (2023)

Laser-induced damage threshold (LIDT)

► **Impulsions ps - ns** *Kosc et al., Scientific Reports (2019)*

Exposition monocoup :

LIDT (E7) > 1 J/cm²

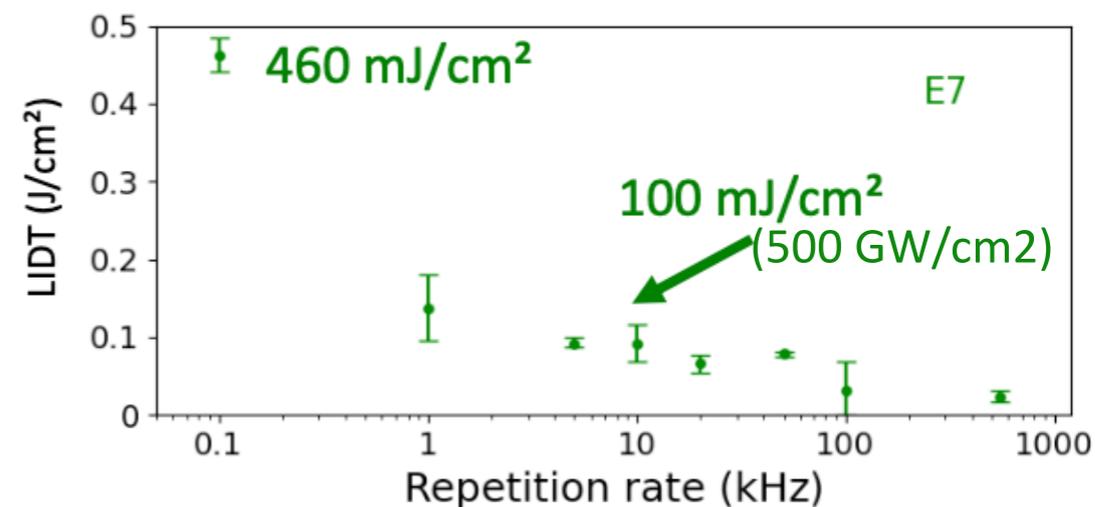
@ 1 μm , 1 ps

► **Impulsions fs** *L. Ramousse et al., Applied Optics (2021)*

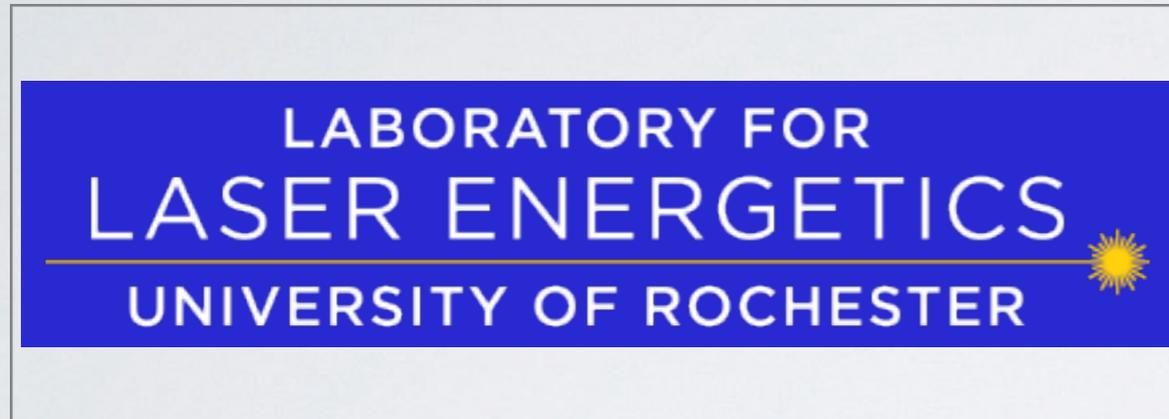
Exposition monocoup :

LIDT (E7) ~ 1 J/cm²

@ 1 μm , 200 fs



1 exemple : Omega EP



- ▶ Modification locale de la couche d'ancrage par UV-lithographie
- ▶ Phase shaping @ 1053 nm, 1 ns
- ▶ LIDT : 34 J/cm² (nanoseconde, monocoup)

October 15, 2011 / Vol. 36, No. 20 / OPTICS LETTERS 4035

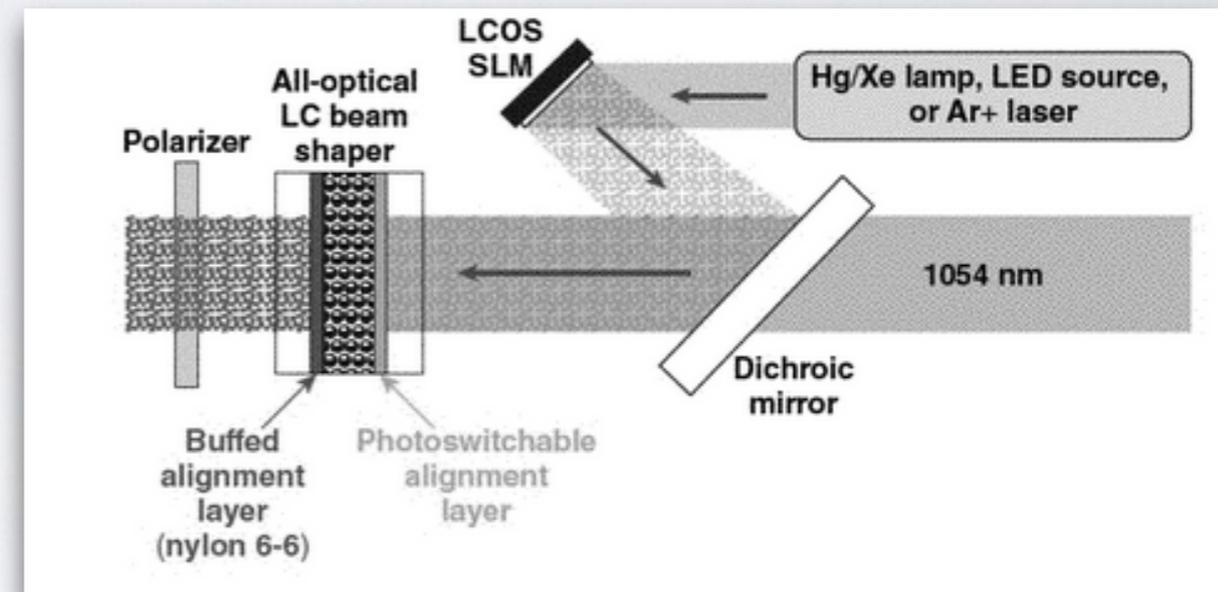
High-damage-threshold static laser beam shaping using optically patterned liquid-crystal devices

C. Dorrer,^{1*} S. K.-H. Wei,² P. Leung,¹ M. Vargas,¹ K. Wegman,¹ J. Boulé,¹ Z. Zhao,¹ K. L. Marshall,¹ and S. H. Chen²

¹Laboratory for Laser Energetics, University of Rochester, 250 East River Road, Rochester, New York 14623-1299, USA

²Department of Chemical Engineering, University of Rochester, Rochester, New York 14627, USA

*Corresponding author: cdorrer@lle.rochester.edu



ACS APPLIED
NANO MATERIALS

www.acsanm.org

Letter

Highly Saturated Glassy Liquid Crystal Films Having Nano- and Microscale Thicknesses for High-Power Laser Applications

Jason U. Wallace,* Kenneth L. Marshall, Donald J. Batesky, Tanya Z. Kosc, Brittany N. Hoffman, Semyon Papernov, Londra Garrett, Jalil Shojaie, and Stavros G. Demos

Cite This: *ACS Appl. Nano Mater.* 2021, 4, 13–17

Read Online

LIDT des SLMs



SLMs électro-optique
(LCoS et valve optique)

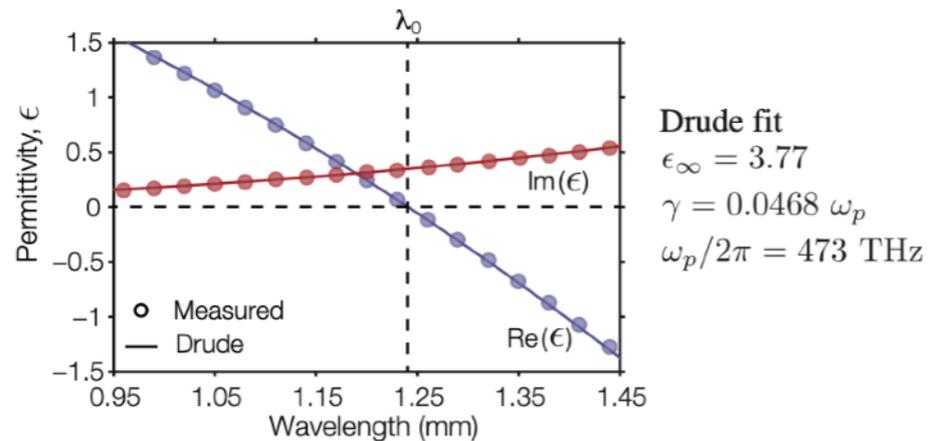


- ▶ Limitations liées à l'électrode (ITO) :
 - ▶ Acceptance spectrale $\ll 1.5 \mu\text{m}$

The Epsilon-Near-Zero (ENZ) region of Indium Tin Oxide (ITO)

Measured real and imaginary parts of the dielectric permittivity.

Commercial ITO sample, 310 nm thick on a glass substrate



Note that $\text{Re}(\epsilon)$ vanishes at 1.24 μm , but that the loss-part $\text{Im}(\epsilon)$ is non-zero.

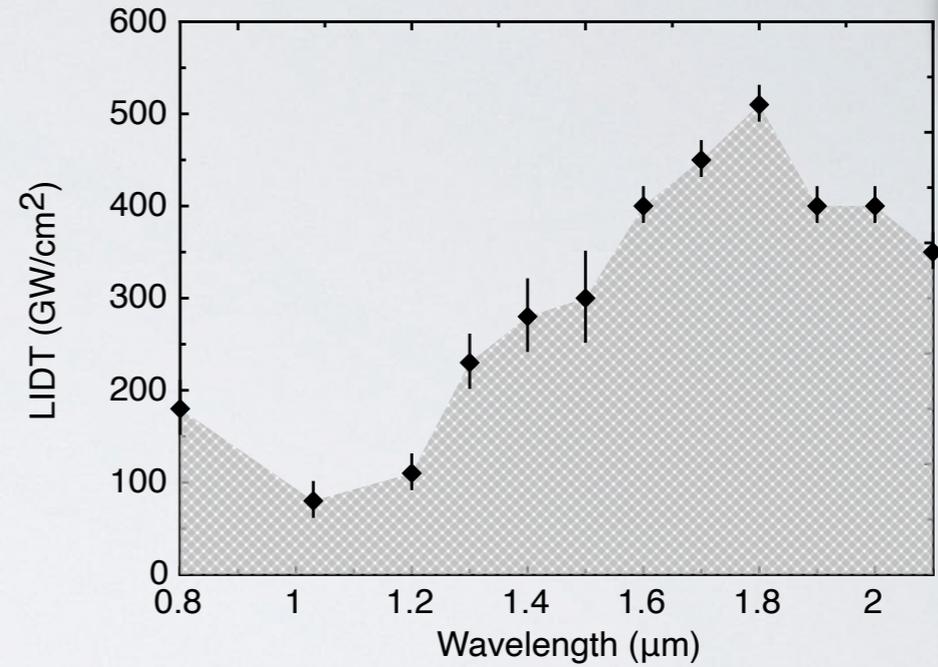
Alam et al., Science Reports, 2016

- ▶ LIDT (fs, @ 800 nm) $< 50 \text{ GW/cm}^2$ en conditions d'usage

Hamamatsu

L'électrode est restrictive par rapport au cristal liquide en terme de LIDT.

SLMs thermo-optique

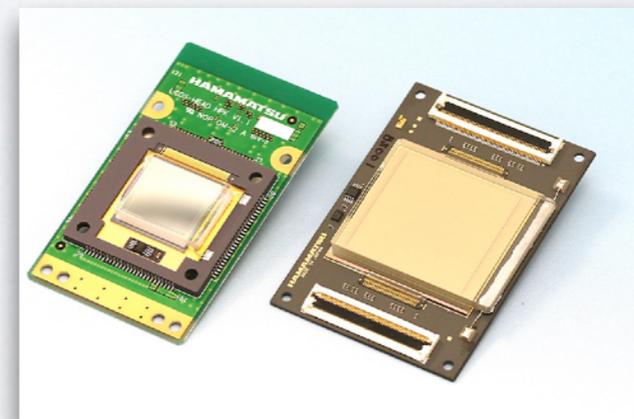


L. Ramousse et al., under publication

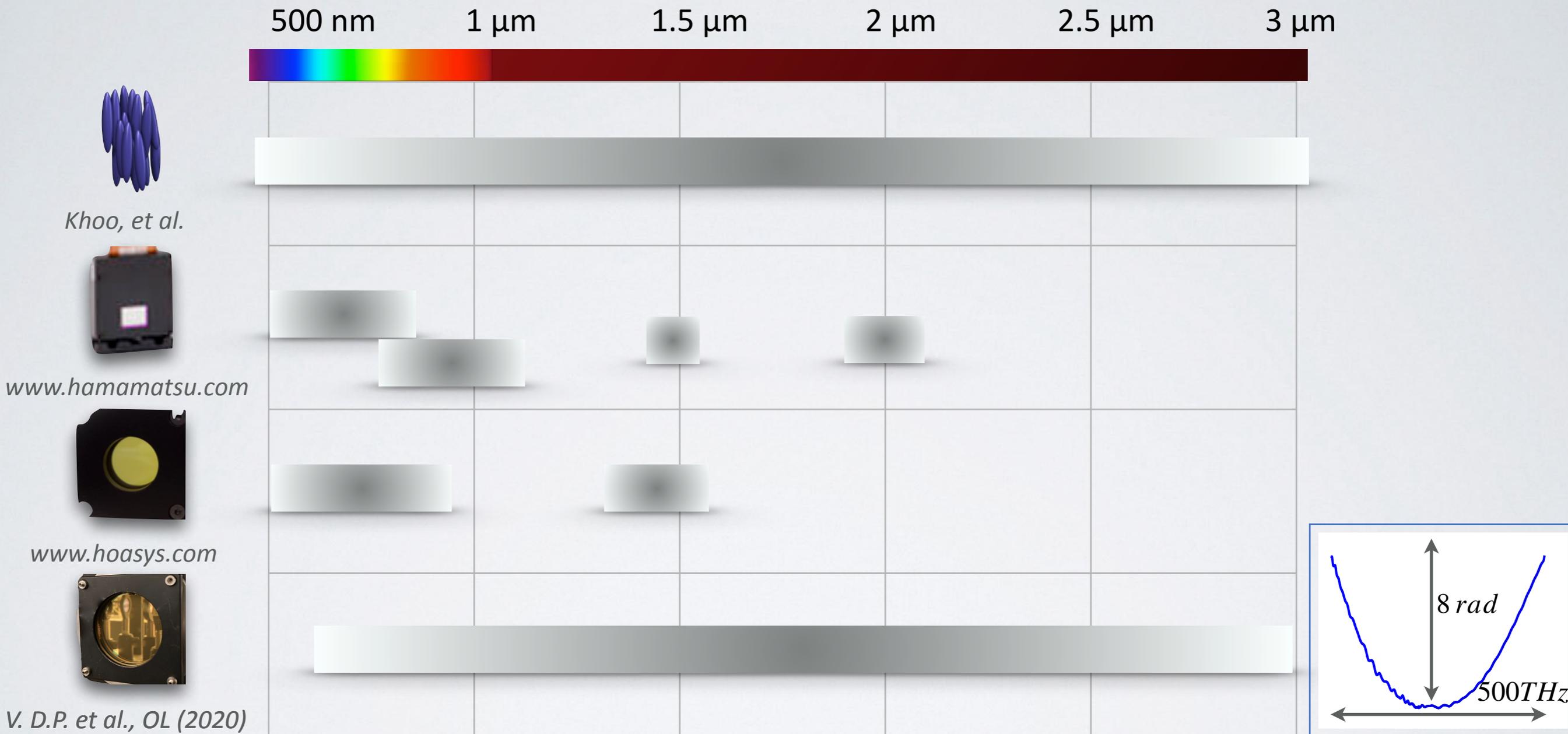
HAMAMATSU

PHOTON IS OUR BUSINESS

300 W en CW (new heat management !)



Acceptance spectrale



L'électrode est restrictive par rapport au cristal liquide en terme d'acceptance spectrale.

Critères de performance



	SLM (LCoS)	Valve optique	TOA-SLM
Fonction	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation
Transmission / Reflection	80 %	< 80 %	90 %
Modulation de phase	2π	$> 2\pi$	$\gg 2\pi$
Pupille	1-2 cm ²	1-2 cm ²	$> 5\text{ cm}^2$
Résolution spatiale	20 μm	100 μm	500 μm
Points de contrôle	10 ⁶ pts/cm ²	10 ⁴ pts/cm ²	400 pts/cm ²
Temps de réponse (on-off)	100 ms	100 ms	1 s
Temps de rafraichissement	< ms	< ms	100 ms
Adressage	Pixellisé	Continu	Continu
Acceptance spectrale	$\lambda < 1500\text{ nm}$ (électrode)	$\lambda < 1500\text{ nm}$ (électrode)	Visible, NIR, IR
LIDT (100 fs)	50 GW/cm ² (@800 nm, 1 kHz)	50 GW/cm ² (@800 nm, 1 kHz)	$> 100\text{ GW/cm}^2$ (@800 nm, 10 kHz)
Dispersion / B	Faible	Faible	Faible

Take home messages

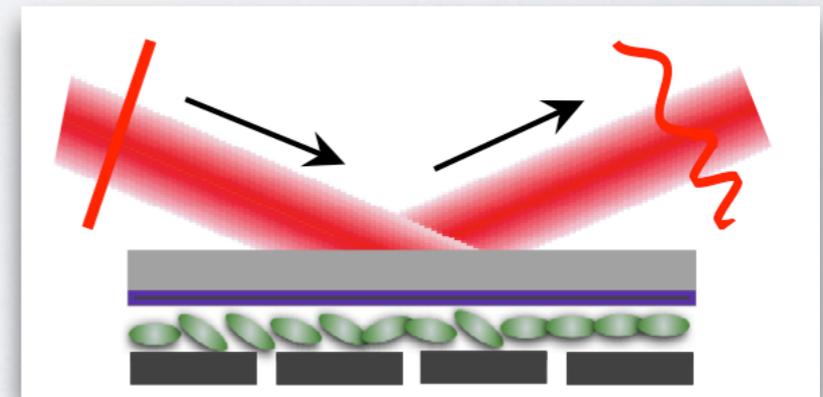
OK en régime femto!
(dans certaines conditions...)

Exemples @ 30 fs, 800 nm :

- LCoS 2cm² => E < 5 mJ
- TOA-SLM 5cm² => E < 15 mJ

Mise en forme spatiale de lasers

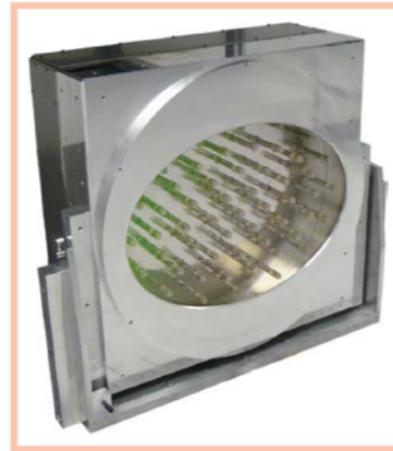
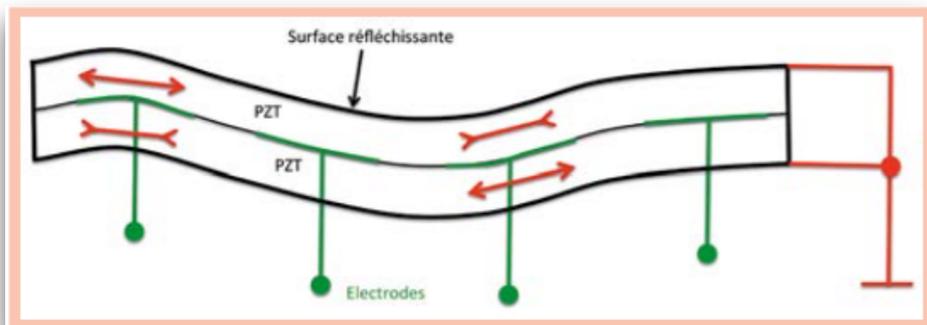
- ▶ Introduction
- ▶ Le SLM à cristaux liquides : définition et caractéristiques
- ▶ Le SLM dans le contexte femtoseconde
- ⇒ ▶ Autres technologies : les miroirs déformables
- ▶ Programmation arbitraire
- ▶ Quelques applications



Miroirs déformables

Déformation d'une surface réfléchissante => modulation de la phase seulement

Miroirs déformables piezo-électriques et à actionneurs mécaniques



P. Baudoz, Photoniques (2016)

- ✓ Large acceptance spectrale
- ✓ Grande ouverture
- ✓ Grande amplitude phase
- ❖ Peu d'actionneurs

Imagine Optic

Cilas
laser and beyond

THORLABS

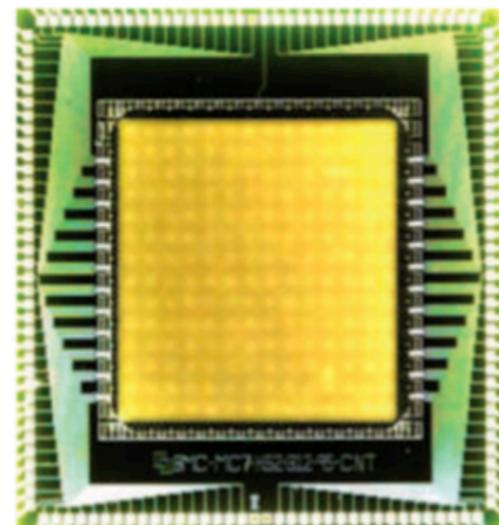
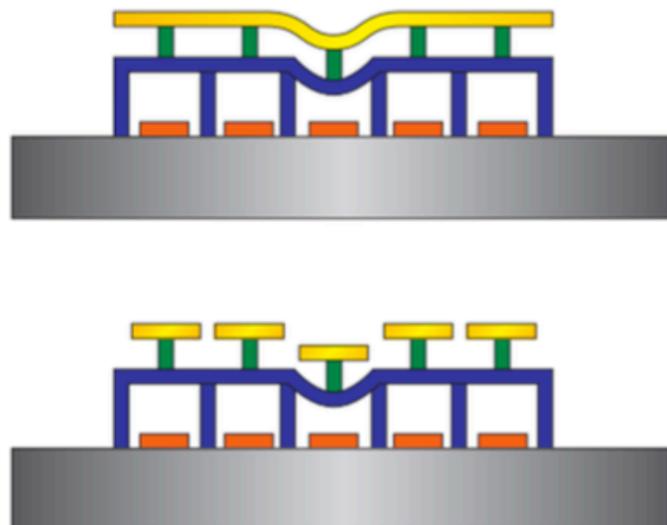
PHASICS
the phase control company

BOSTON MICROMACHINES CORPORATION
SHAPING LIGHT

ALPAO

ISP SYSTEM

MEMS (Microsystèmes électromécaniques)



Thorlabs

- ✓ Large acceptance spectrale
- ✓ Nombreux points de contrôle
- ❖ Faible pupille
- ❖ Faible amplitude de phase

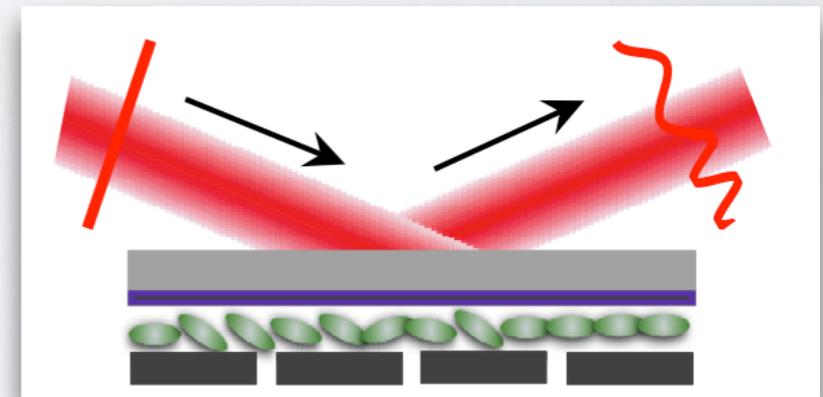
Critères de performance



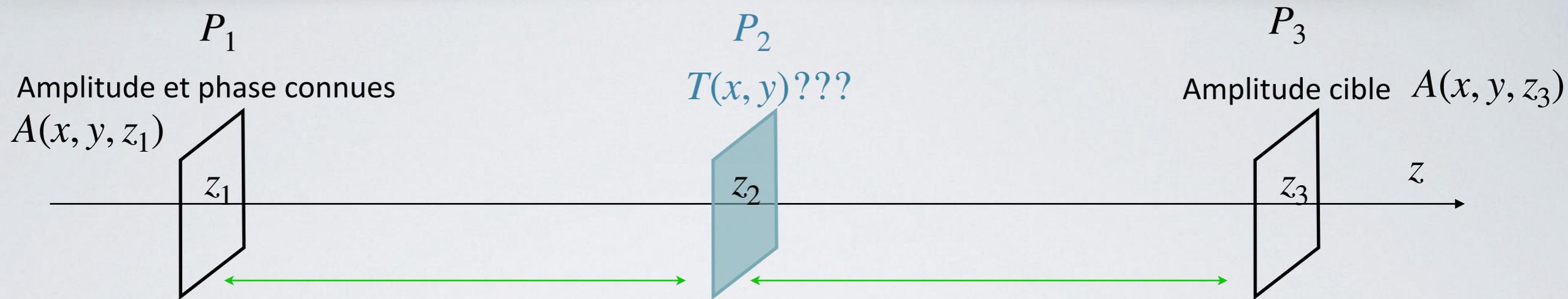
	SLM (LCoS)	Valve optique	TOA-SLM	MD	MEMS
Fonction	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase seulement	Phase seulement
Transmission / Reflection	80 %	< 80 %	90 %	> 95%	> 90%
Modulation de phase	2 π	> 2 π	>> 2 π	>> 2 π	2 π
Pupille	1-2 cm ²	1-2 cm ²	> 5 cm ²	> 100 cm ²	5 mm
Résolution spatiale	20 μ m	100 μ m	500 μ m	> mm	100 μ m
Points de contrôle	10 ⁶ pts/cm ²	10 ⁴ pts/cm ²	400 pts/cm ²	10 à 100 pts/cm ²	100 pts/cm ²
Temps de réponse (on-off)	100 ms	100 ms	1 s	ms	100 μ s
Temps de rafraichissement	< ms	< ms	100 ms		
Adressage	Pixellisé	Continu	Continu	Pixellisé	Continu
Acceptance spectrale	λ < 1500 nm (électrode)	λ < 1500 nm (électrode)	Visible, NIR, IR	Visible, NIR, IR	Visible, NIR
LIDT (100 fs)	50 GW/cm ² (@800 nm, 1 kHz)	50 GW/cm ² (@800 nm, 1 kHz)	> 100 GW/cm ² (@800 nm, 10 kHz)	10 000 GW/cm ²	
Dispersion / B	Faible	Faible	Faible	Nulle	Nulle

Mise en forme spatiale de lasers

- ▶ Introduction
- ▶ Le SLM à cristaux liquides : définition et caractéristiques
- ▶ Le SLM dans le contexte femtoseconde
- ▶ Autres technologies : les miroirs déformables
- ⇒ ▶ Programmation arbitraire
- ▶ Quelques applications

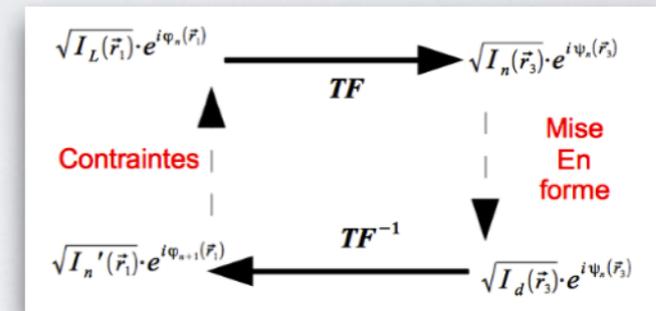


Programmation arbitraire



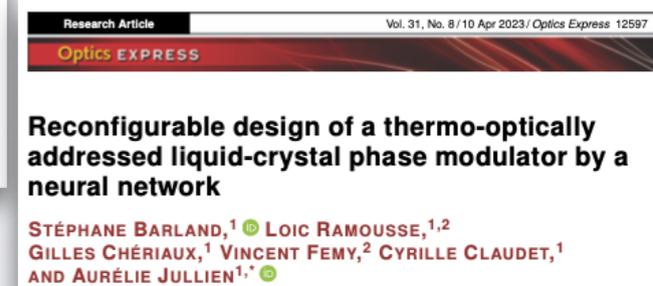
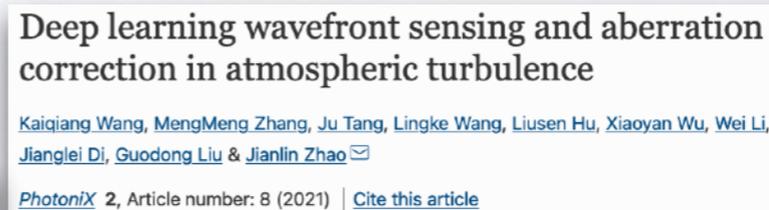
Calcul des masques de phase

- ▶ Expression analytique dans un des espaces
- ▶ Algorithme itératif d'optimisation (Gerchberg et Saxton) *Thèse S. Landon (2011)*



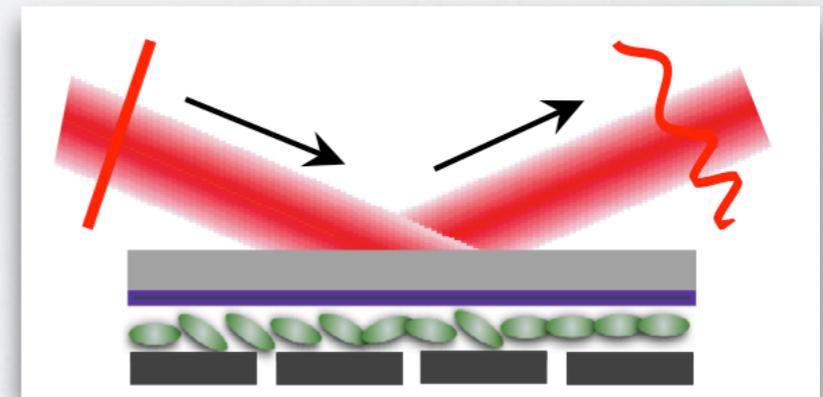
Contrôle prédictif et apprentissage machine

- ▶ Réseaux de neurones (deep learning) => résoudre les problèmes complexes et inverses
- ▶ Contrôle prédictif et apprentissage machine



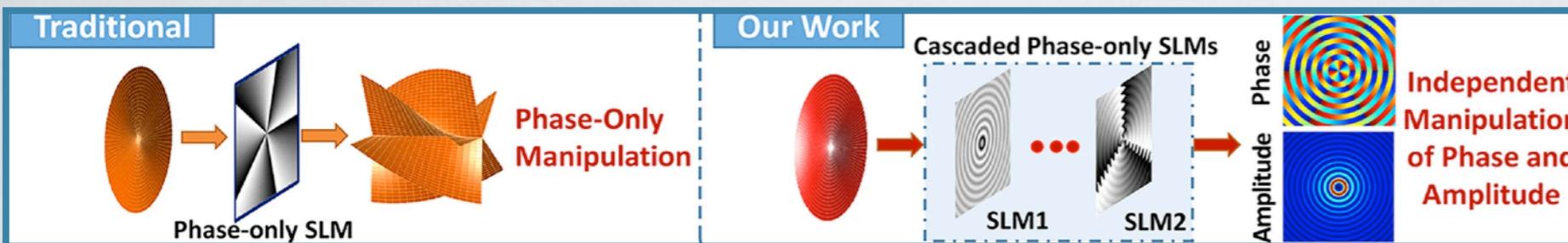
Mise en forme spatiale de lasers

- ▶ Introduction
- ▶ Le SLM à cristaux liquides : définition et caractéristiques
- ▶ Le SLM dans le contexte femtoseconde
- ▶ Autres technologies : les miroirs déformables
- ▶ Programmation arbitraire
- ⇒ ▶ Quelques applications



Moduler la phase et l'amplitude

SLMs en cascade



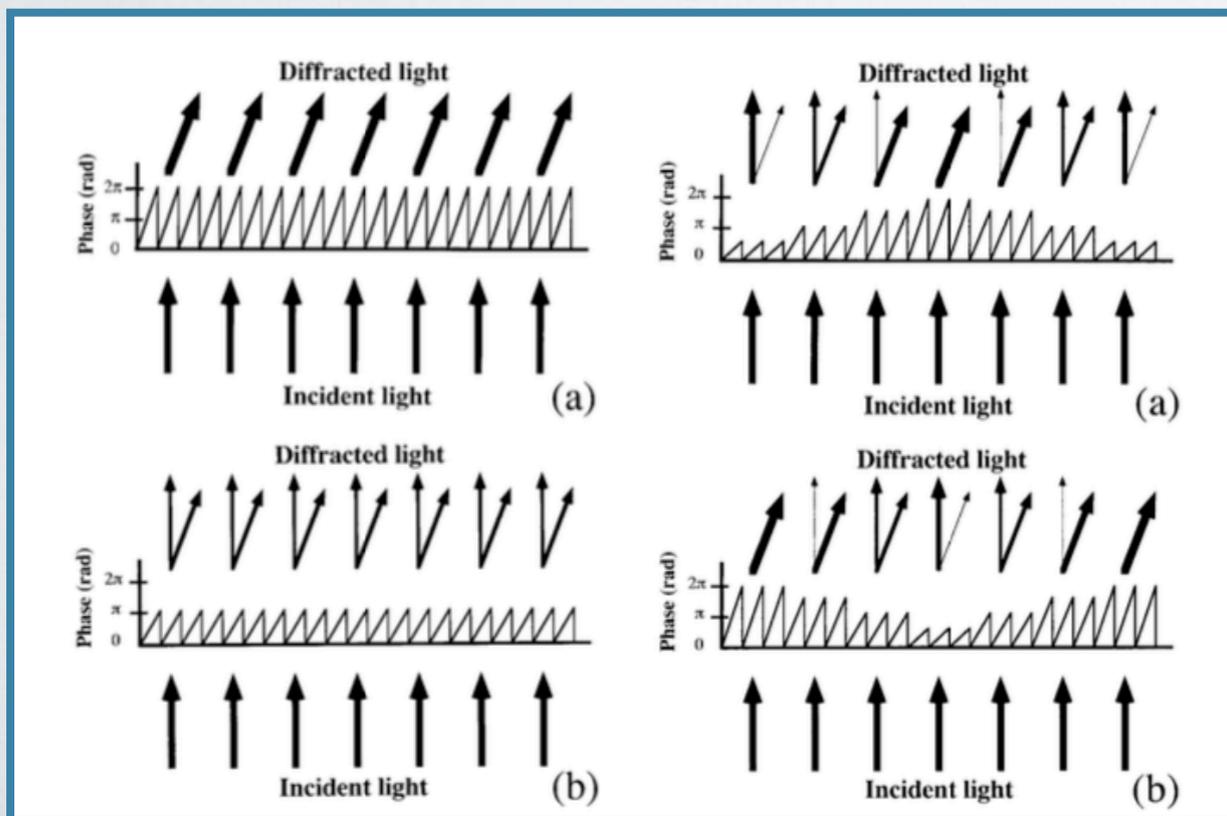
SCIENTIFIC REPORTS

OPEN Arbitrary manipulation of spatial amplitude and phase using phase-only spatial light modulators

SUBJECT AREAS: APPLIED OPTICS, OPTICAL TECHNIQUES

Long Zhu & Jian Wang

Modulation de l'efficacité de diffraction



Encoding amplitude information onto phase-only filters

Jeffrey A. Davis, Don M. Cottrell, Juan Campos, María J. Yzuel, and Ignacio Moreno

5004 APPLIED OPTICS / Vol. 38, No. 23 / 10 August 1999

3546 OPTICS LETTERS / Vol. 38, No. 18 / September 15, 2013

Exact solution to simultaneous intensity and phase encryption with a single phase-only hologram

Eliot Bolduc,¹ Nicolas Bent,¹ Enrico Santamato,² Ebrahim Karimi,^{1,*} and Robert W. Boyd^{1,3}

¹Department of Physics, University of Ottawa, 150 Louis Pasteur, Ottawa, Ontario K1N 6N5, Canada

²Dipartimento di Scienze Fisiche, Università di Napoli "Federico II", Complesso di Monte S. Angelo, 80126 Napoli, Italy

³Institute of Optics, University of Rochester, Rochester, New York 14627, USA

*Corresponding author: ekarimi@uottawa.ca

Arbitrary shaping of on-axis amplitude of femtosecond Bessel beams with a single phase-only spatial light modulator

Ismail Ouadghiri-Idrissi, Remo Giust, Luc Froehly, Maxime Jacquot, Luca Furfaro, John M. Dudley, and Francois Courvoisier*

FEMTO-ST Institute, UMR 6174 CNRS University of Bourgogne Franche-Comte, 15 B, rue des Montboucons, F-25030 Besançon, France

*francois.courvoisier@femto-st.fr

#261099
© 2016 OSA

Received 14 Mar 2016; revised 11 May 2016; accepted 12 May 2016; published 18 May 2016
30 May 2016 | Vol. 24, No. 11 | DOI:10.1364/OE.24.011495 | OPTICS EXPRESS 11495

Parallélisation de procédés laser

Journal of
Laser Applications

REVIEW

pubs.aip.org/lia/jla

Application of ultrafast laser beam shaping in micro-optical elements

Cite as: J. Laser Appl. 35, 031202 (2023); doi: 10.2351/7.0001033
Submitted: 5 April 2023 · Accepted: 27 July 2023 ·
Published Online: 16 August 2023



Zhihao Qu,¹ Shufeng Sun,^{1,a)} Jin Wang,¹ Mingming Jiang,¹ Fengyun Zhang,¹ Xi Wang,¹
Jing Shao,¹ Cuanglei Liang,¹ and Pingping Wang^{1,2}

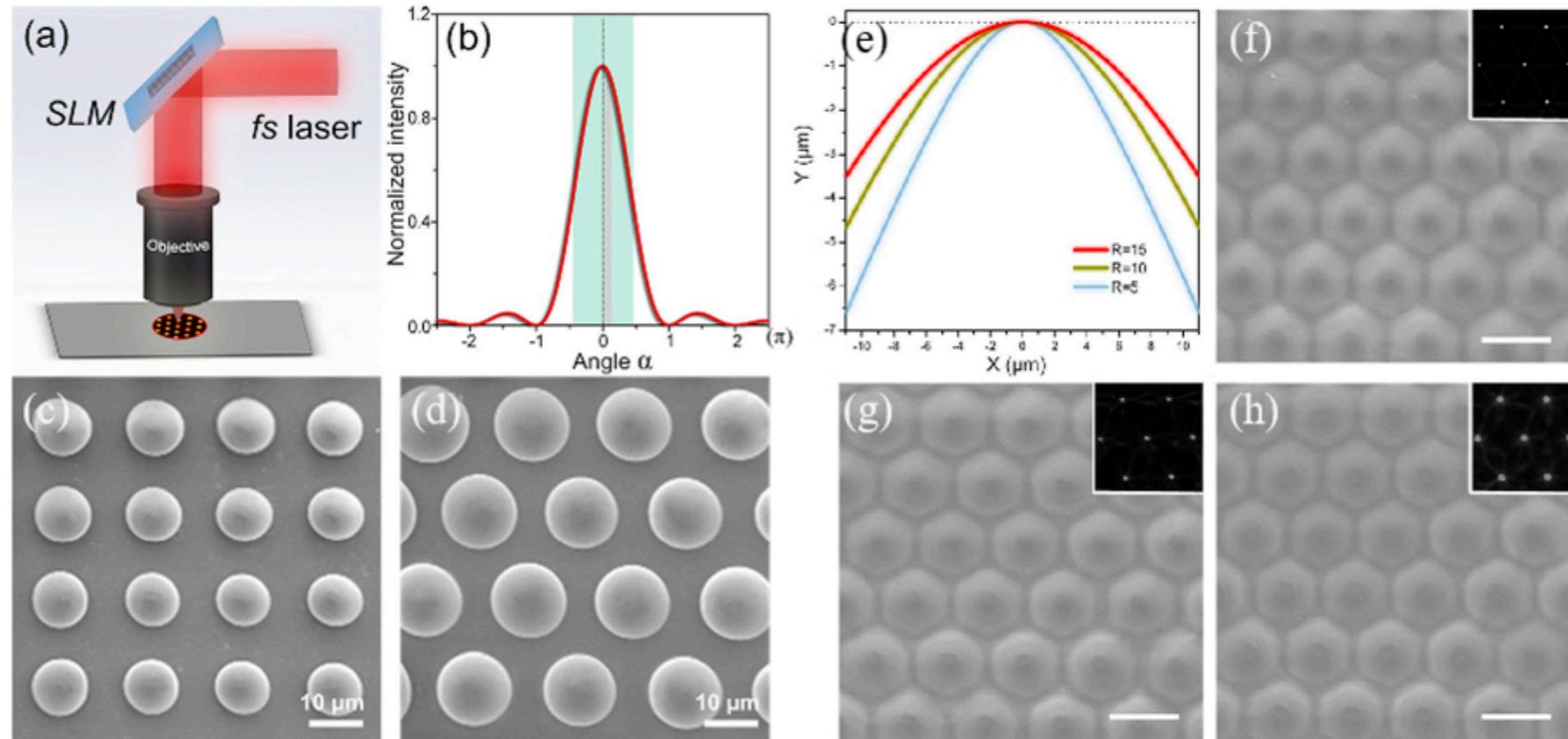
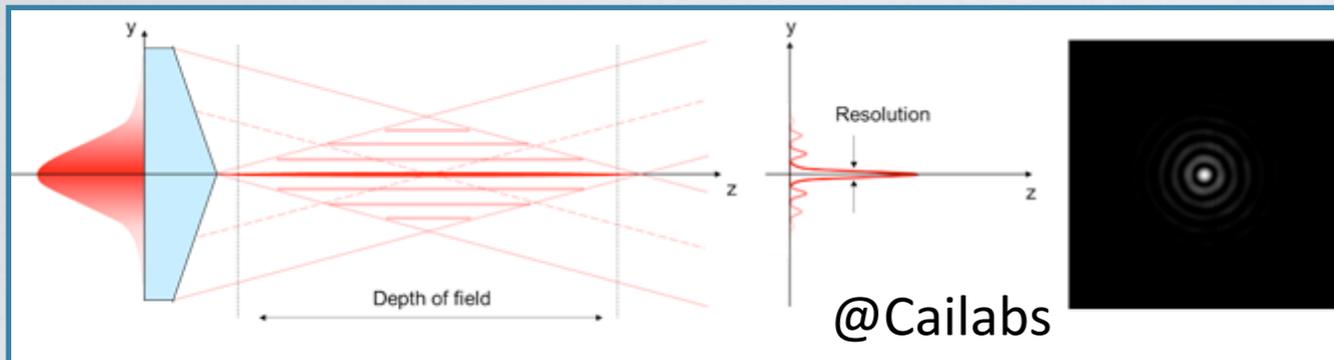


FIG. 17. Holographic femtosecond laser parallel fabrication of aspheric microlens arrays (Ref. 136). (a) Schematic diagram of the experimental setup for holographic femtosecond laser direct writing; (b) the typical diffraction intensity distribution of a one-dimensional rectangular grating with the incident Gaussian beam; (c) and (d) fabricated microlens arrays with quadrangular and hexagonal arrangement. The radii of the lenslets are $5\mu\text{m}$ and $7.5\mu\text{m}$, respectively; (e) aspheric lens geometry with different vertex radius; (f)–(h) the corresponding closely packed hexagonal AMLAs fabricated by holographic direct writing. The insets show their focal spots images under illumination by a halogen lamp. Scale bar: $20\mu\text{m}$. Reproduced with permission from Hu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 141112 (2013). Copyright 2013 AIP Publishing LLC.

Fabrication de structures chirales

Faisceau de Bessel à polarisation hélicoïdale pour la fabrication de nano-structures



RESEARCH ARTICLE | JUNE 02 2023

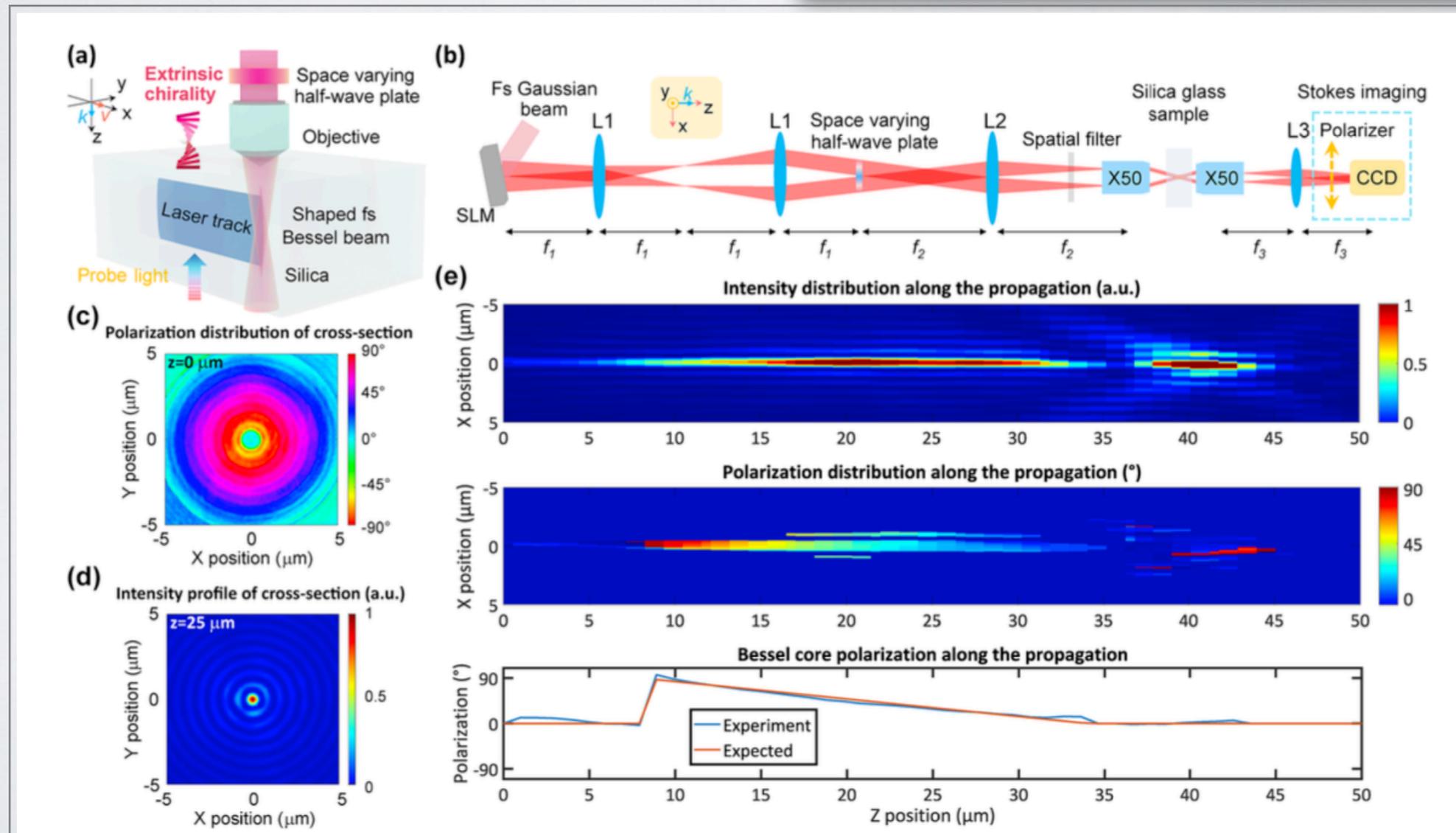
3D structured Bessel beam polarization and its application to imprint chiral optical properties in silica

Special Collection: [Ultrafast Laser Fabrication Enabled Photonics and Devices](#)

Jiafeng Lu ; Mostafa Hassan ; François Courvoisier ; Enrique Garcia-Caurel ; François Brisset; Razvigor Ossikovski ; Xianglong Zeng ; Bertrand Poumellec; Matthieu Lancry

Check for updates

APL Photonics 8, 060801 (2023)
<https://doi.org/10.1063/5.0140843>



Fabrication de structures chirales

Salter and Booth *Light: Science & Applications* (2019)8:110
<https://doi.org/10.1038/s41377-019-0215-1>

Official journal of the CIOMP 2047-7538
www.nature.com/lisa

REVIEW ARTICLE

Open Access

Adaptive optics in laser processing

Patrick S. Salter¹ and Martin J. Booth¹

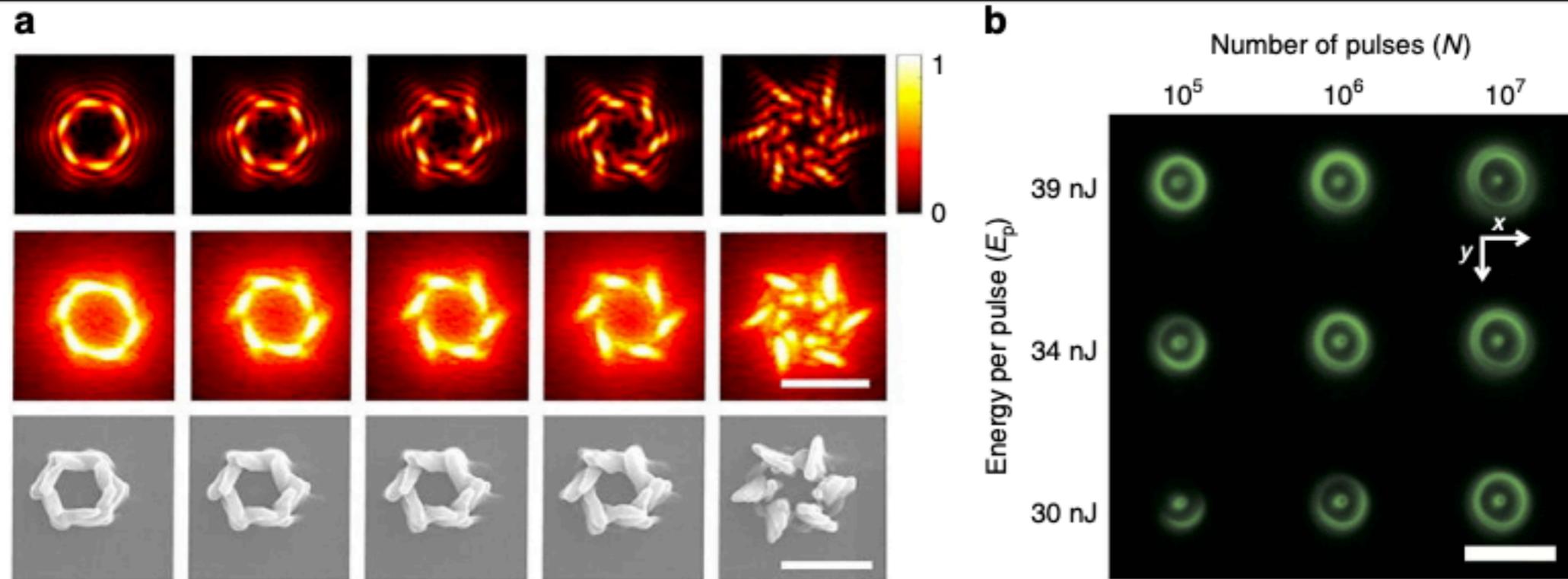
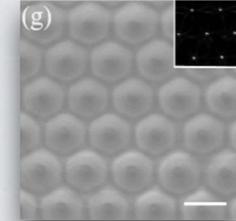
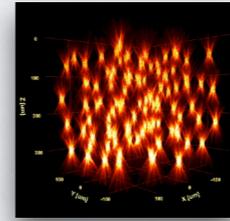
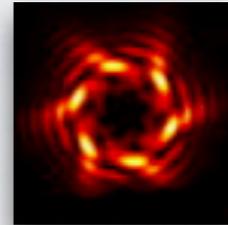
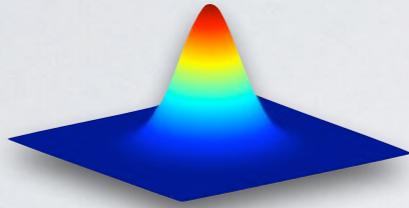


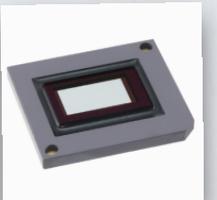
Fig. 6 Laser fabrication using adaptive optics to generate the OAM to shape the fabrication focus. **a** Two-photon polymerisation using the OAM to generate a chiral surface⁸⁵. Scale bar: 5 μm . **b** STED-inspired fabrication of nanoscale structures inside a photo-responsive glass⁹⁵. Scale bar: 4 μm . Images reproduced from **a** ref. ⁸⁵ with permission from AIP and **b** ref. ⁹⁵ with permission from OSA.

Conclusions

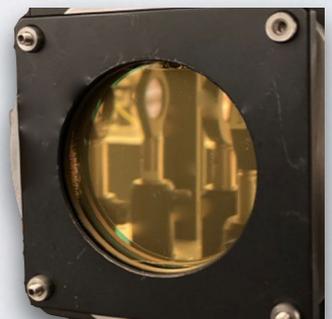
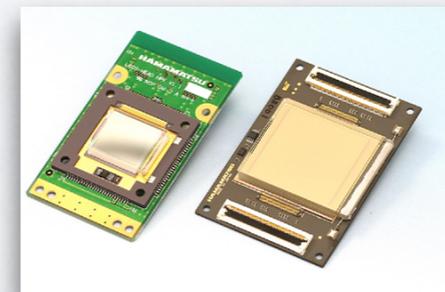
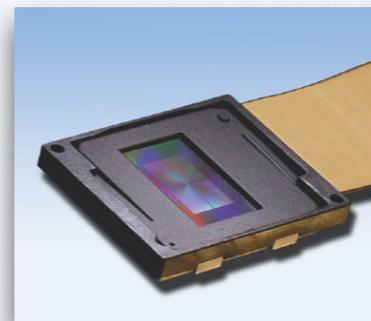
- ▶ Façonnage spatial de lasers => nombreuses applications



- ▶ Grandes variétés de dispositifs



- ▶ SLMs => dispositif programmable et polyvalent pour la manipulation spatiale (et temporelle !) de lasers femtosecondes



- ▶ Nombreux développements technologiques récents