

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

Aurélie Jullien

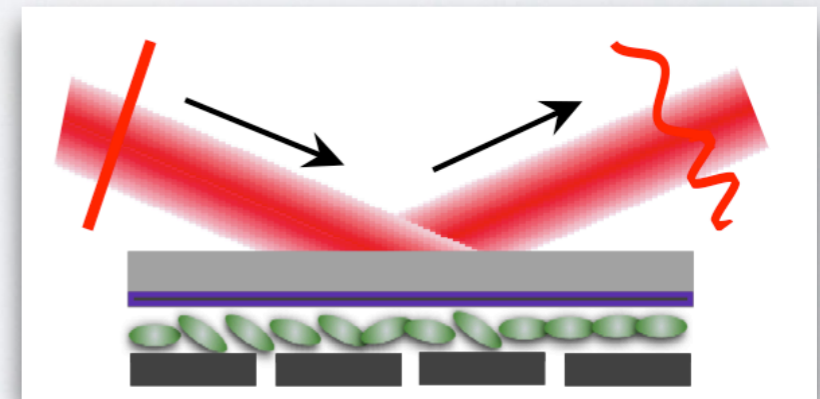
Institut de Physique de Nice, Université Côte d'Azur, CNRS, France

[Aurelie.Jullien@inphyni.cnrs.fr](mailto:Aurelie.Jullien@inphyni.cnrs.fr)

# Mise en forme spatiale de lasers

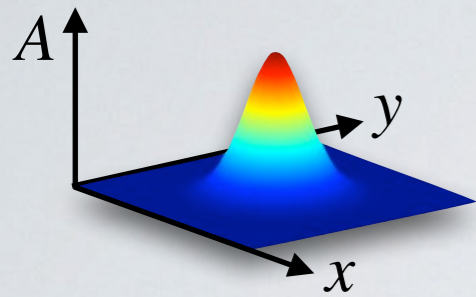
---

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

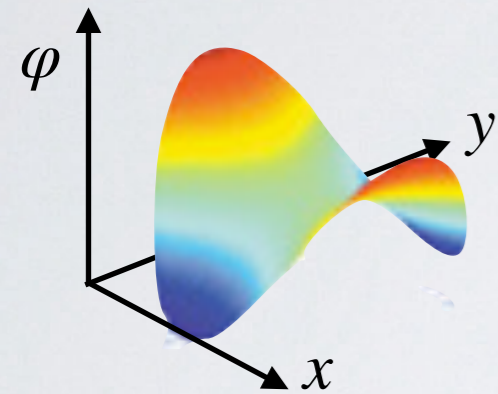




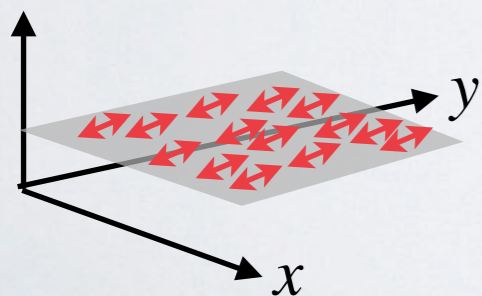
# Amplitude complexe du champ électrique d'une onde lumineuse



Amplitude



Phase (front d'onde)

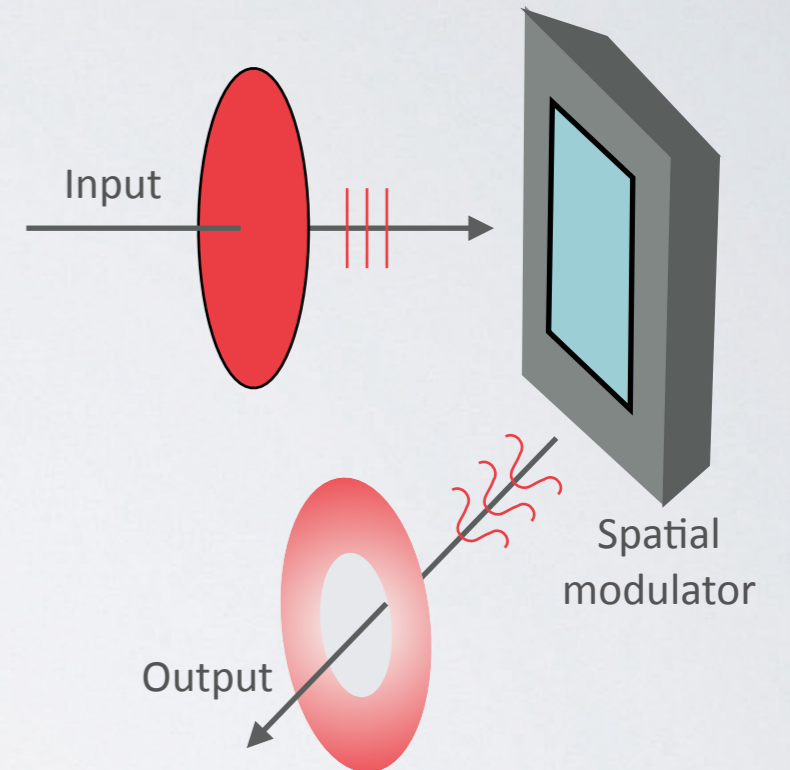


Polarisation

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**

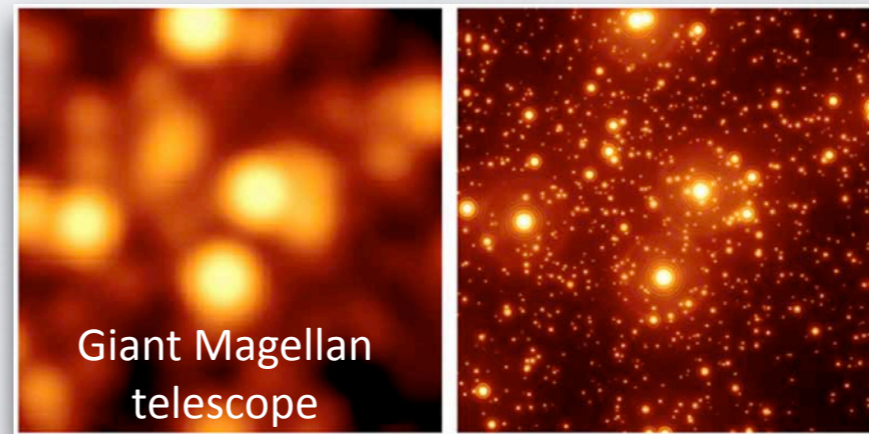


=> Dispositifs pour un contrôle actif de la phase spatiale

# Pourquoi ?

=> Compenser les turbulences atmosphériques

## Astronomie



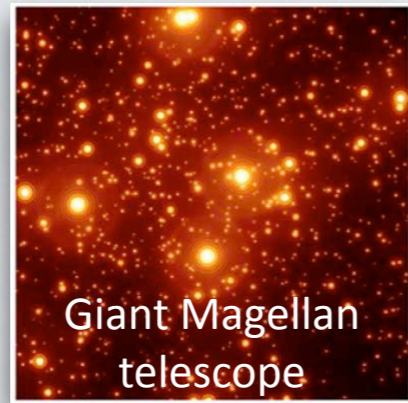
**Télécommunications  
en espace libre**





# Pourquoi ?

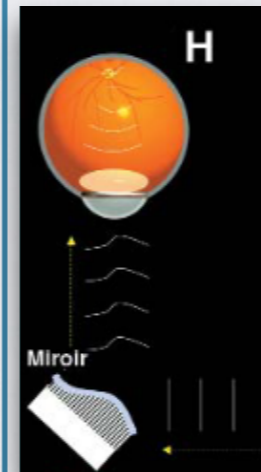
=> Compenser les turbulences atmosphériques



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

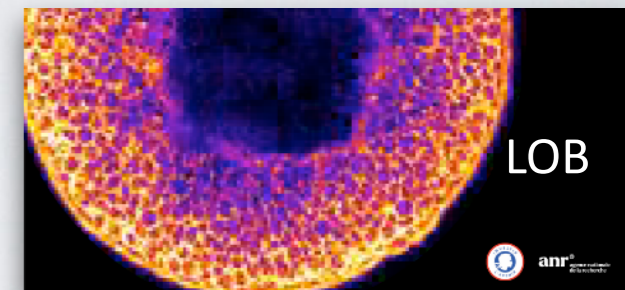
## Biophotonique

Ophthalmologie



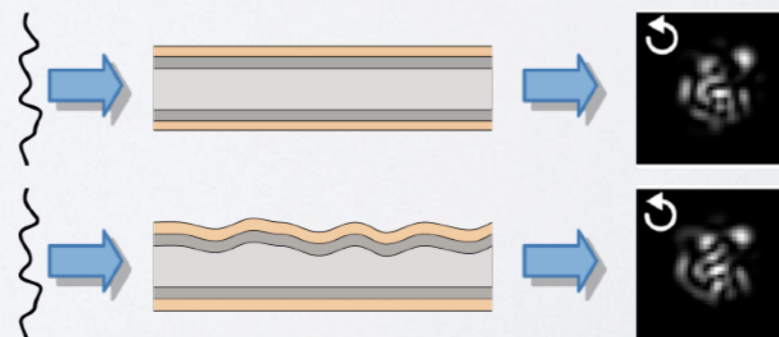
Hôpital Bichat

Microscopie super-résolue



Opto-génétique des circuits

Ondes et images en milieux complexes

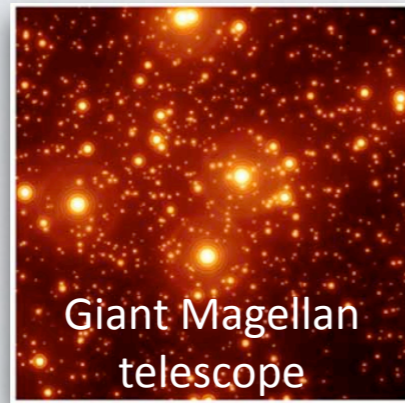


Institut Langevin

Popoff et Gigan, Photoniques (2021)

# Pourquoi ?

=> Compenser les turbulences atmosphériques

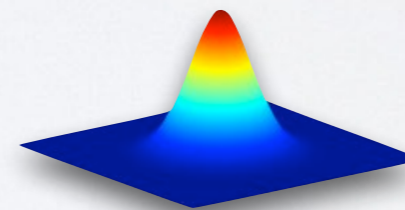


=> S'adapter aux déformations de front d'onde  
introduites par les milieux diffusants et complexes

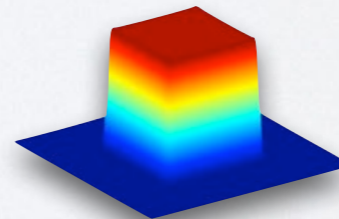


=> Compenser les aberrations des chaînes laser

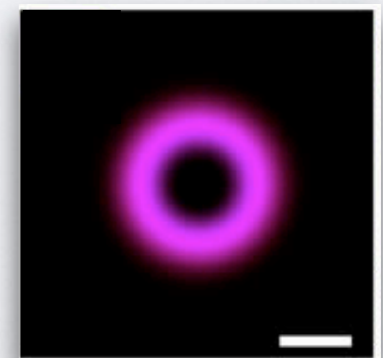
## Lasers intenses



Optimisation de la PSF

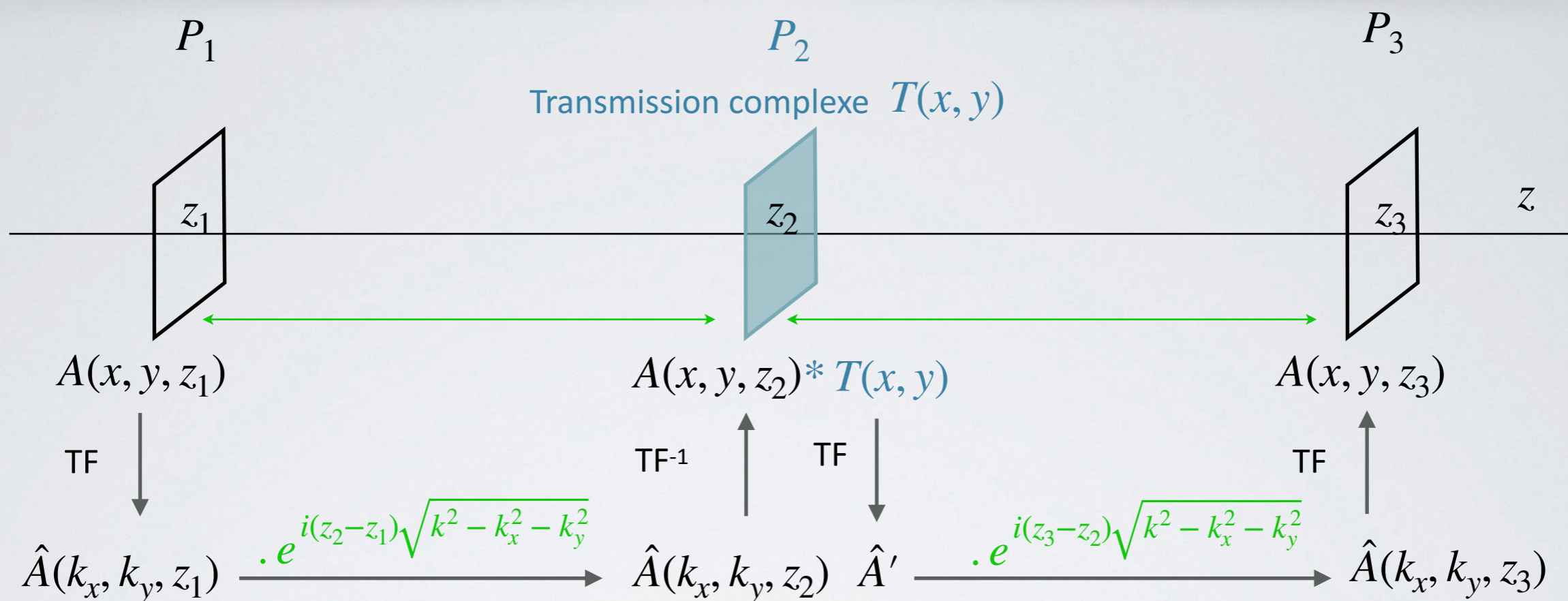


Génération de faisceaux  
non triviaux





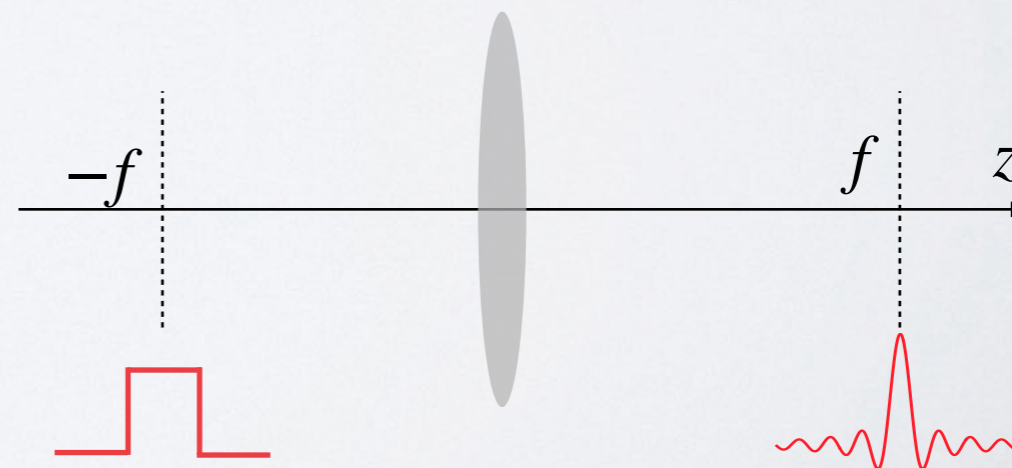
# Modulation de la phase spatiale



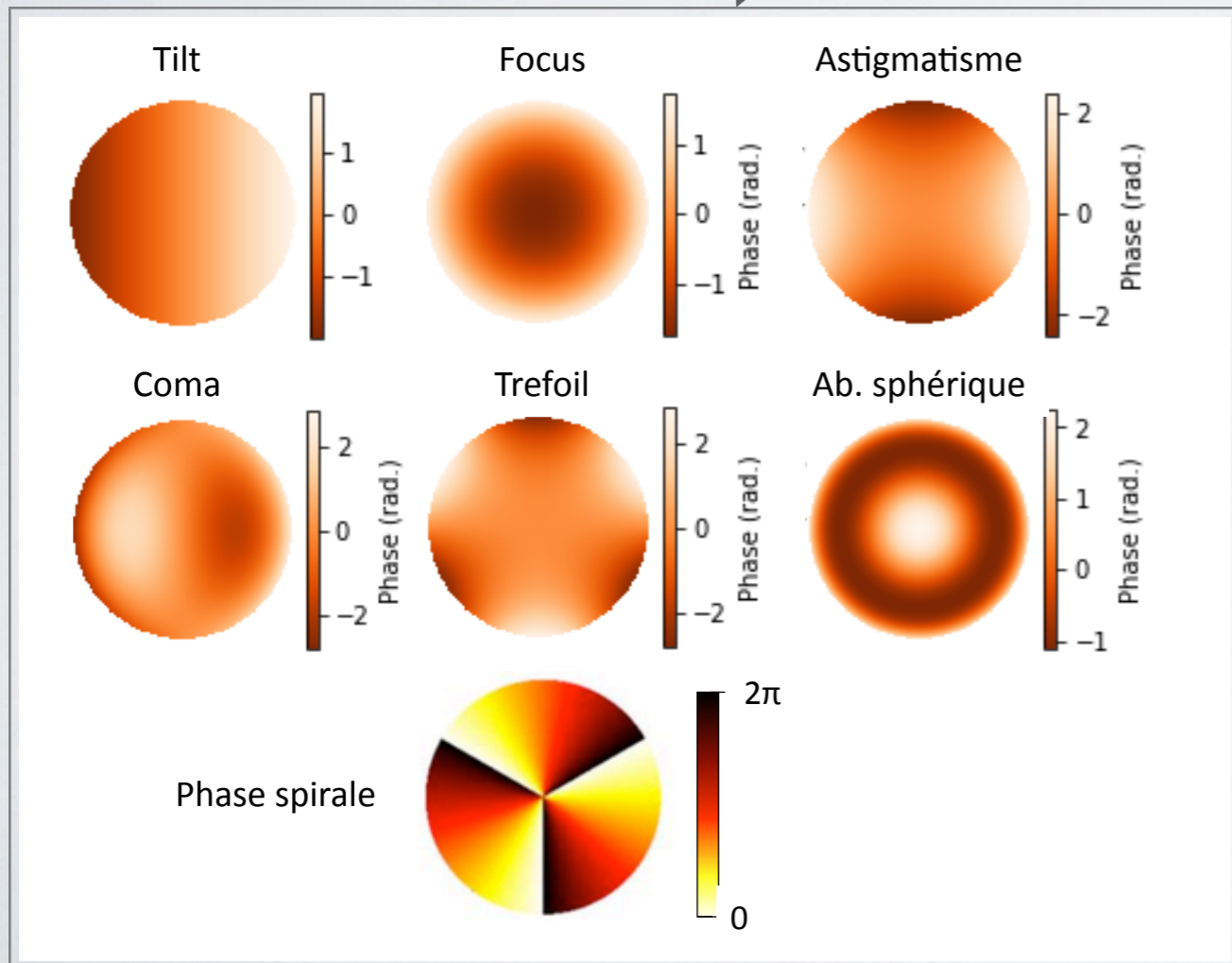
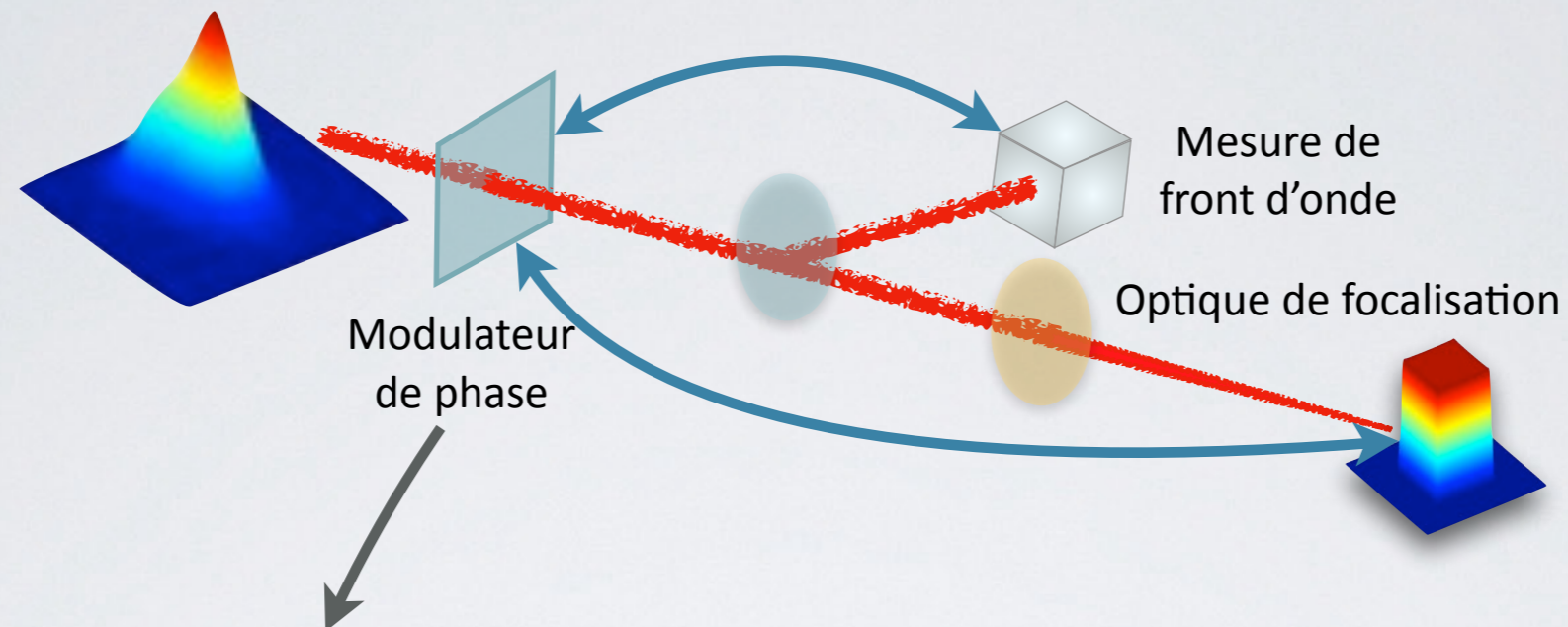
Born and Wolf, 1980

=> 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

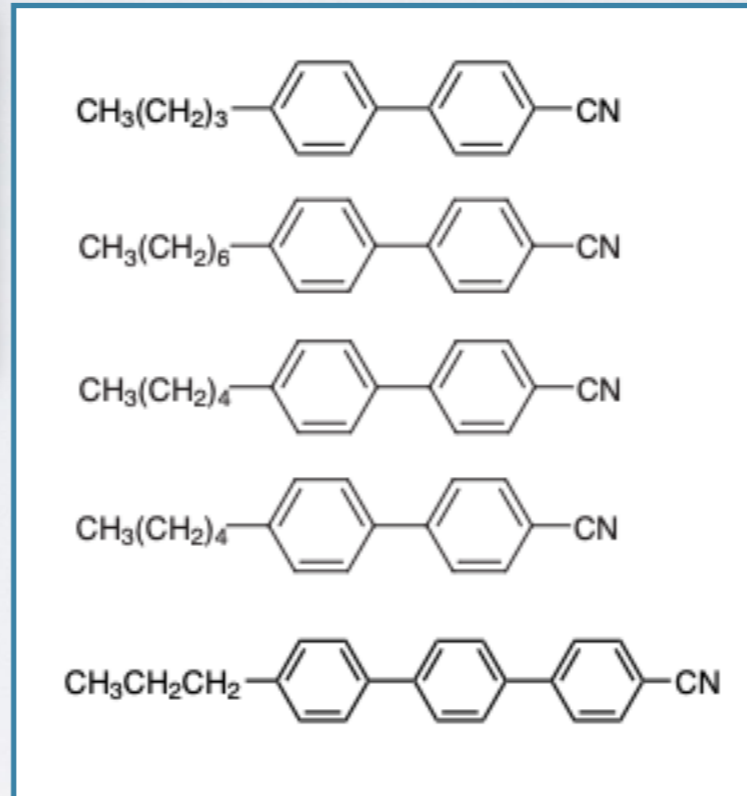
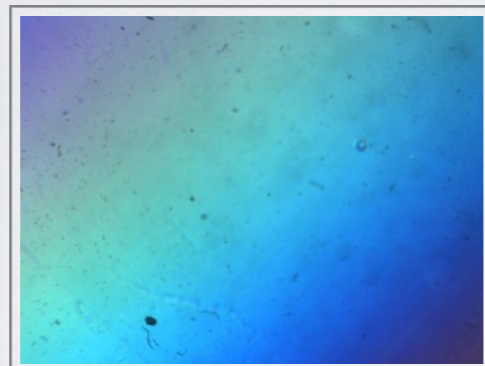
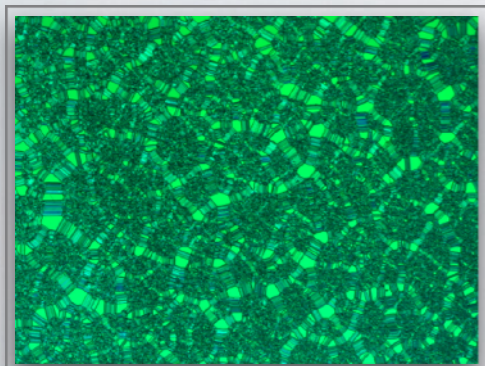
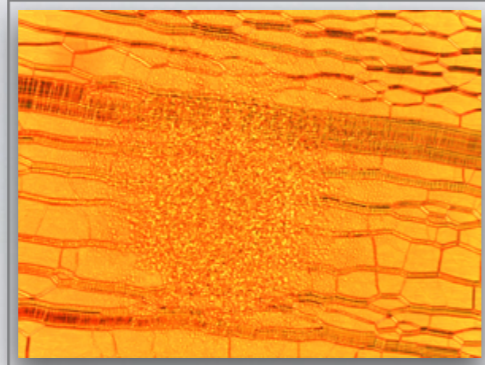
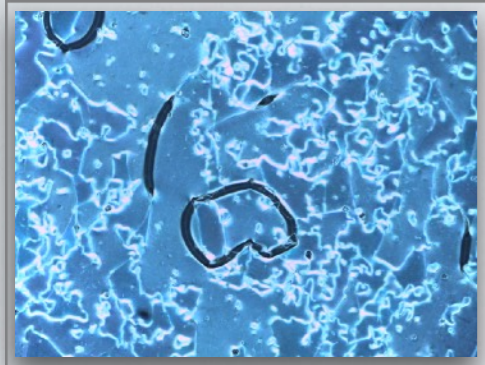
$$\varphi(\lambda, x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} n(\lambda, x, y) L$$

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



# Cristaux liquides nématiques

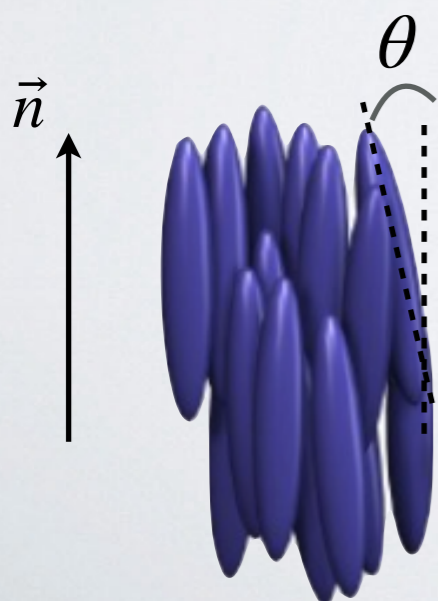
## Cristaux liquides



### 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 :

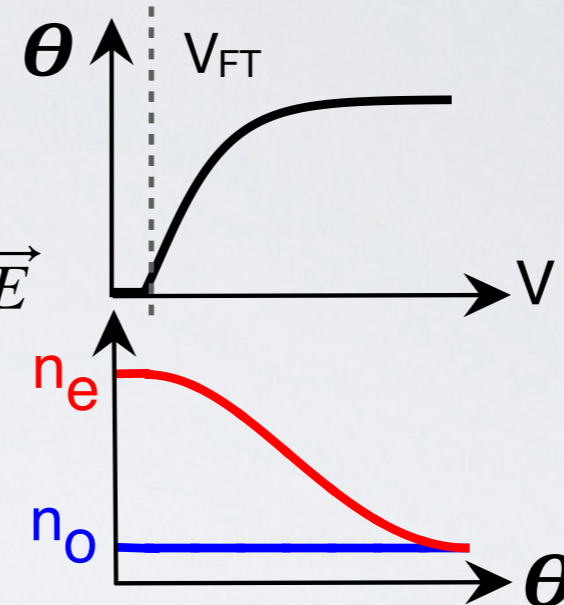
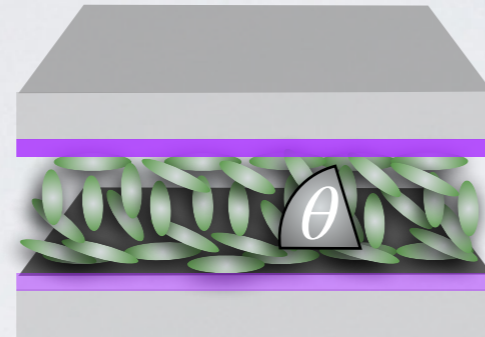
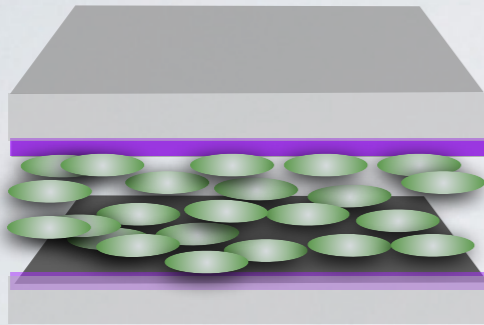
- ▶ Transparence (250 nm - 3 μm)
- ▶ Biréfringence élevée ( $\Delta n = 0.2$  for E7 @800nm, 25°)
- ▶ Biréfringence constante (250 nm - 3 μm)
- ▶ Biréfringence ajustable



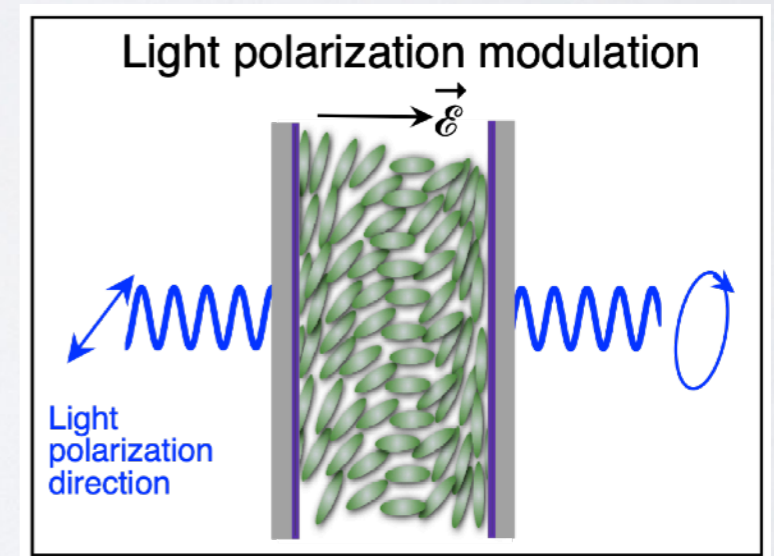
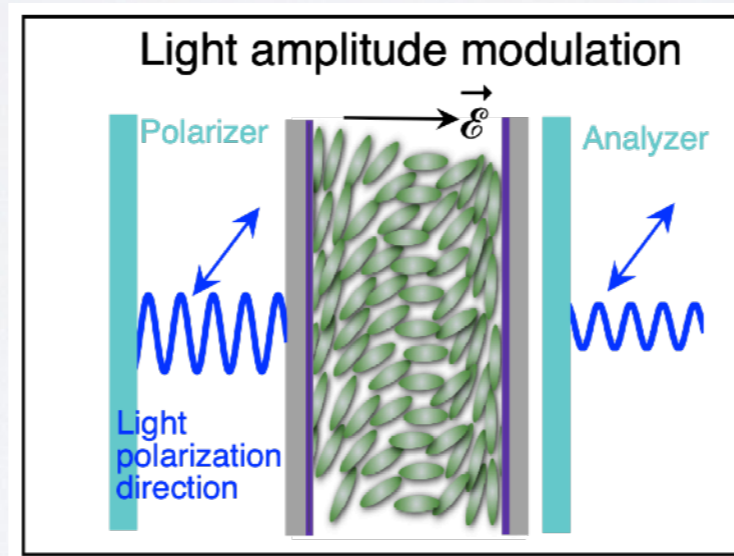
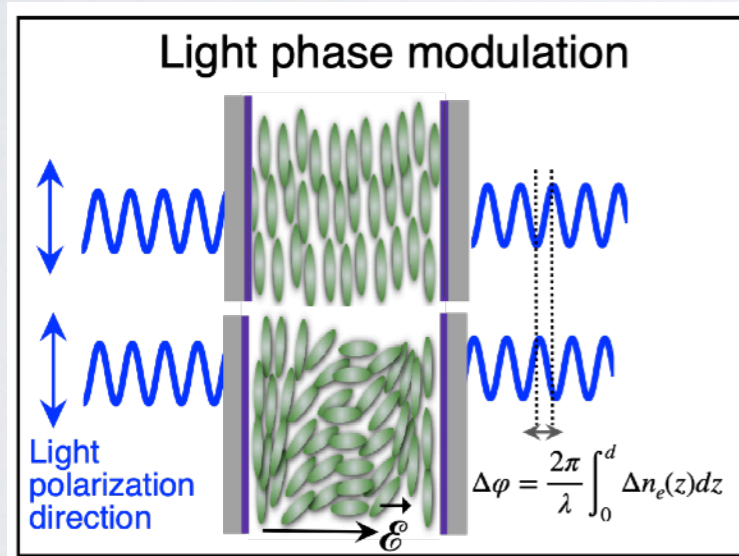
# Cristaux liquides nématiques

## Cellule de cristal liquide

Substrat  
Electrode  
Ancrage  
Ancrage  
Electrode  
Substrat



## Modulation de la lumière



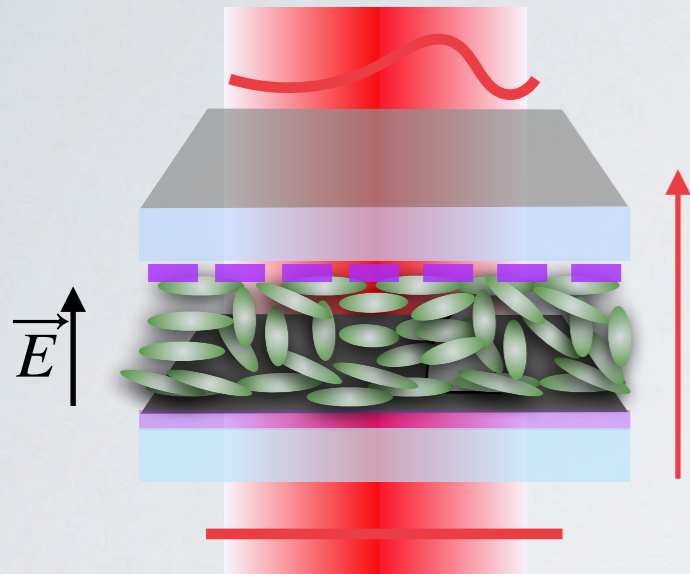
A.J., Spatial Light Modulator, Photoniques 62 (2020)

=> 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.

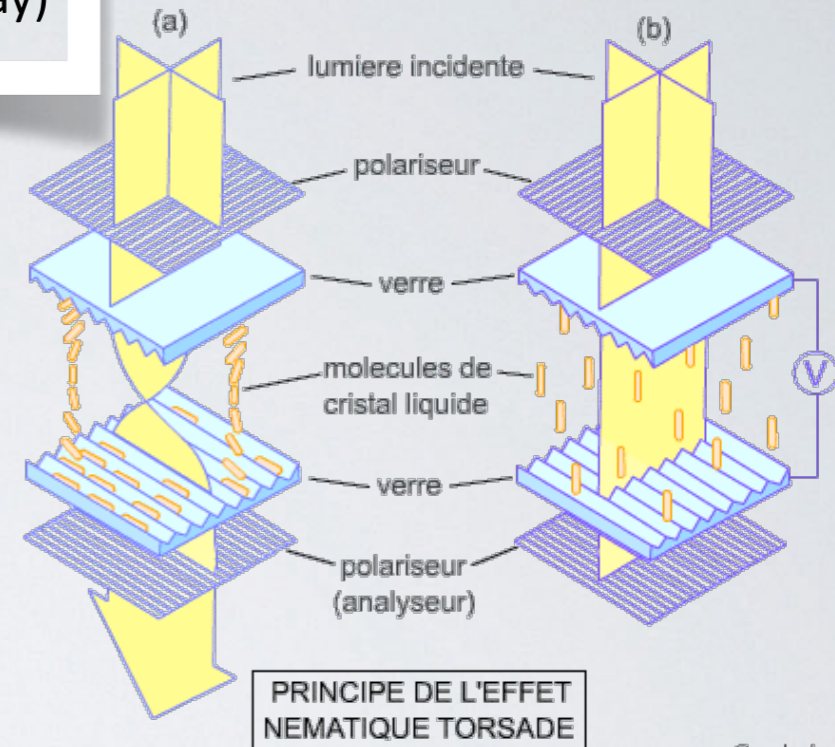
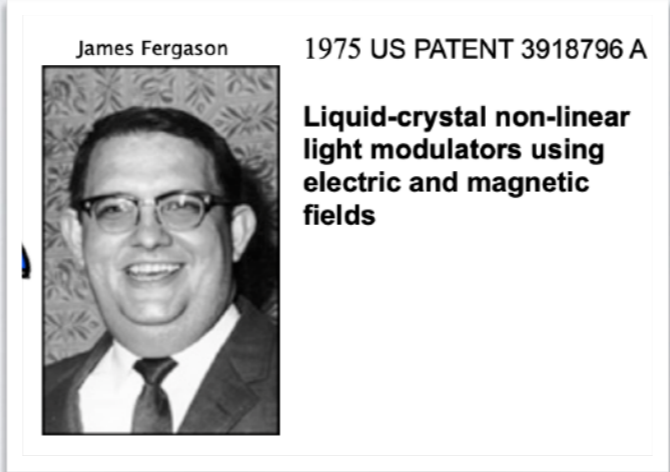


# Modulateur spatial de lumière (SLM)

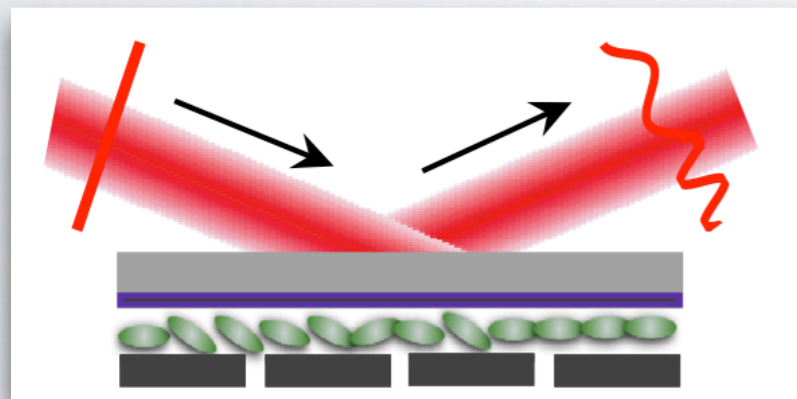
## SLM en transmission



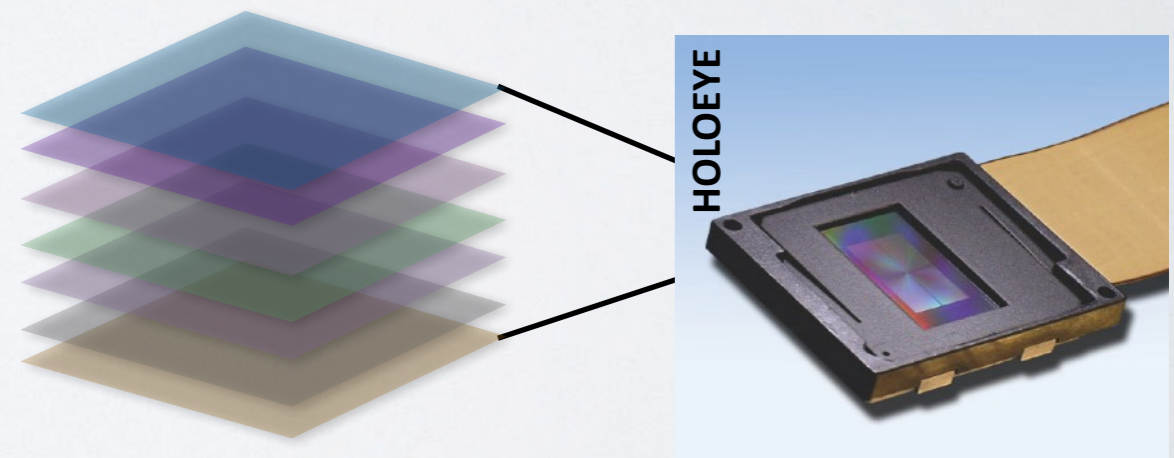
Un SLM particulier : le LCD (Liquid Crystal Display)



## 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

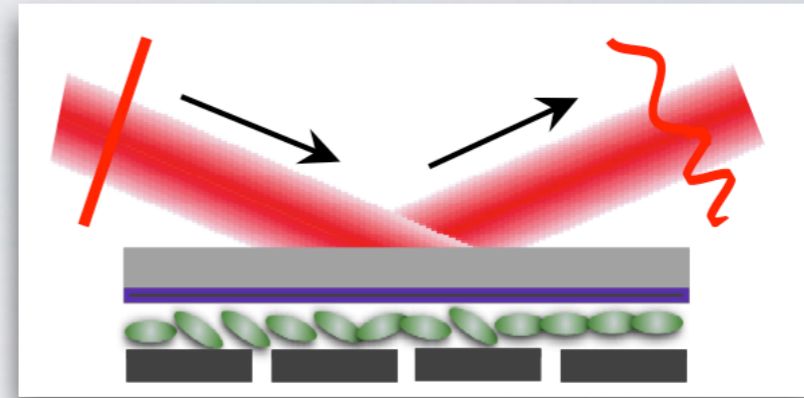
???

Adressage

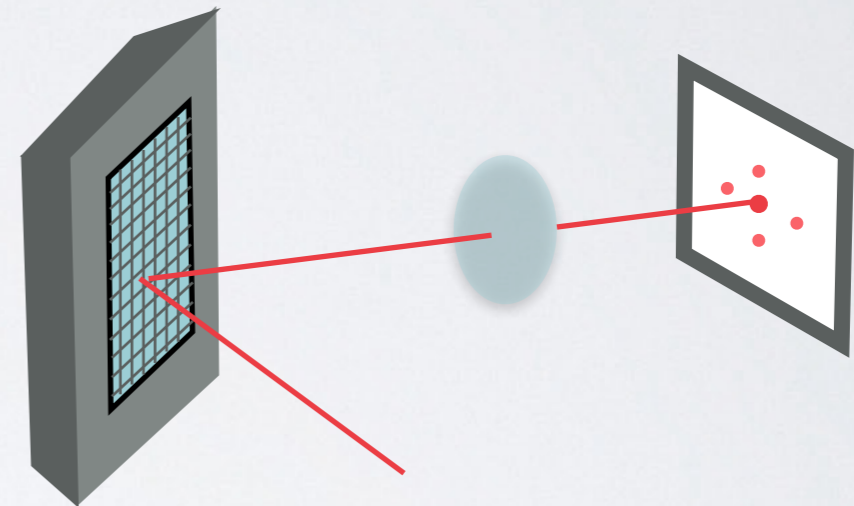
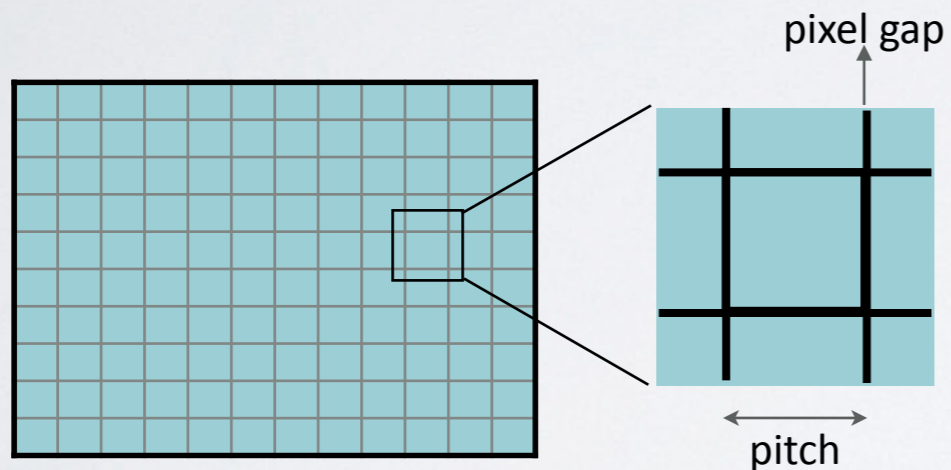
Pixellisé

# Efficacité (transmission, réflexion)

Pertes de Fresnel aux (nombreuses) interfaces



Pertes par diffraction



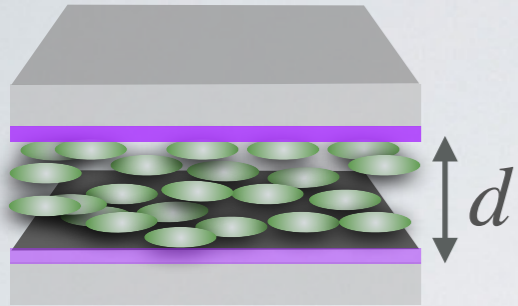
Facteur de remplissage  $\approx 90\%$   $\Rightarrow$  Pertes par diffraction  $\approx 20\%$

$\Rightarrow$  Réflectivité 75% - 80% en moyenne



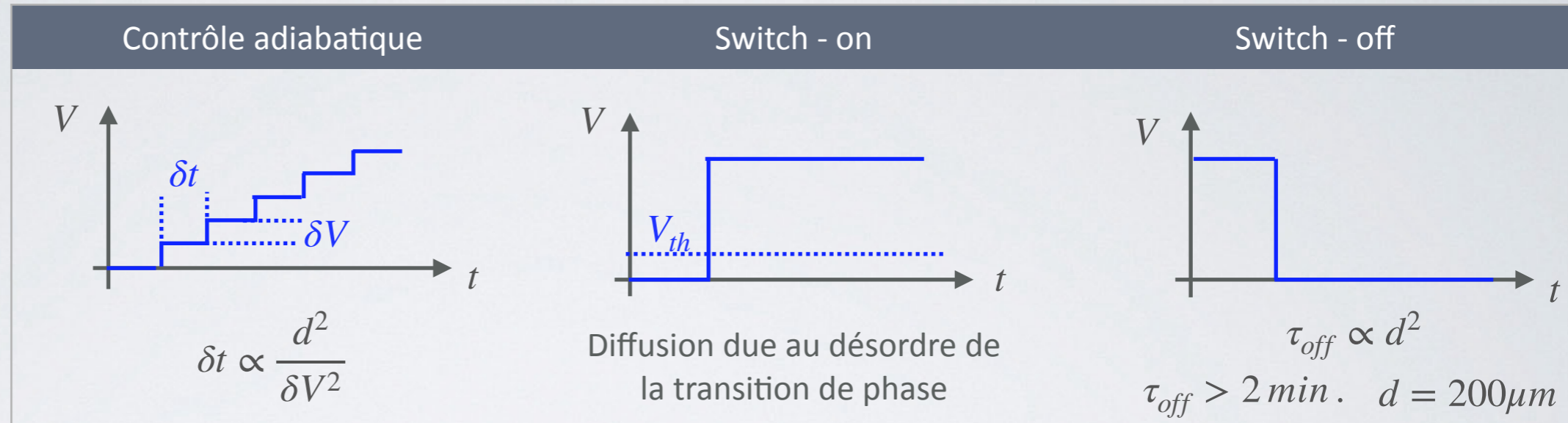
# Dynamique de modulation de phase

Epaisseur de la couche de cristal liquide



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

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

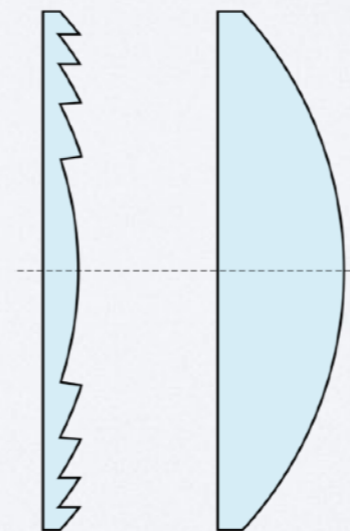


Epaisseur de cristal liquide limitée à  $\sim < 20 \mu\text{m}$



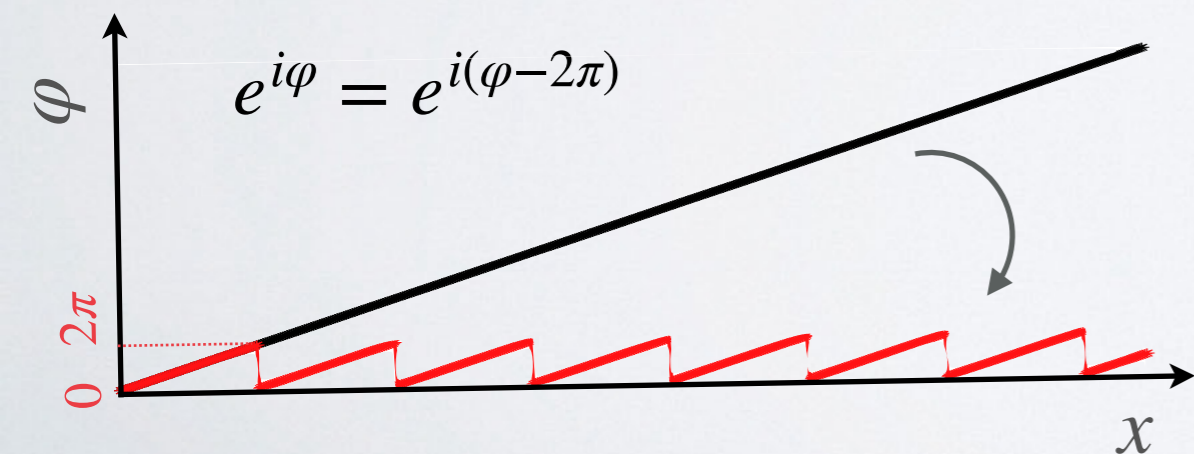
Modulation de phase limitée à  $2\pi$

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	$2\pi$
Pupille	1-2 cm <sup>2</sup>
Résolution spatiale	20 $\mu\text{m}$
Points de contrôle	10 <sup>6</sup> pts/cm <sup>2</sup>
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

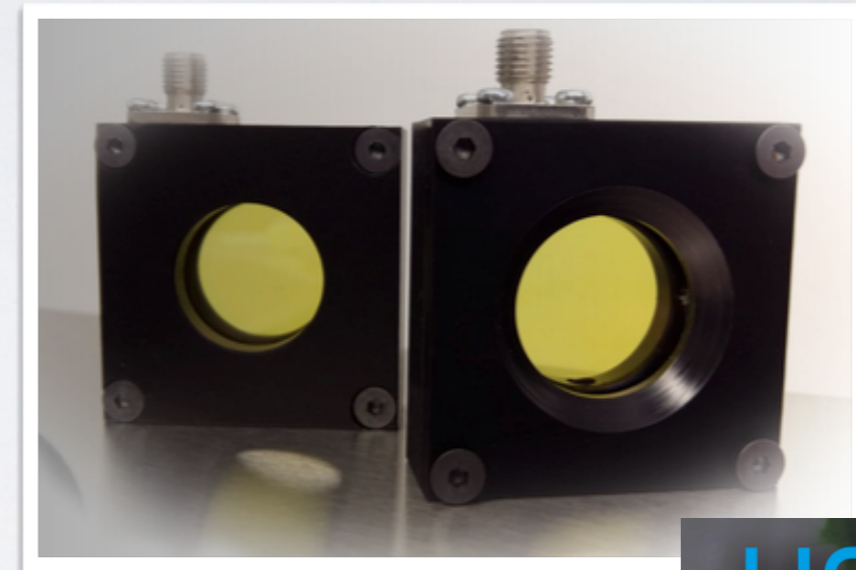
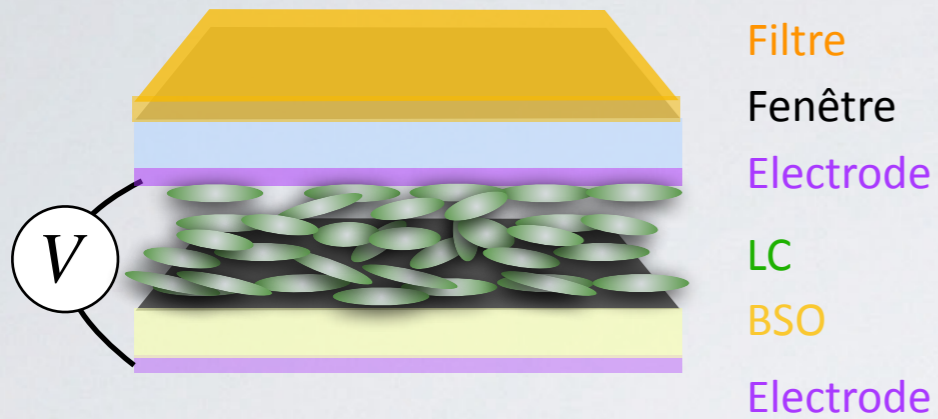
100 Hz - 10 Hz

Segments inactifs entre les pixels



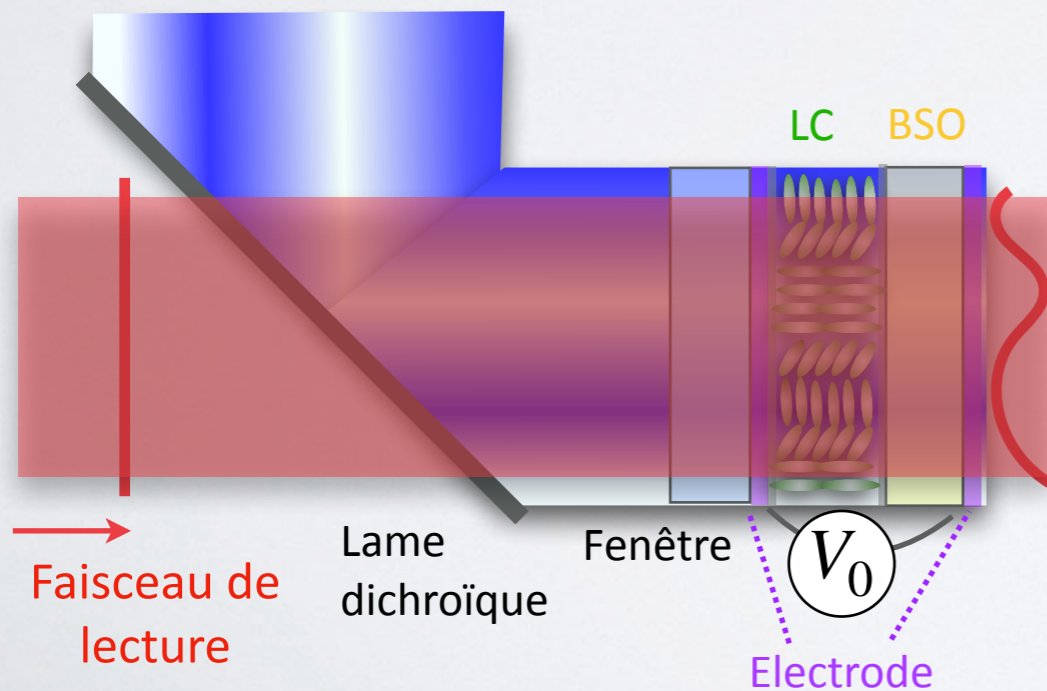
# Valves optiques

Brevet Thales (Thomson) 1982



HOASYS

Faisceau d'écriture (450 nm)



- ✓ Adressage optique continu
- ✓ Compatible épaisseur de LC ~ 50  $\mu\text{m}$
- ❖ BSO...

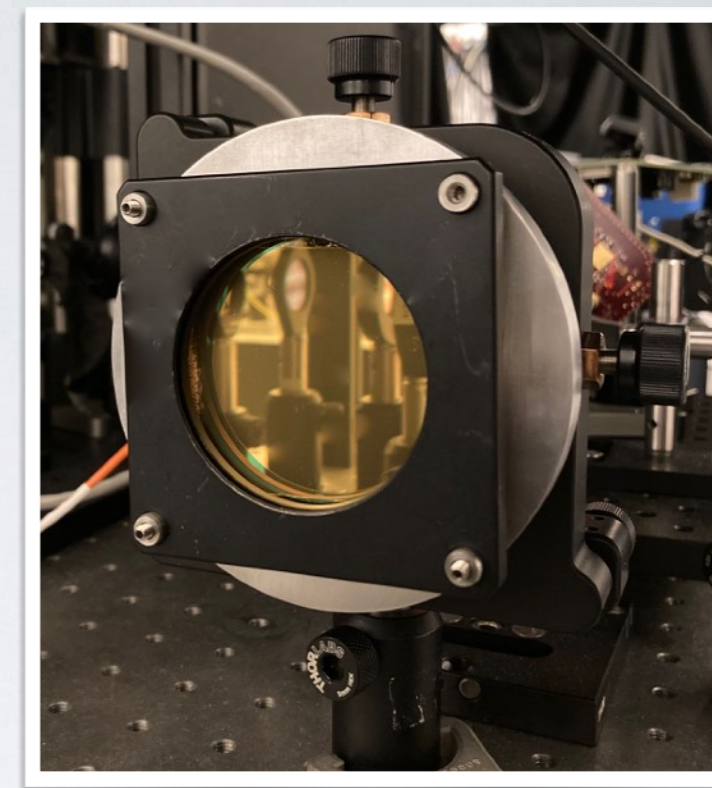
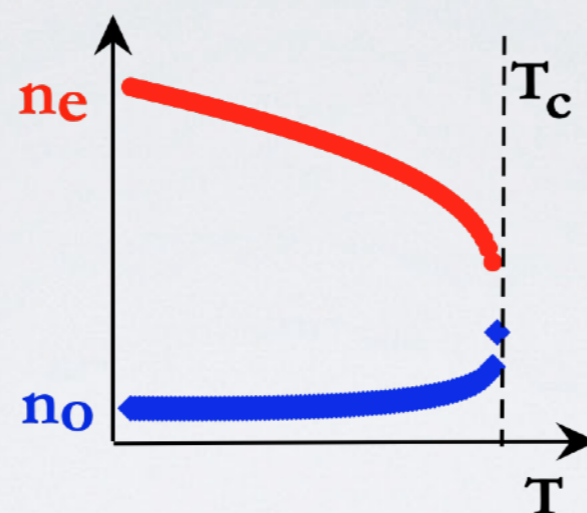
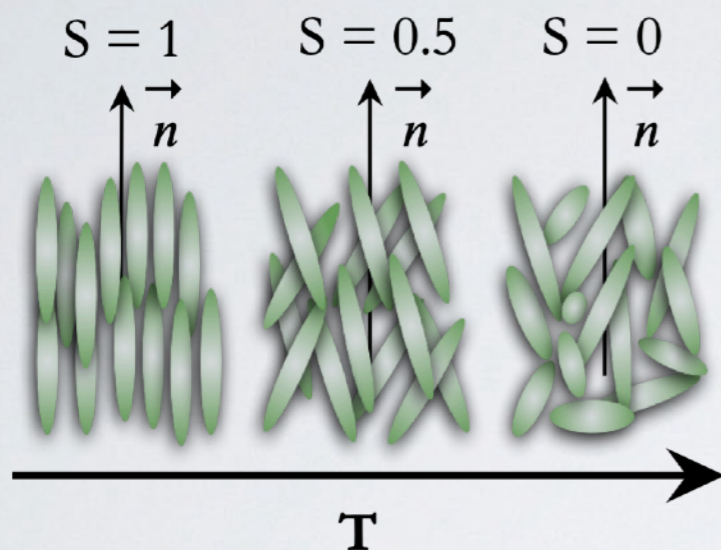
Thèse N. Sanner (2005)

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

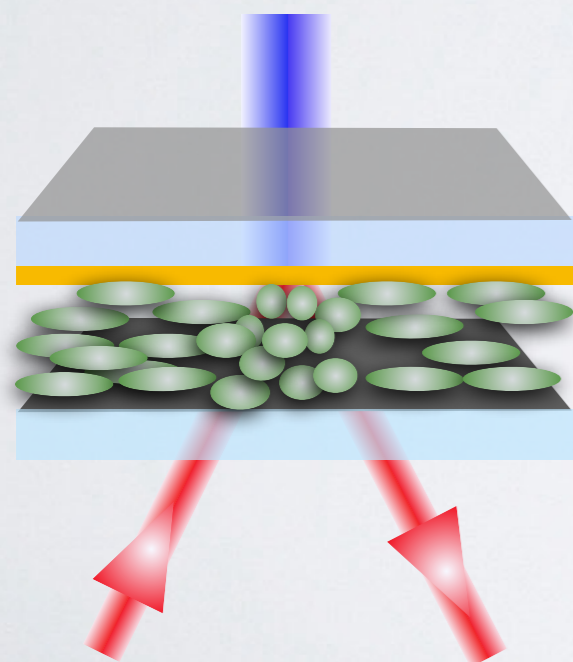


# Valves thermo-optiques (TOA-SLM)

Biréfringence contrôlée par la température



Faisceau d'écriture



Substrat

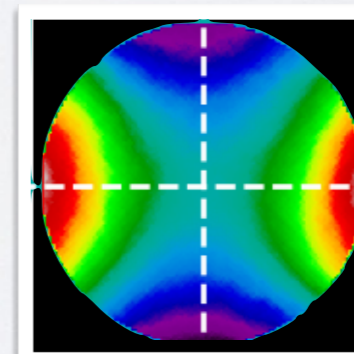
Miroir Or

LC

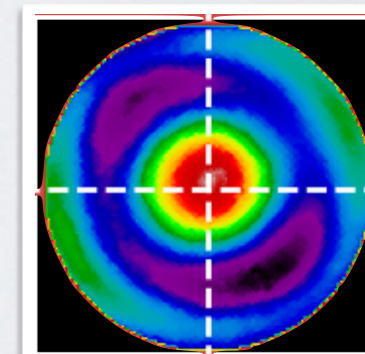
Fenêtre

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

Astigmatisme



Aberration sphérique



Faisceau de lecture

Brevet CNRS Fastlite 2019

*Li et al., Journ. of App. Phys. (2004)*

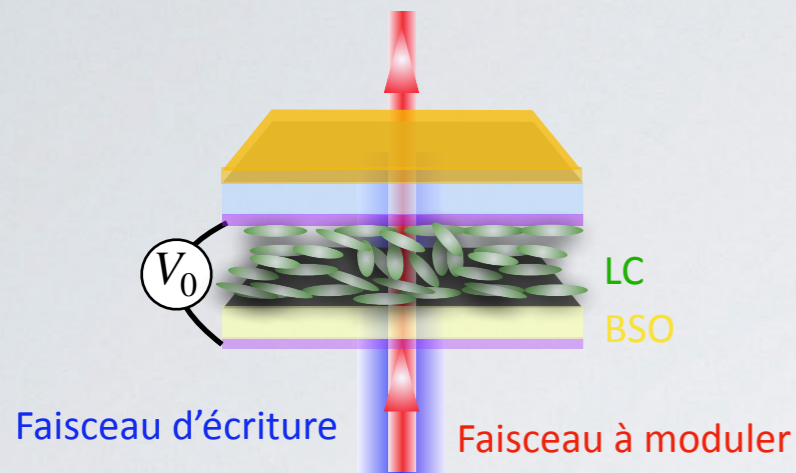
*V. Di Pietro et al., Optics Letters (2020)*

*S. Barland et al., Optics Express (2023)*

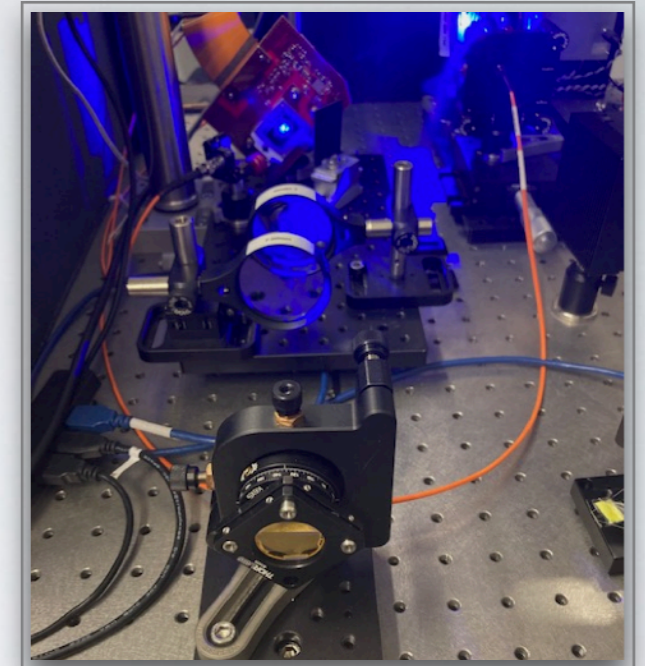
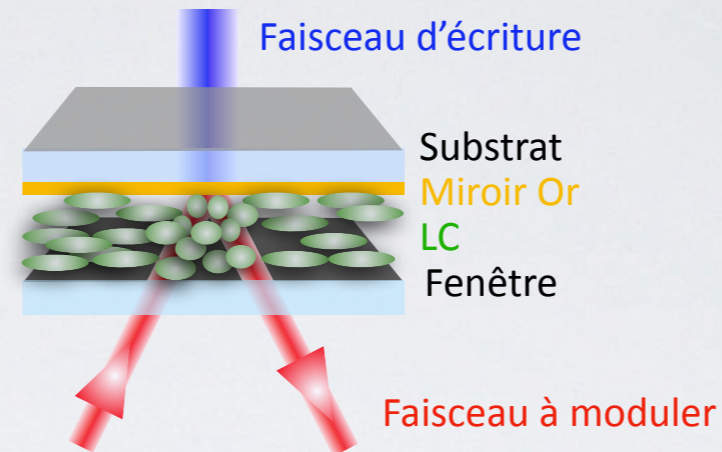


# Modulation en amplitude du faisceau d'écriture

Valve électro-optique

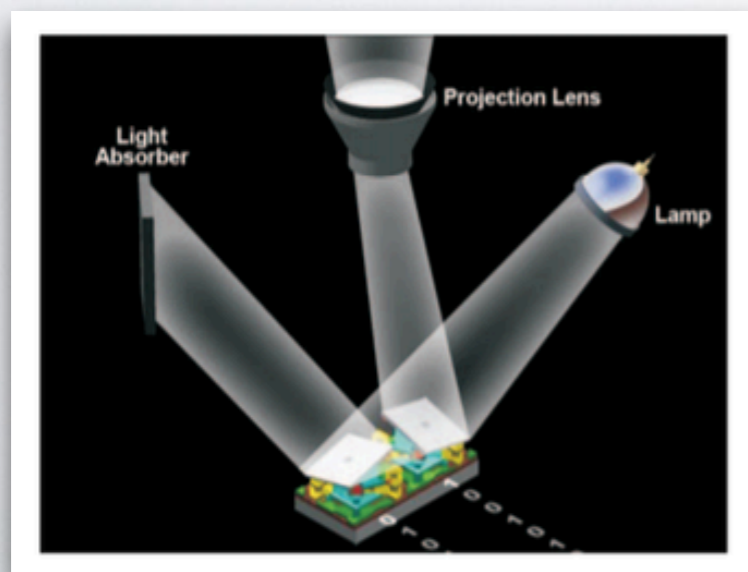


Valve thermo-optique



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

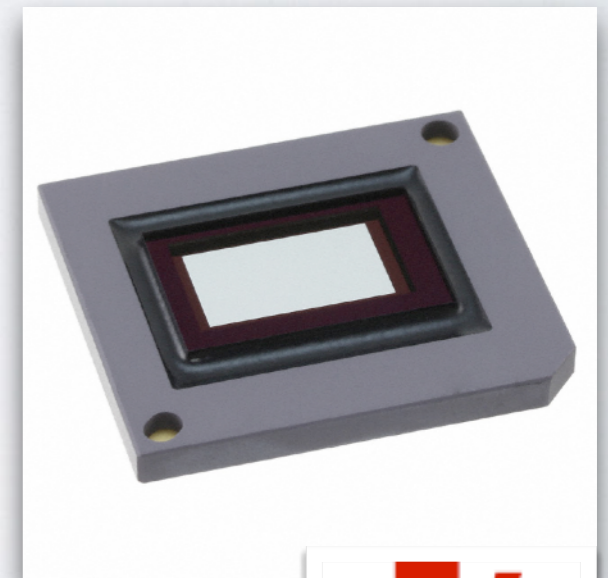
## Digital Micromirror Device (DMD)



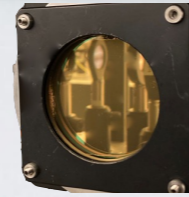
@ Texas Instruments

### Matrice de micro-miroirs

- ▶ Modulation amplitude 0-1
- ▶ Encodage du motif sur 8 bits
- ▶ Haute résolution (1080x1920 pixels)
- ▶ Surface : ~ 1 cm<sup>2</sup>



# 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	$2\pi$	$> 2\pi$	$\gg 2\pi$
Pupille	1-2 cm <sup>2</sup>	1-2 cm <sup>2</sup>	$> 5\text{ cm}^2$
Résolution spatiale	20 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$
Points de contrôle	10 <sup>6</sup> pts/cm <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup> pts/cm <sup>2</sup>	400 pts/cm <sup>2</sup>
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

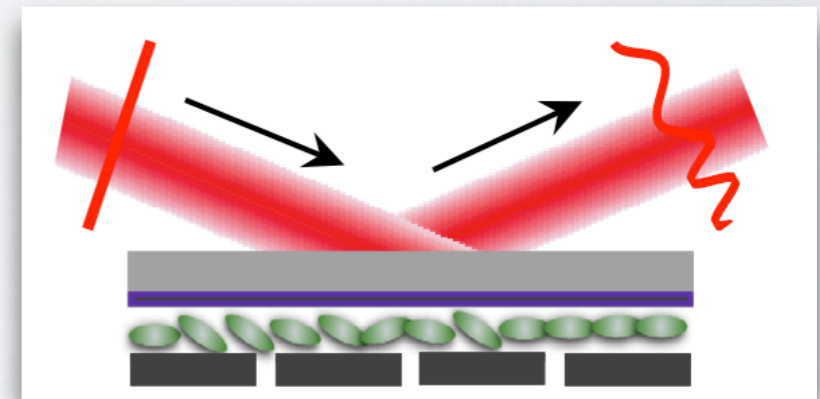
Adressage continu



# Mise en forme spatiale de lasers

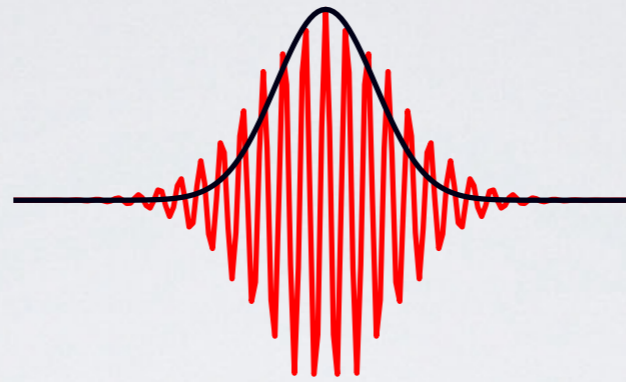
---

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

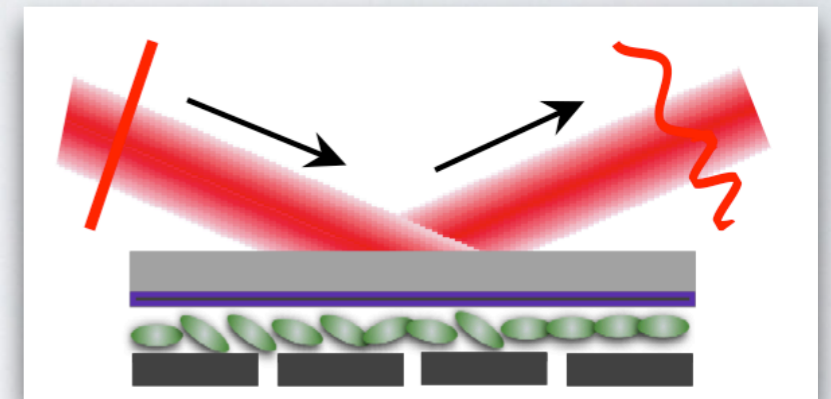


# Contexte : sources femtosecondes

Cristaux liquides nématiques



SLMs

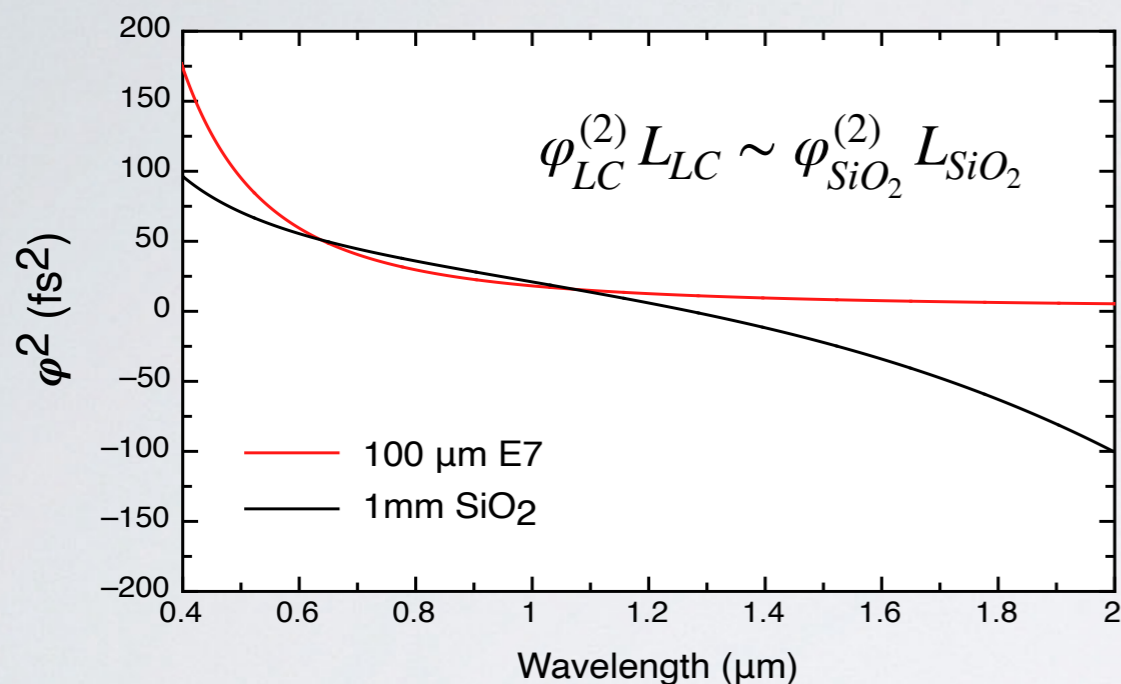


250 - 3000 nm	Acceptance spectrale => maximale	???
???	Dispersion => minimale	???
???	Coefficient non linéaire => minimal	???
???	Résistance au flux laser => maximale	???



# 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 <sup>2</sup> /W)	$n_2^e$ (cm <sup>2</sup> /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/cm<sup>2</sup>

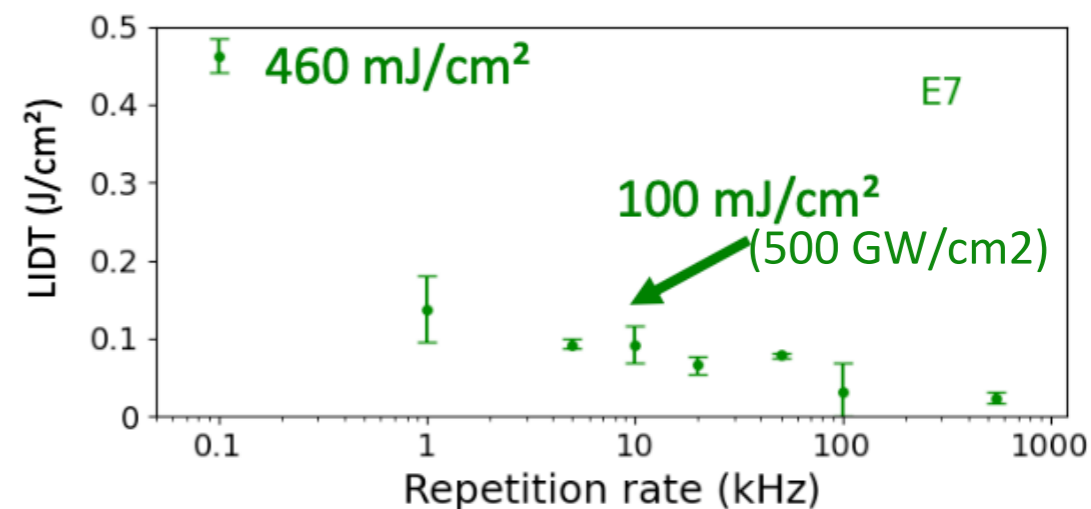
@ 1  $\mu\text{m}$ , 1 ps

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

Exposition monocoup :

LIDT (E7) ~ 1 J/cm<sup>2</sup>

@ 1  $\mu\text{m}$ , 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/cm<sup>2</sup> (nanoseconde, monocoup)

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

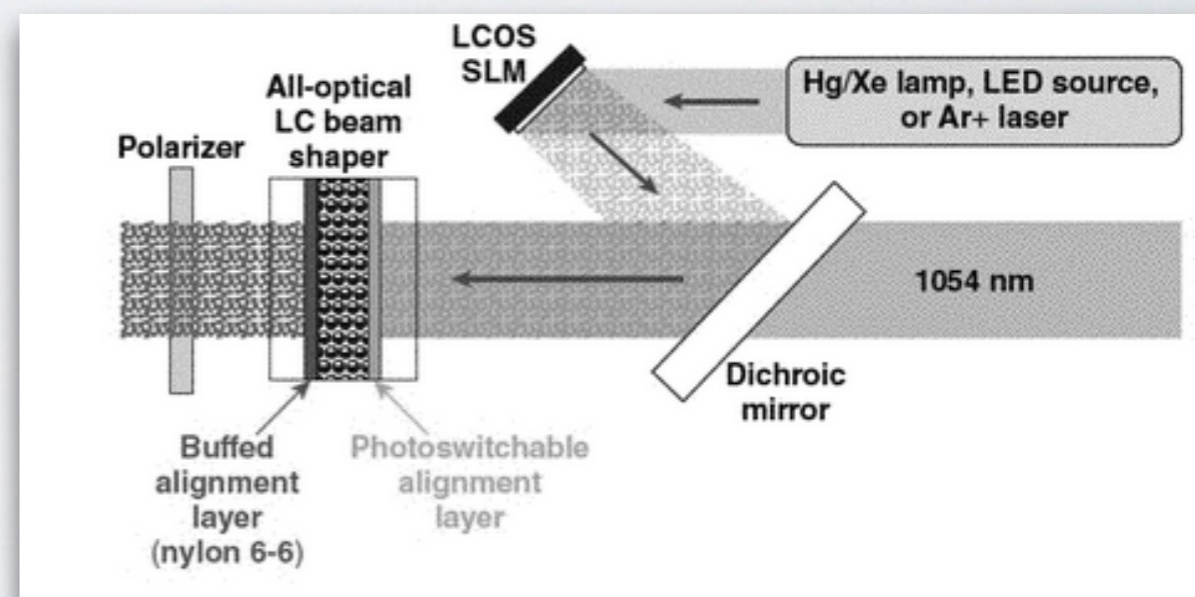
## High-damage-threshold static laser beam shaping using optically patterned liquid-crystal devices

C. Dorrer,<sup>1\*</sup> S. K.-H. Wei,<sup>2</sup> P. Leung,<sup>1</sup> M. Vargas,<sup>1</sup> K. Wegman,<sup>1</sup> J. Boulé,<sup>1</sup> Z. Zhao,<sup>1</sup> K. L. Marshall,<sup>1</sup> and S. H. Chen<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Department 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)

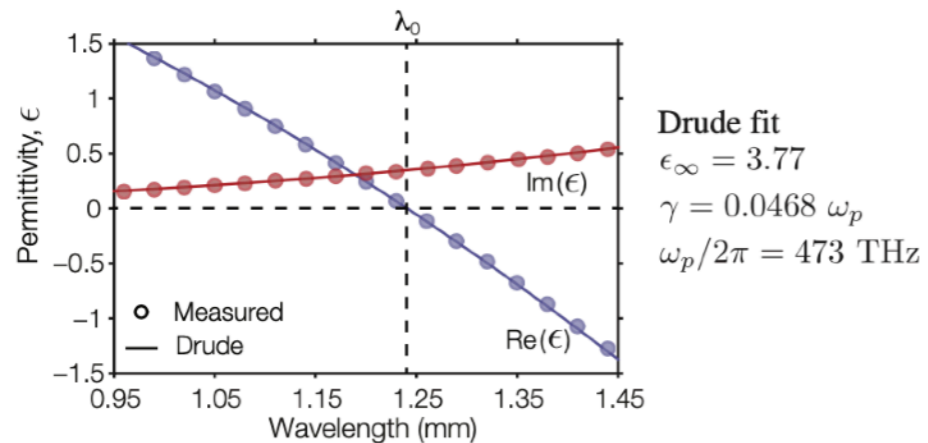


- ▶ Limitations liées à l'électrode (ITO) :
  - ▶ Acceptance spectrale  $\ll 1.5 \mu\text{m}$

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  $\mu\text{m}$ , but that the loss-part  $\text{Im}(\epsilon)$  is non-zero.

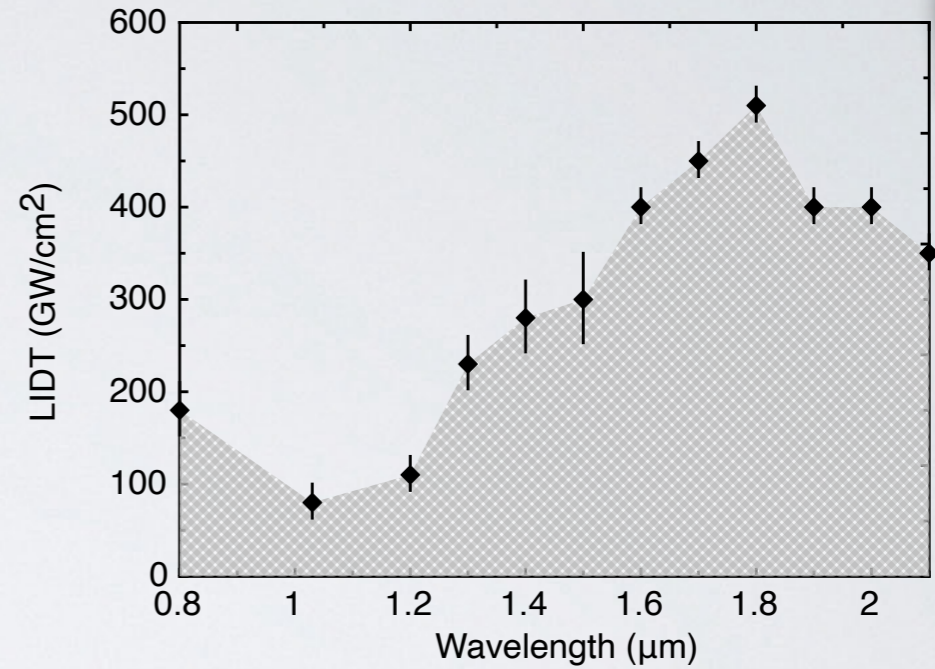
*Alam et al., Science Reports, 2016*

- ▶ 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

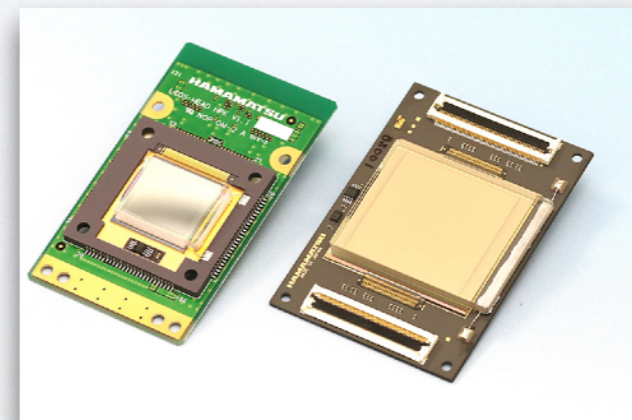


*L. Ramousse et al., under publication*

# HAMAMATSU

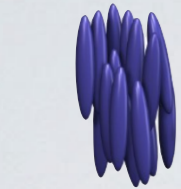
PHOTON IS OUR BUSINESS

300 W en CW (new heat management !)



# Acceptance spectrale

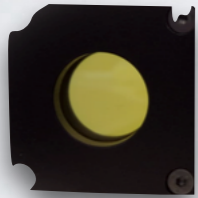
500 nm      1  $\mu\text{m}$       1.5  $\mu\text{m}$       2  $\mu\text{m}$       2.5  $\mu\text{m}$       3  $\mu\text{m}$



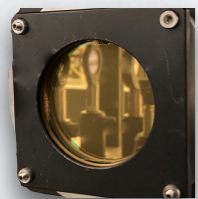
Khoo, et al.



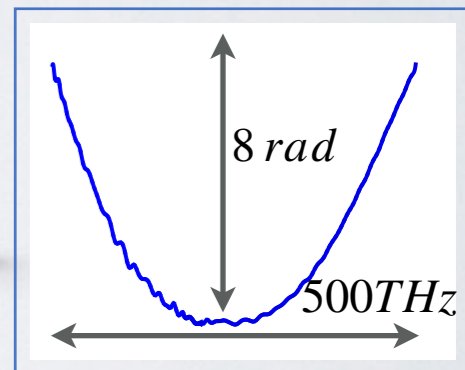
www.hamamatsu.com



www.hoasys.com



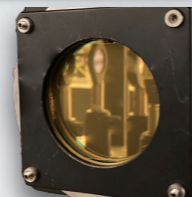
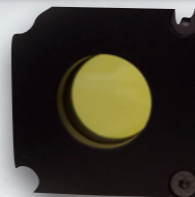
V. D.P. et al., OL (2020)



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	$2\pi$	$> 2\pi$	$\gg 2\pi$
Pupille	1-2 cm <sup>2</sup>	1-2 cm <sup>2</sup>	$> 5\text{ cm}^2$
Résolution spatiale	20 $\mu\text{m}$	100 $\mu\text{m}$	500 $\mu\text{m}$
Points de contrôle	10 <sup>6</sup> pts/cm <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup> pts/cm <sup>2</sup>	400 pts/cm <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup> (@800 nm, 1 kHz)	50 GW/cm <sup>2</sup> (@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...)

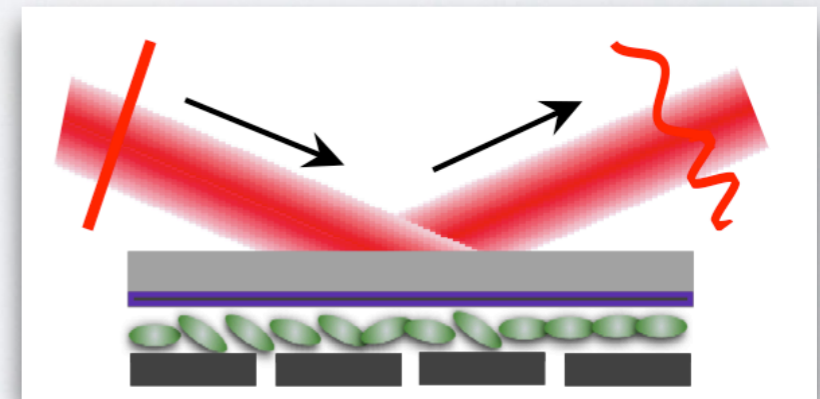
Exemples @ 30 fs, 800 nm :

- LCoS 2cm<sup>2</sup> => E < 5 mJ
- TOA-SLM 5cm<sup>2</sup> => 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

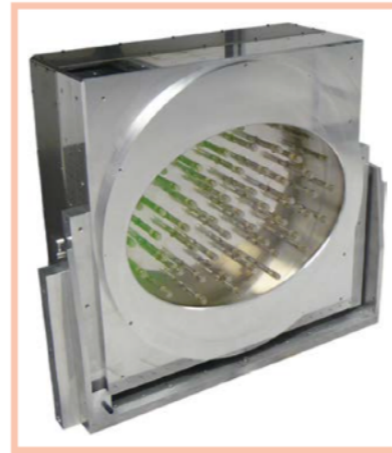
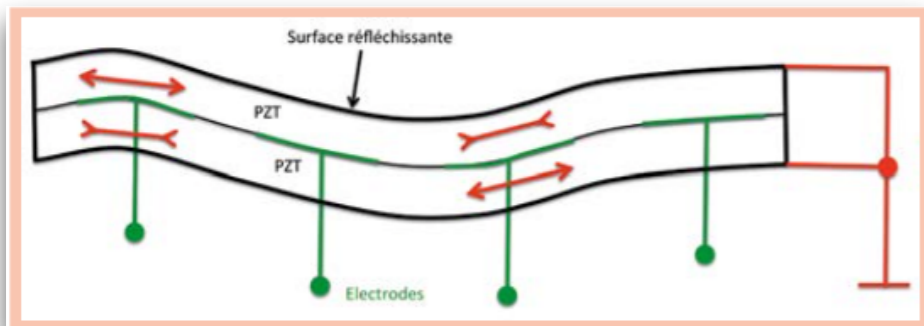




# Miroirs déformables

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**

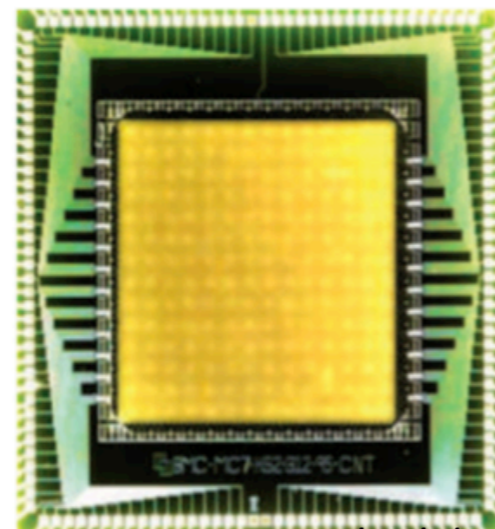
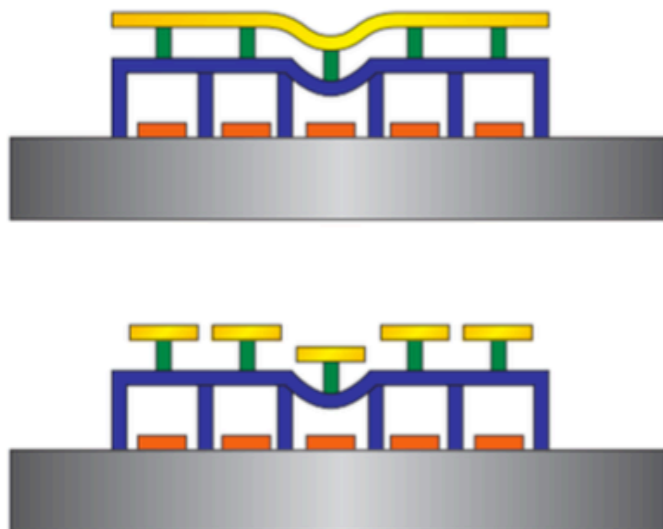
**PHASICS**  
the phase control company

**BOSTON MICROMACHINES CORPORATION**  
SHAPING LIGHT

**ALPAO**

**ISP SYSTEM**

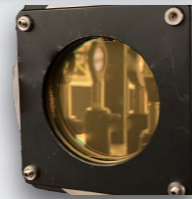
## MEMS (Microsystèmes électromécaniques)



Thorlabs

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

# Critères de performance



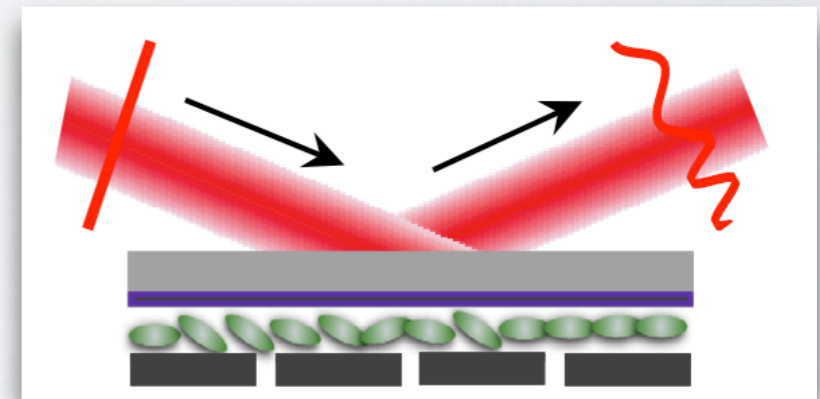
	SLM (LCoS)	Valve optique	TOA-SLM	MD	MEMS
Fonction	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase ou amplitude ou polarisation	Phase seulement	Phase seulement
Transmission / Reflection	80 %	< 80 %	90 %	> 95%	> 90%
Modulation de phase	2 $\pi$	> 2 $\pi$	>> 2 $\pi$	>> 2 $\pi$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



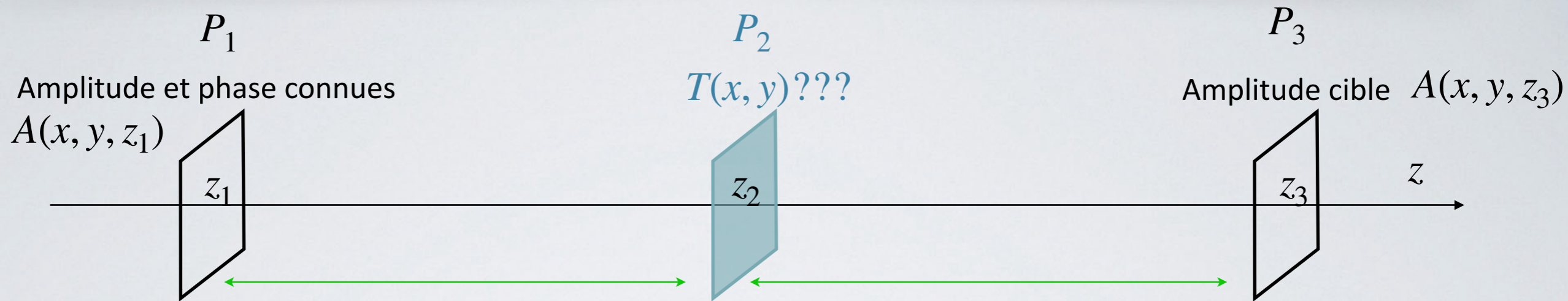
# Mise en forme spatiale de lasers

---

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

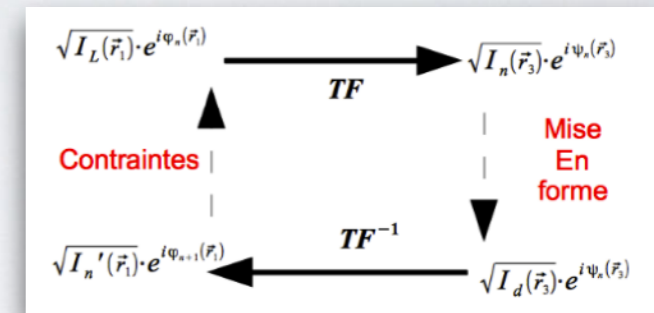


# Programmation arbitraire



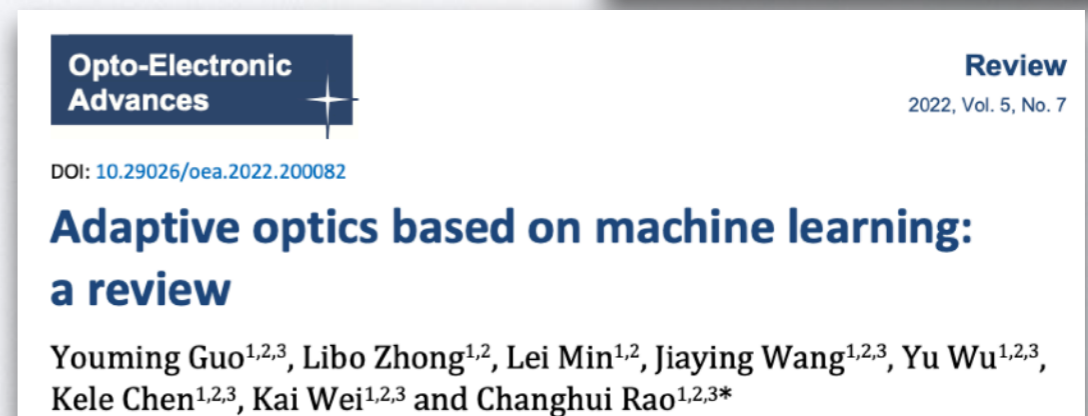
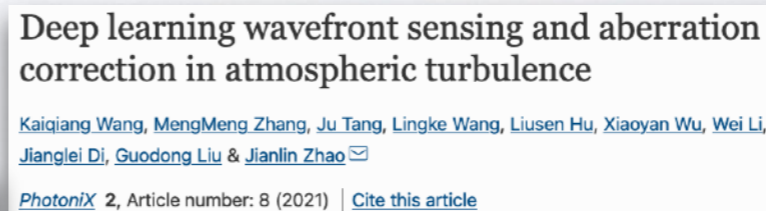
## Calcul des masques de phase

- ▶ 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

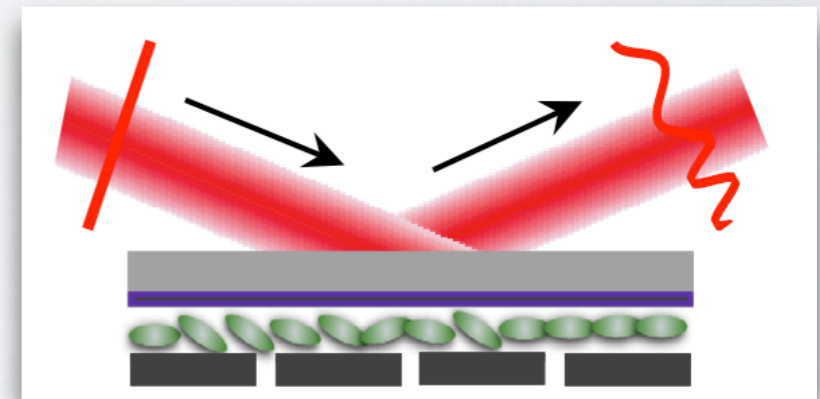




# Mise en forme spatiale de lasers

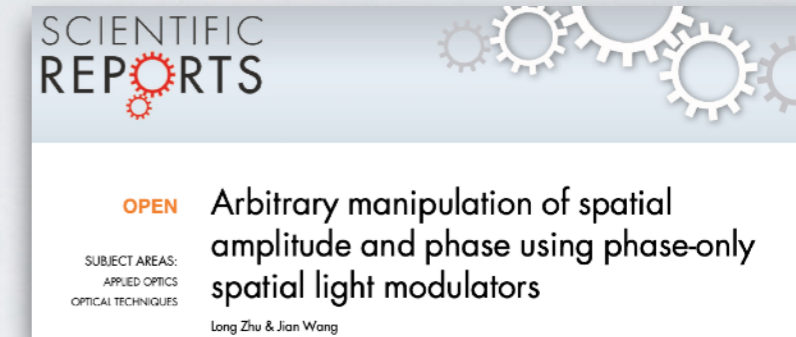
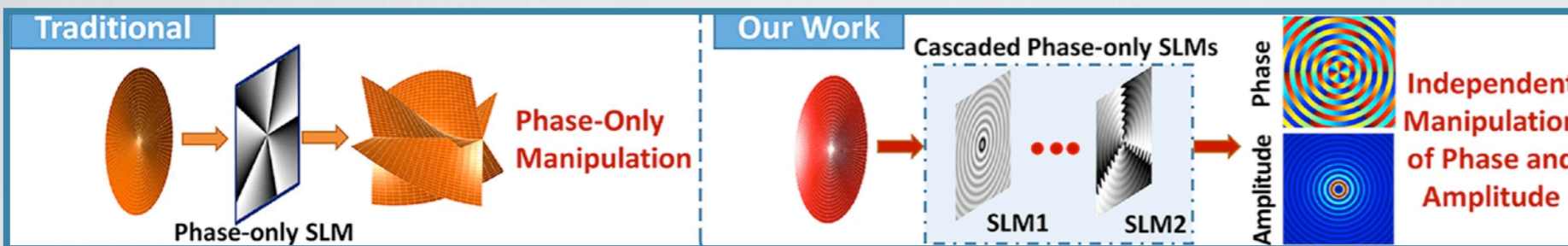
---

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

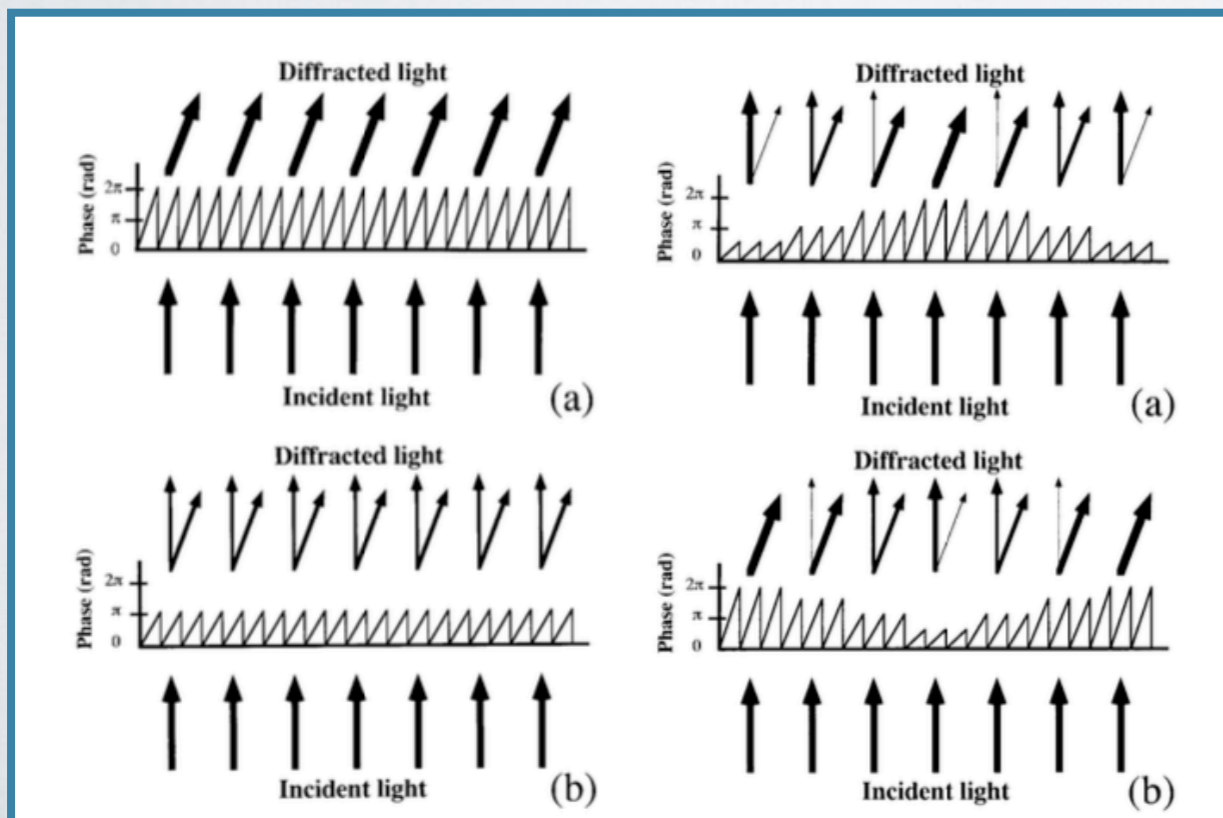


# Moduler la phase et l'amplitude

## SLMs en cascade



## 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,<sup>1</sup> Nicolas Bent,<sup>1</sup> Enrico Santamato,<sup>2</sup> Ebrahim Karimi,<sup>1,\*</sup> and Robert W. Boyd<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, University of Ottawa, 150 Louis Pasteur, Ottawa, Ontario K1N 6N5, Canada

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

<sup>3</sup>Institute of Optics, University of Rochester, Rochester, New York 14627, USA

\*Corresponding author: [ekarimi@uottawa.ca](mailto: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](mailto: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

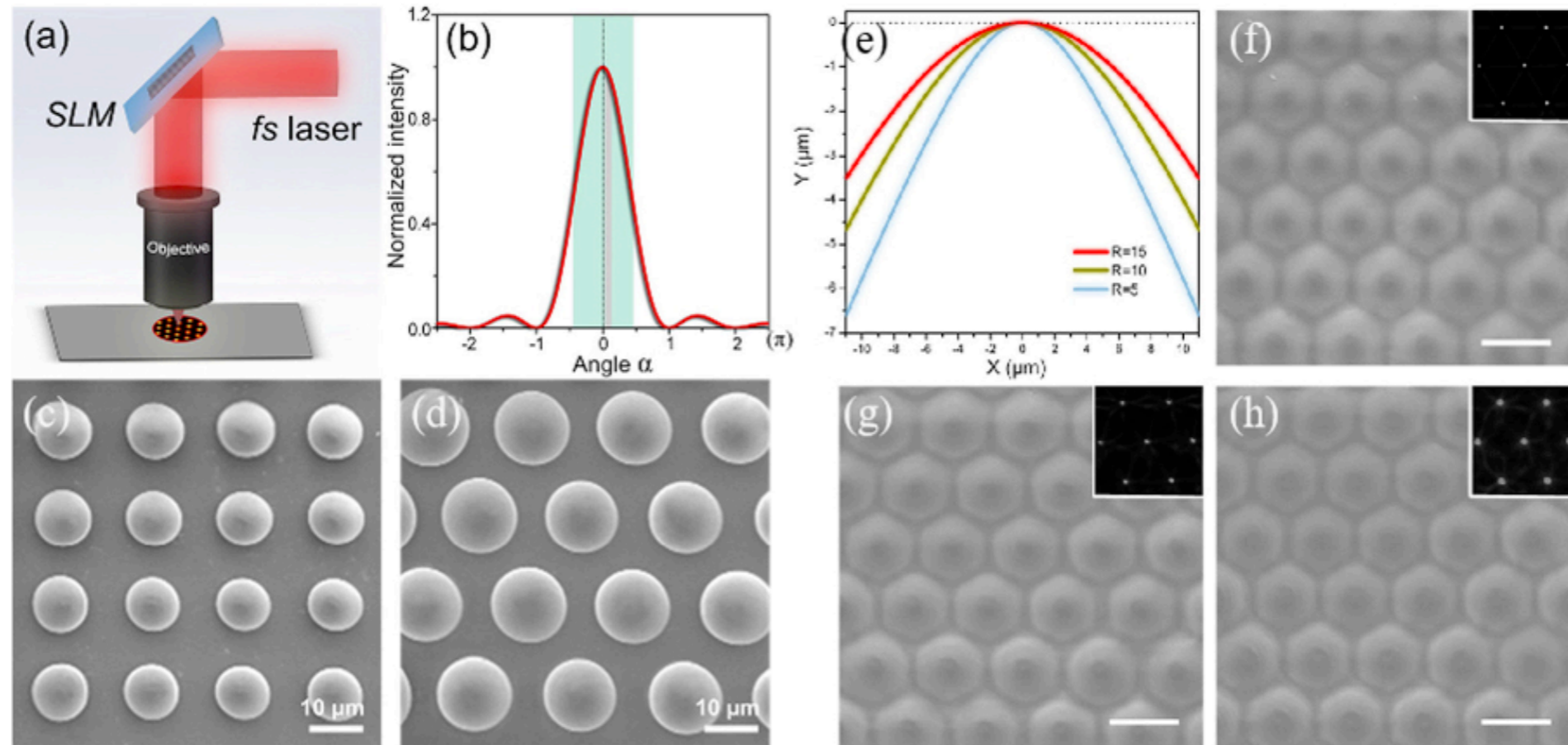
pubs.aip.org/lia/jla

## 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



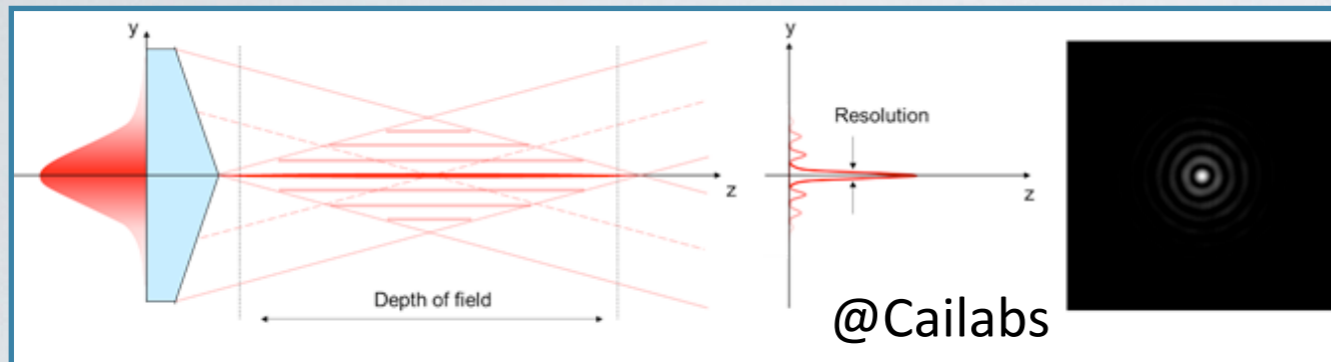
Zhihao Qu,<sup>1</sup> Shufeng Sun,<sup>1,a)</sup> Jin Wang,<sup>1</sup> Mingming Jiang,<sup>1</sup> Fengyun Zhang,<sup>1</sup> Xi Wang,<sup>1</sup>  
Jing Shao,<sup>1</sup> Cuanglei Liang,<sup>1</sup> and Pingping Wang<sup>1,2</sup>



**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

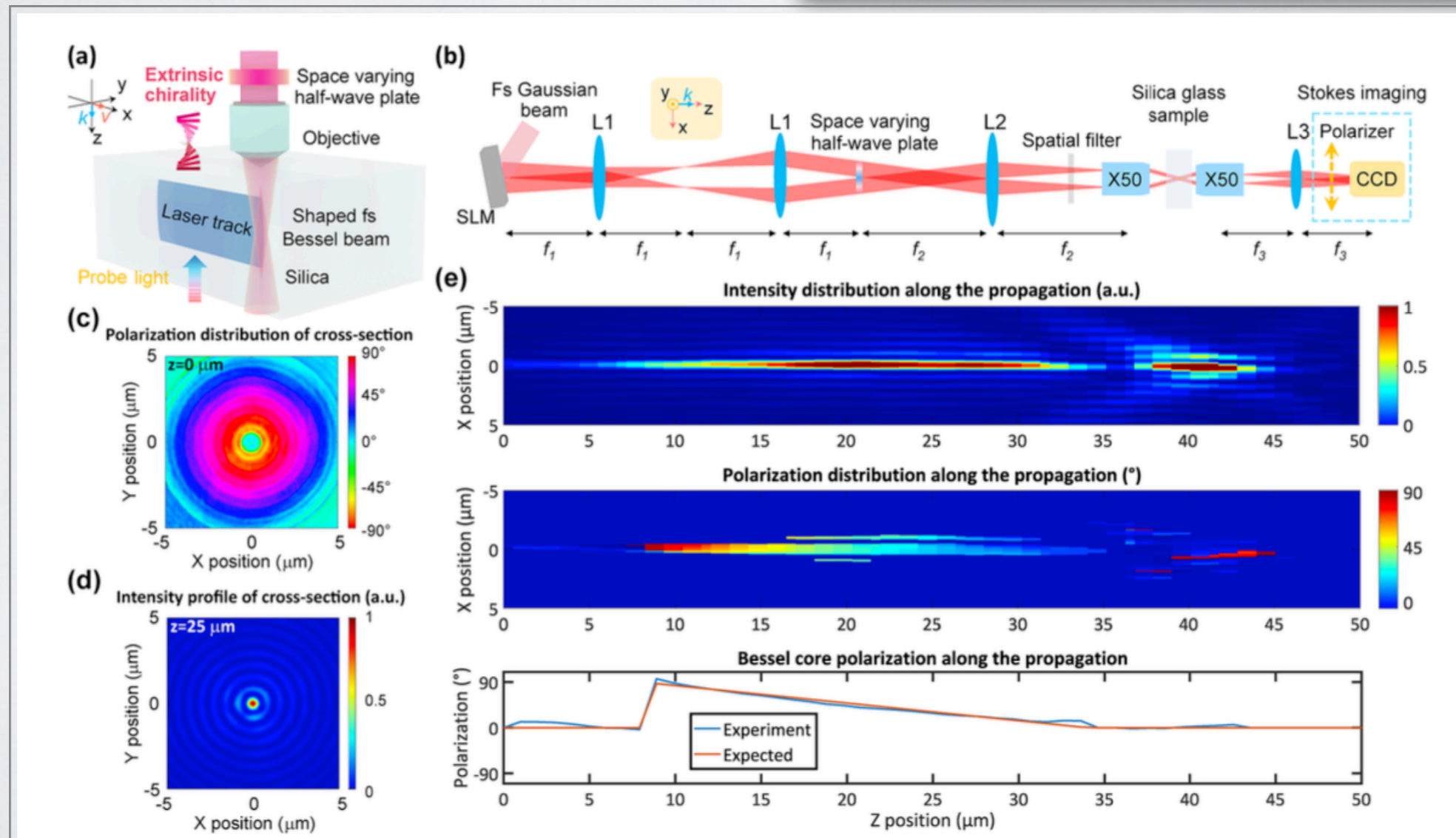
### 3D structured Bessel beam polarization and its application to imprint chiral optical properties in silica

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

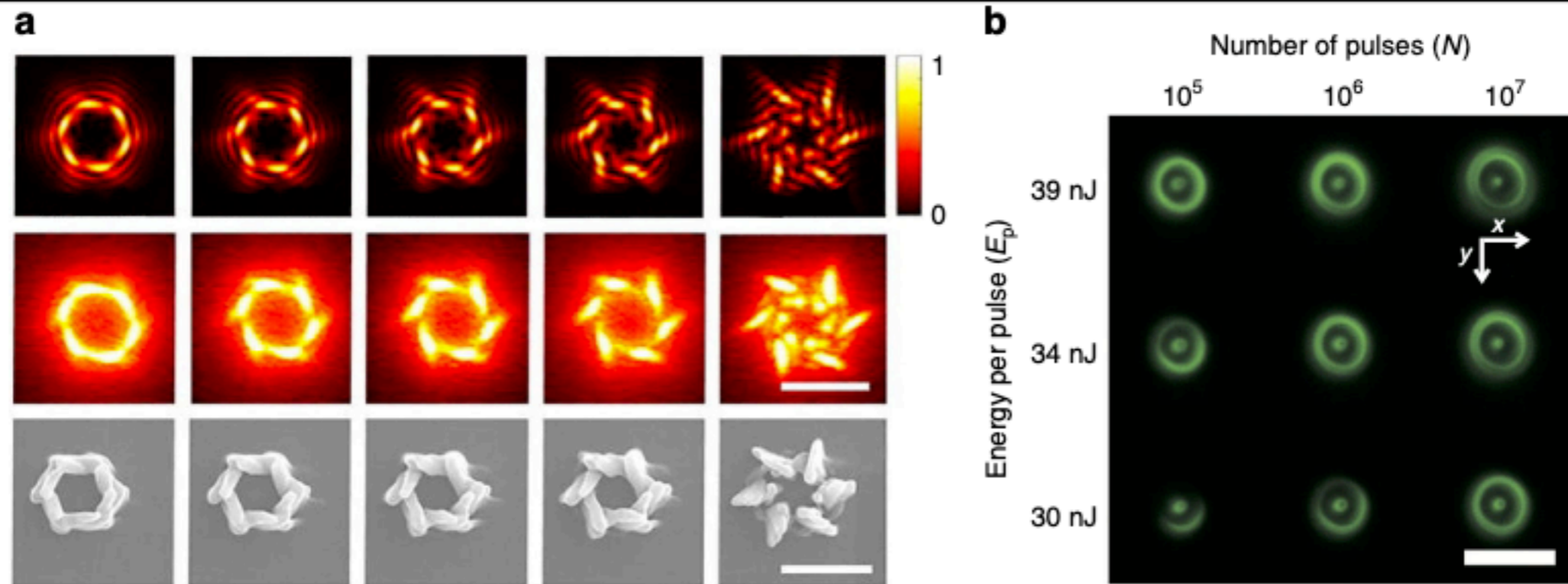
Official journal of the CIOMP 2047-7538  
www.nature.com/lisa

REVIEW ARTICLE

Open Access

## Adaptive optics in laser processing

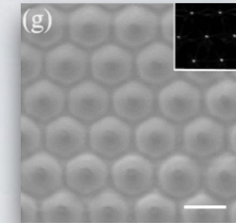
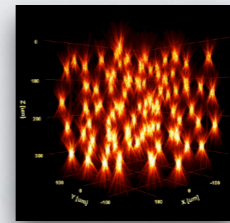
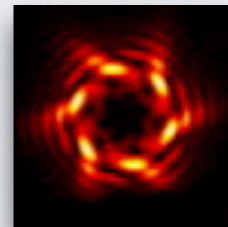
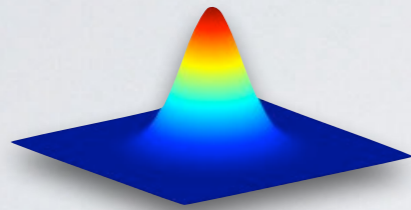
Patrick S. Salter<sup>1</sup> and Martin J. Booth<sup>1</sup>



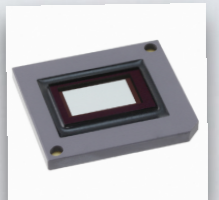
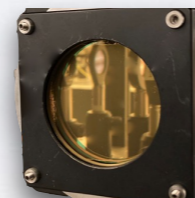
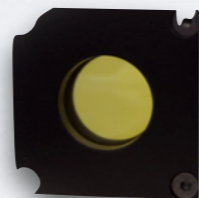
**Fig. 6 Laser fabrication using adaptive optics to generate the OAM to shape the fabrication focus.** **a** Two-photon polymerisation using the OAM to generate a chiral surface<sup>85</sup>. Scale bar: 5  $\mu\text{m}$ . **b** STED-inspired fabrication of nanoscale structures inside a photo-responsive glass<sup>95</sup>. Scale bar: 4  $\mu\text{m}$ . Images reproduced from **a** ref. <sup>85</sup> with permission from AIP and **b** ref. <sup>95</sup> with permission from OSA.

# Conclusions

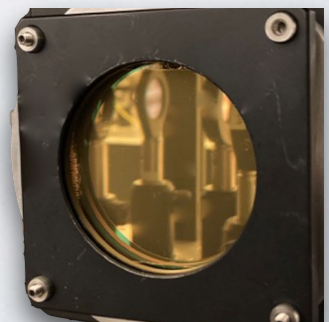
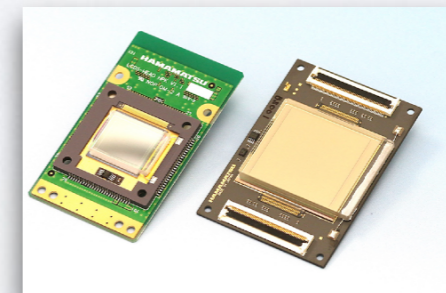
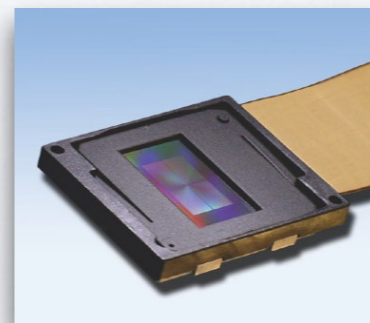
- ▶ Façonnage spatial de lasers => nombreuses applications



- ▶ Grandes variétés de dispositifs



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



- ▶ Nombreux développements technologiques récents