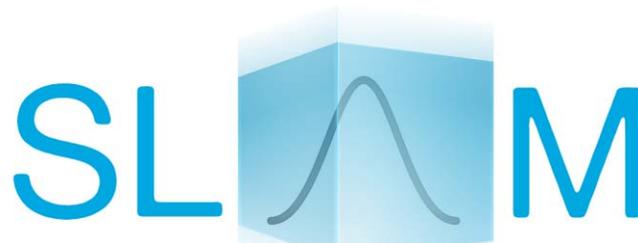


# Le stockage de données pérenne dans les verres : mythe ou réalité ?

---

*A. Royon<sup>1</sup>, K. Bourhis<sup>2</sup>, G. Papon<sup>1</sup>,  
Y. Deshayes<sup>3</sup>, T. Cardinal<sup>2</sup>, et L. Canioni<sup>1</sup>*  
*CPMOH-CNRS / Université de Bordeaux, France*  
*ICMCB-CNRS / Université de Bordeaux, France*  
*IMS-CNRS / Université de Bordeaux, France*

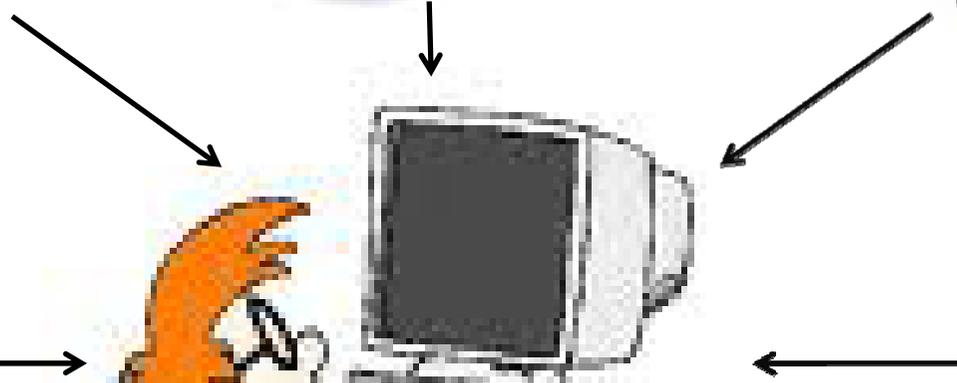
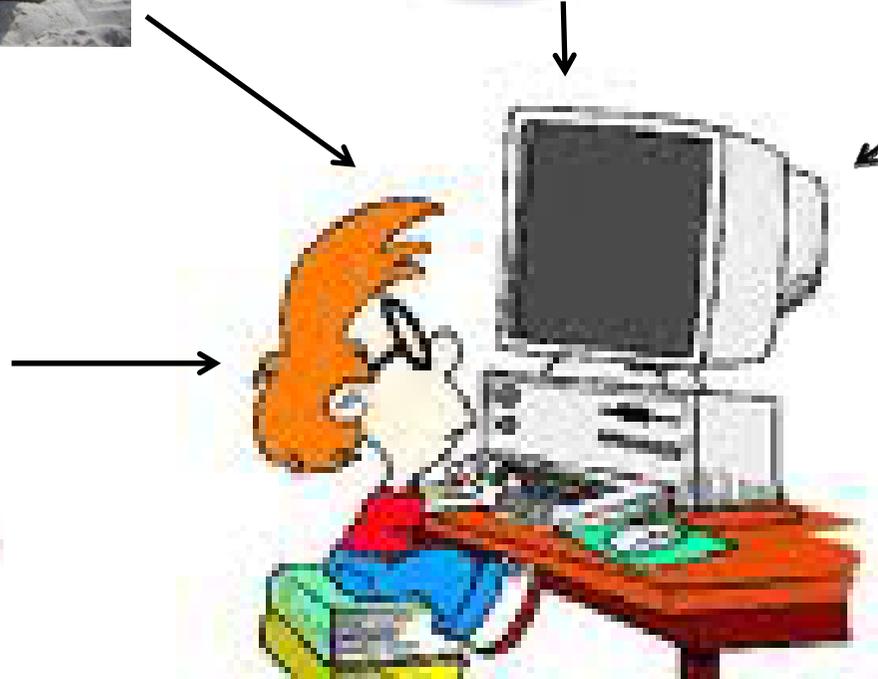
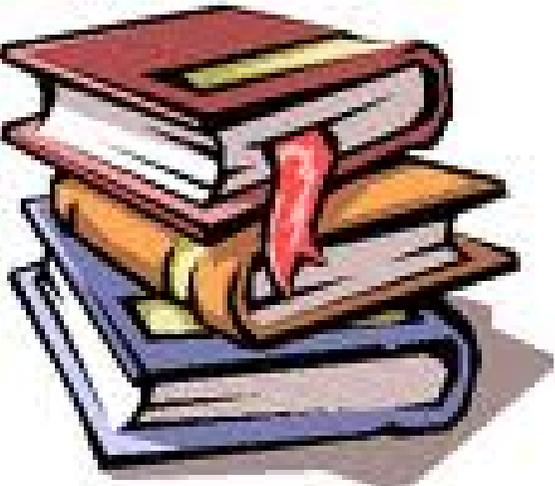
*GDR Verres*  
*25/11/2010*



# un enjeu de société

Politique des gouvernements et des grandes institutions → Numérisation des données (scientifiques, industrielles, administratives, médicales, artistiques, personnelles).

UNESCO → Notre civilisation numérique produit  $10^{18}$  Octets/an.



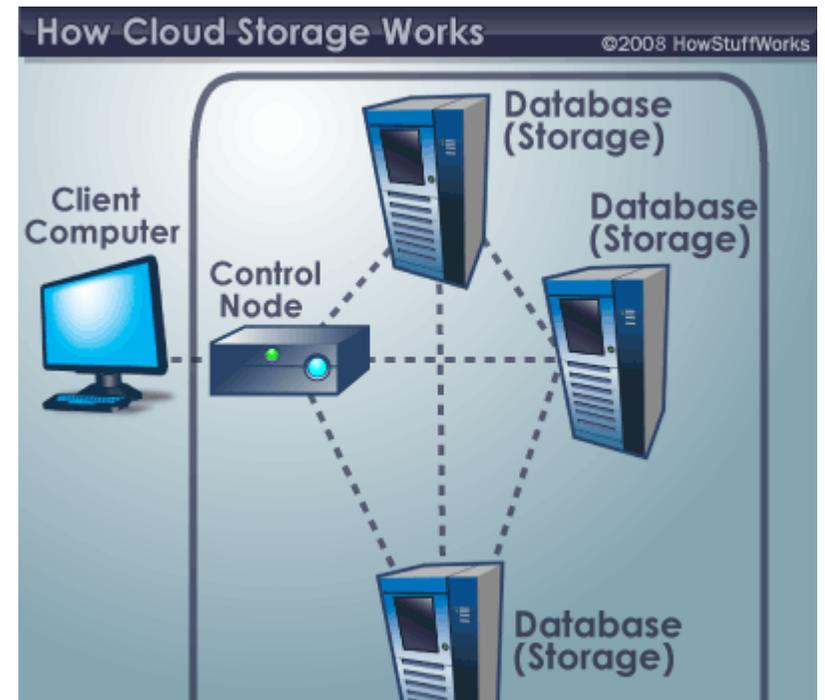
## Disque dur et clé USB :

- ☺ Capacité de stockage élevée (jusqu'à 500 Go).
- ☺ Coût faible (1 €/Go).
- ☹ Sensibilité aux ondes EM.
- ☹ Crash accidentel.
- ☹ Faible durée de vie (< 10 ans).



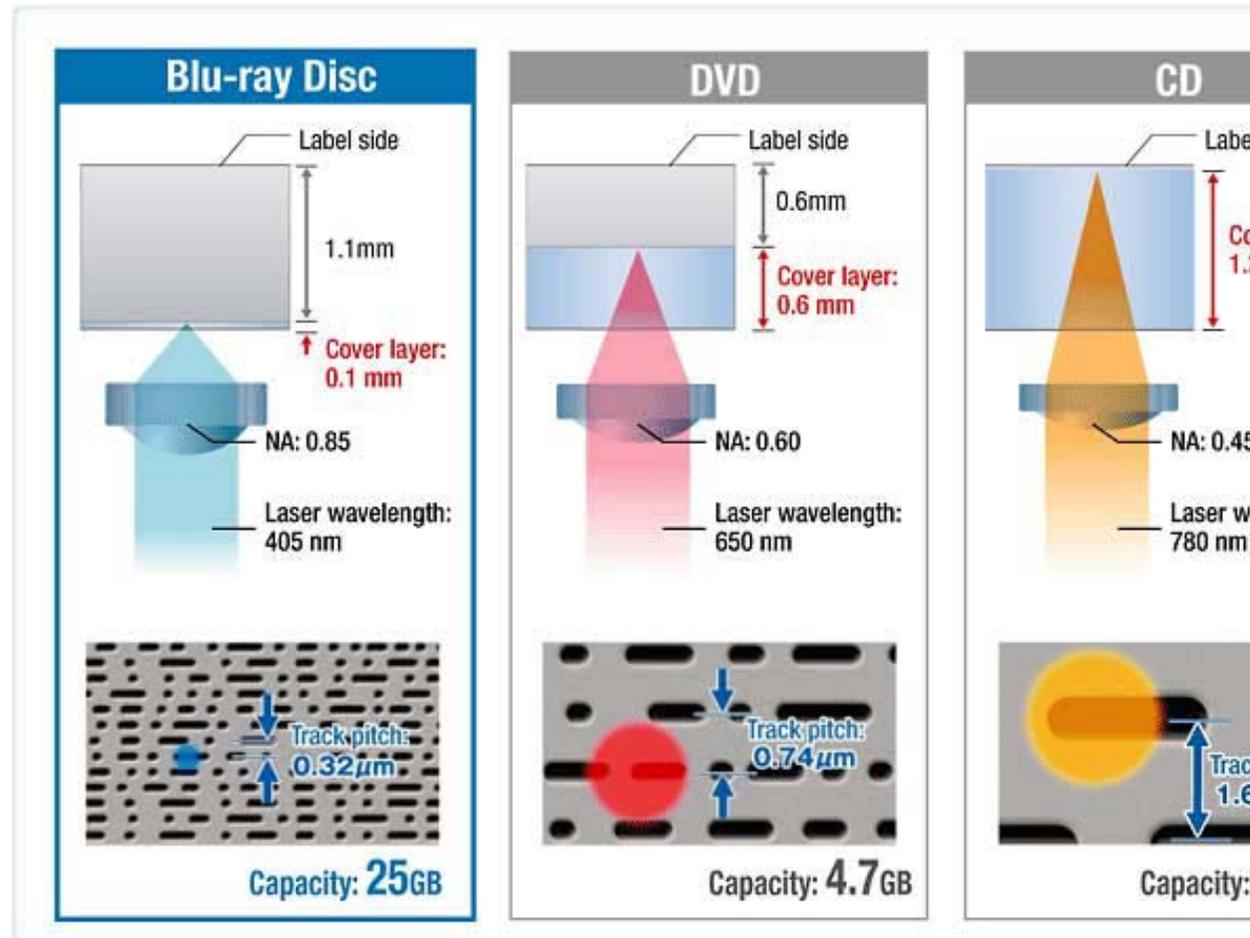
## Stockage en réseau :

- ☺ Capacité de stockage très élevée.
- ☺ Redondance des données.
- ☹ Coût élevé (300 à 3000 €/To/an).
- ☹ Sécurité.
- ☹ Consommation d'énergie



## Disques optiques numériques :

- ☺ Coût faible (1 €/disque).
- ☹ Capacité de stockage faible (50 Go maximum pour le « Blu-ray »).
- ☹ Faible durée de vie (< 10 ans)  
→ Matériau = polymère.



Technologies ne sont pas adaptées au stockage pérenne des données.

le groupe de travail PNR des Académies des Sciences et des Technologies

*devient urgent de développer des matériaux innovants pour un stockage de l'information à long terme”.*

## Holographique :

- ☺ Capacité de stockage élevée (jusqu'à 6 To).
- ☹ Coût élevé (disque = 180 \$, lecteur = 18000 \$).
- ☹ Faible durée de vie → Matériau = polymère.



Holographic Versatile Disk (HVD)

## Point par point par absorption multi-photonique :

- ☺ Capacité de stockage élevée (~ 1 To).
- ☹ Technologies d'écriture et de lecture non disponibles sur le marché.
- ☹ Diaphonie entre les couches (modification de l'indice de réfraction).
- ☹ Durée de vie ? Dépend du matériau (polymère ou verre).



Digital Multilayer Disk (DMD)

nanoparticules d'or dans polymère.  
 3 dimensions d'espace +  
 polarisation + spectre = 5D





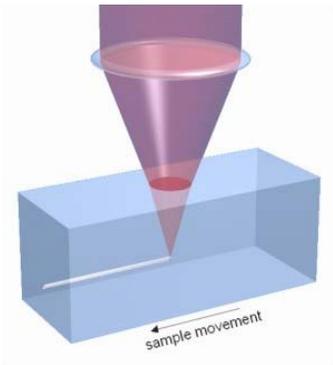
# de matériaux transparents

Technique flexible pour induire des modifications (structurales ou chimiques) localisées dans un matériau.

Possibilité de fabriquer des motifs en 3D.

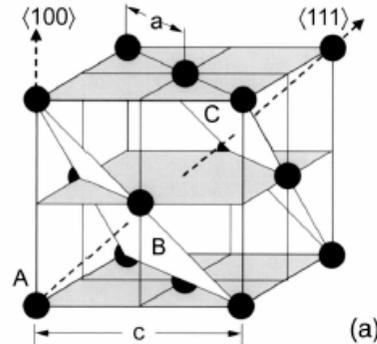
Utilisée pour de nombreuses applications.

## Guides d'onde

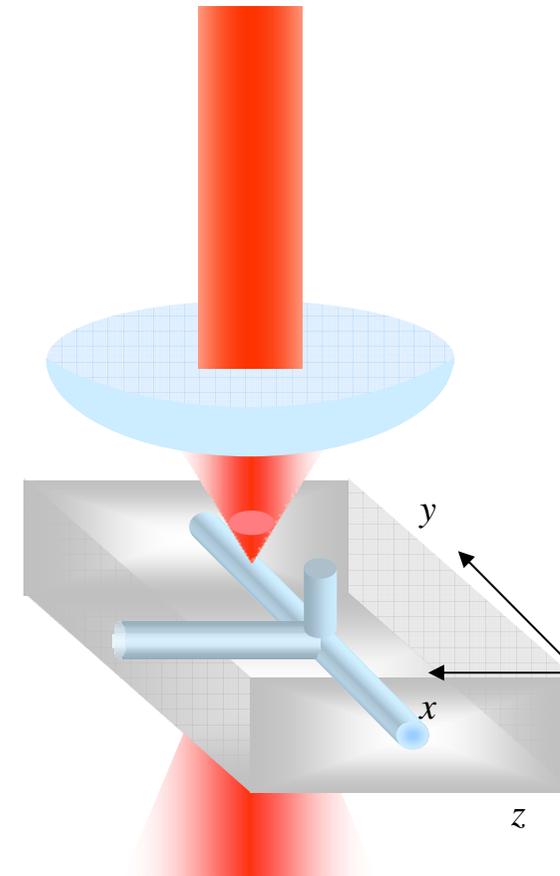


Davis *et al.*, Opt. Lett. **21**, 1729-1731 (1996).

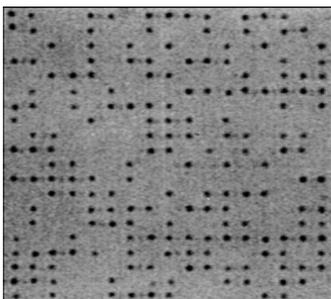
## Cristaux photoniques



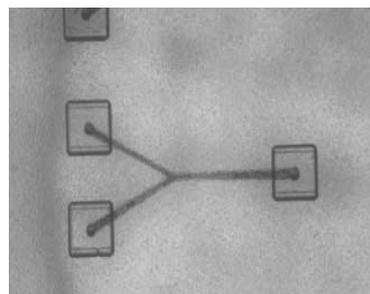
Sun *et al.*, Opt. Lett. **26**, 325-327 (2001).



## Mémoires optiques



## Micro-canaux



## Cristaux fonctionnels





# de matériaux transparents

*Impulsions femtosecondes dans le PIR focalisées :*

Densité de puissance élevée.

Absorption non-linéaire.

*Impulsions femtosecondes :*

Déposition rapide d'énergie.

Minimisation des effets thermiques.

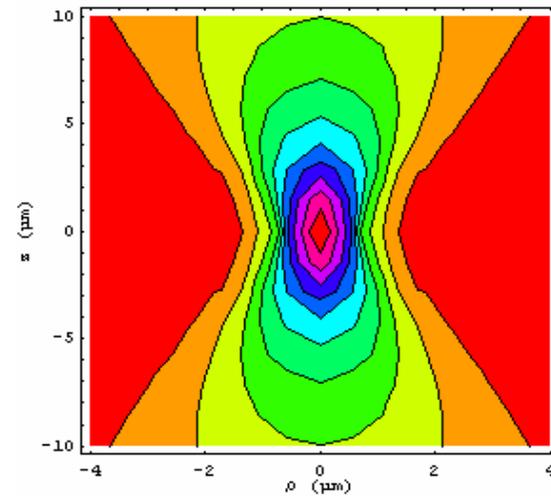
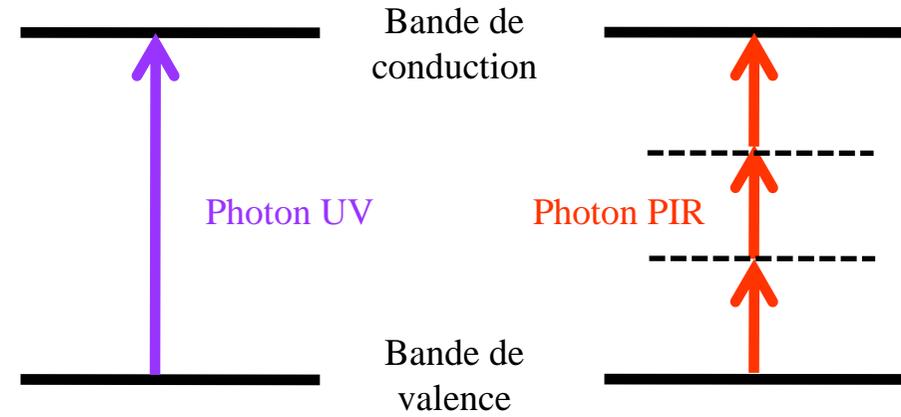
*Cadence élevée :*

Accumulation d'énergie.

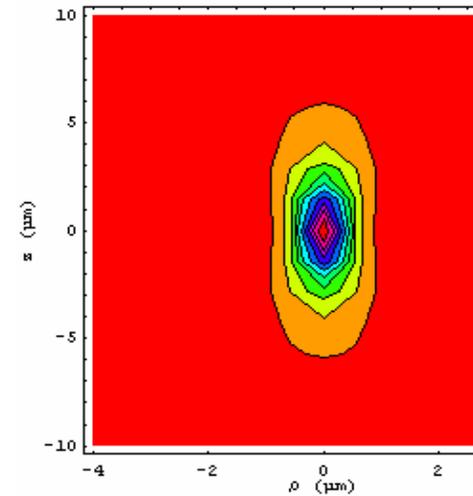
Effets thermiques cumulés.

Absorption non-linéaire.

Absence d'effet thermique.



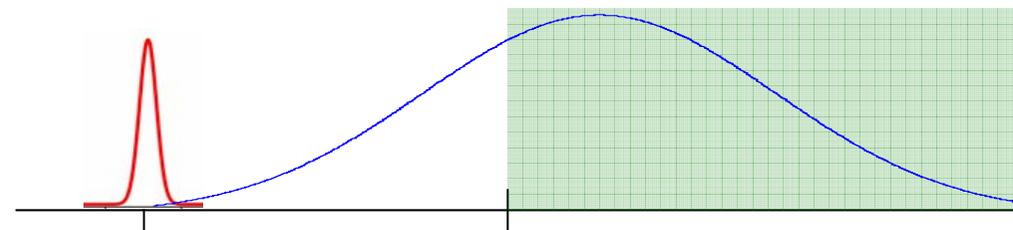
Absorption linéaire



Absorption à 3 photons

Impulsion fs

Impulsion ns



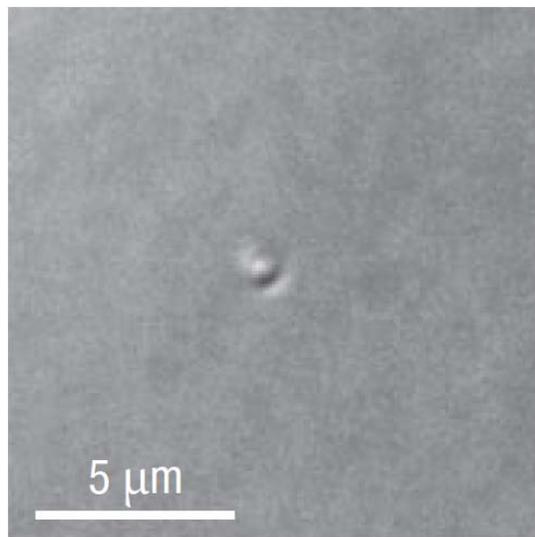


Différents **types de réponse** suivant l'énergie du laser.

Dans le cas de la **silice** :

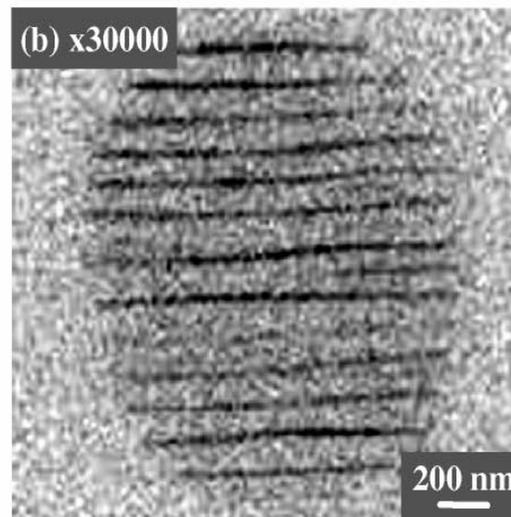
- **Isotrope (type 1)** : guides d'onde, coupleurs...
- **Biréfringent (type 2)** : contrôleurs de polarisation...
- **Micro-cavité (type 3)** : mémoires, cristaux photoniques...

Type 1



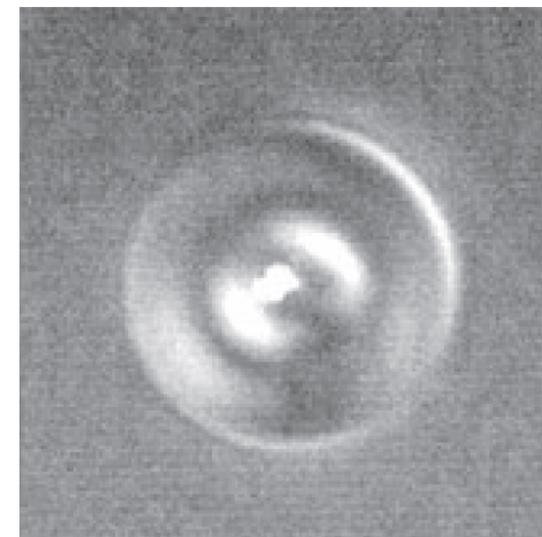
Gattas and Mazur, Nature

Type 2



Shimotsuma *et al.*, Phys.

Type 3



Gattas and Mazur, Nature

## Micro-cavités (type 3) :

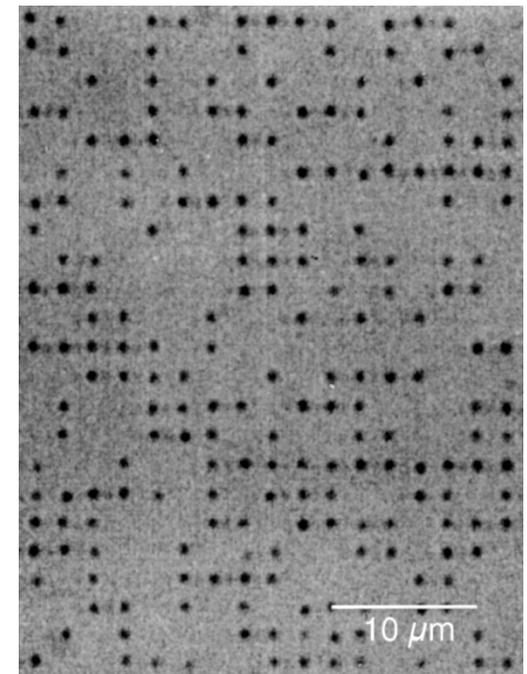
Glezer *et al.*, Opt. Lett. **21**,  
2023-2025 (1996).

Capacité de stockage élevée ( $\sim 1 \text{ Tbits.cm}^{-3}$ ).

Ecriture = laser femtoseconde / Lecture =  
microscopie optique en lumière blanche.

3 dimensions de l'espace.

⊗ Diaphonie entre les couches (modification de  
l'indice de réfraction).





## Micro-cavités (type 3) :

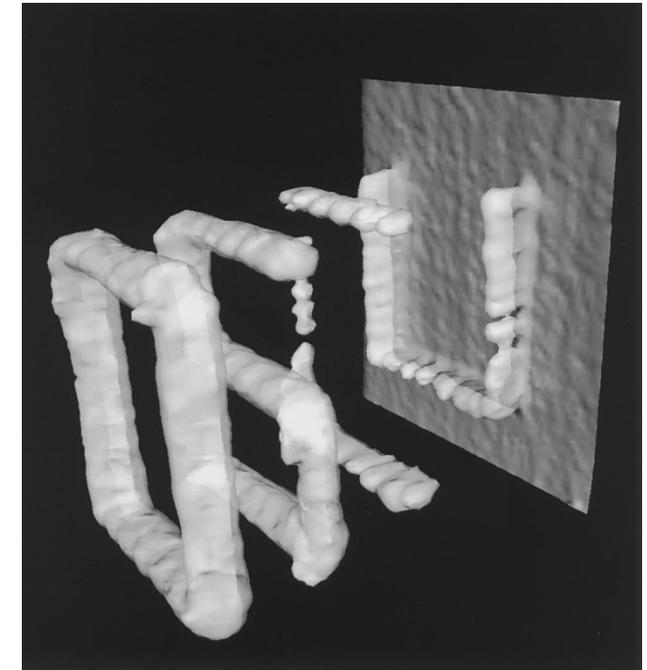
Squier and Müller, *App. Opt.*  
38, 5789-5794 (1999).

Capacité de stockage élevée ( $\sim 1 \text{ Tbits.cm}^{-3}$ ).

Ecriture = laser femtoseconde / Lecture =  
microscopie par GTH.

3 dimensions de l'espace.

☹ Diaphonie entre les couches (modification de  
l'indice de réfraction).



## "Nano-réseaux" (type 2) :

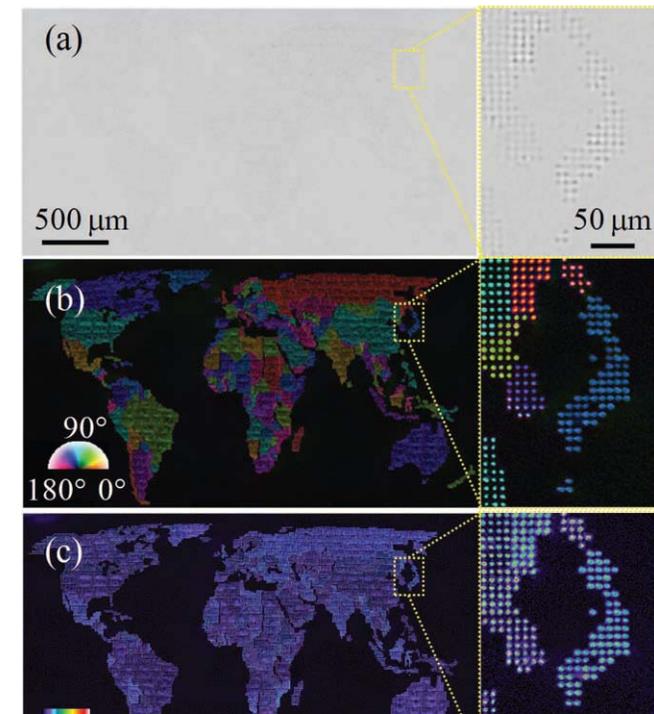
Shimotsuma *et al.*, *Adv. Mat.*  
22, 4039-4043 (2010).

Capacité de stockage élevée ( $\sim 300 \text{ Gbits.cm}^{-3}$ ).

Ecriture = laser femtoseconde / Lecture = CCD +  
polariseurs.

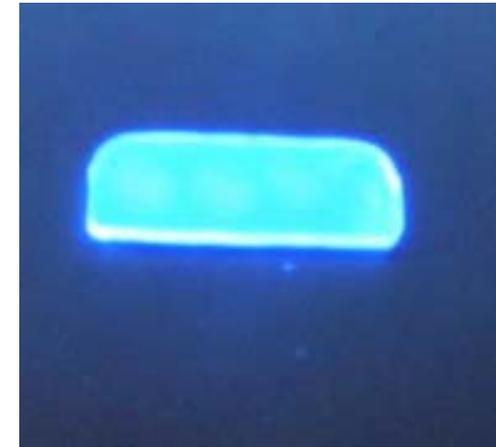
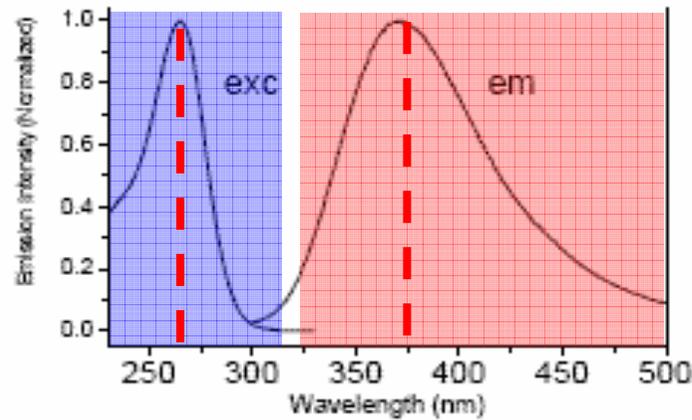
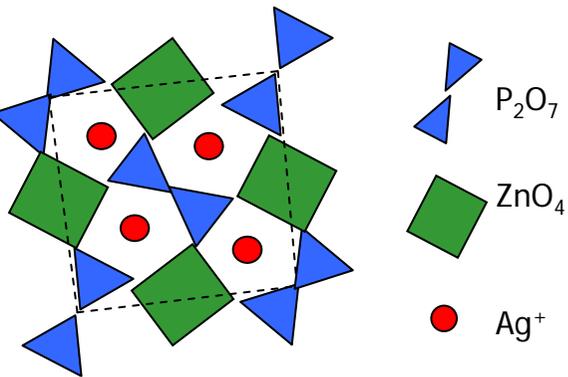
3 dimensions de l'espace + direction de l'axe lent +  
retard = 5D.

☹ Diaphonie entre les couches (modification de



# (FPL)

Composition chimique : 55% ZnO – 40% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – x% Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – (5-x)% Ag<sub>2</sub>O.



ZnO – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: matrice vitreuse.

Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: stabilisateur.

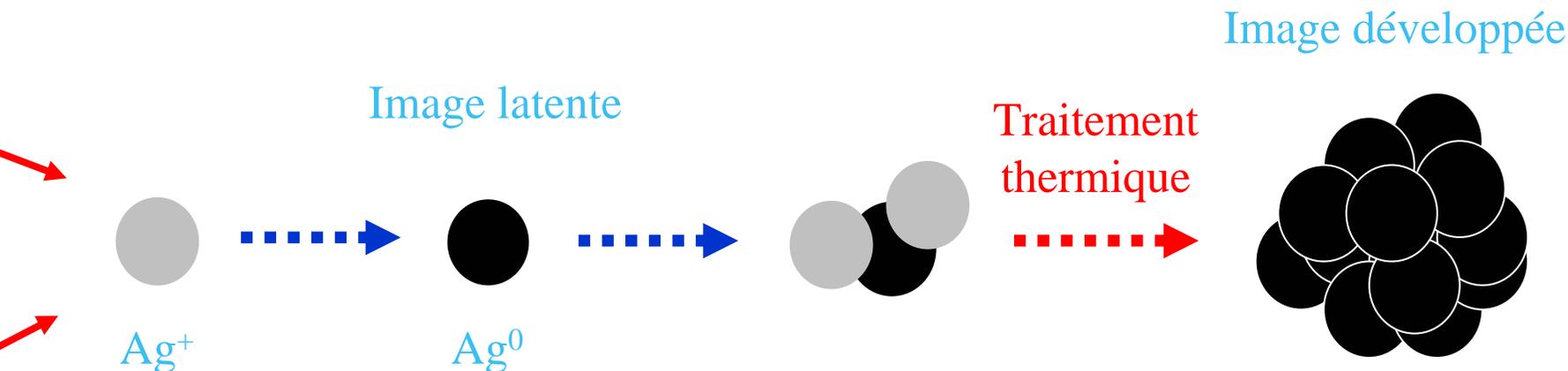
Ag<sub>2</sub>O: sensibilisateur.

Bande d'absorption @ 260 nm.

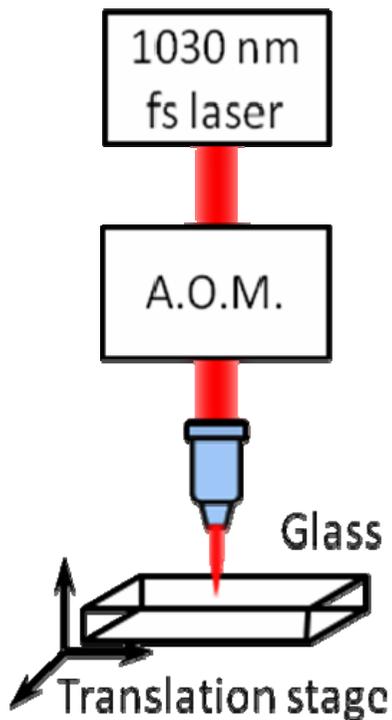
Bande d'émission @ 380 nm.

Fluorescence intrinsèque  
bleue. Excitation @ 254 nm

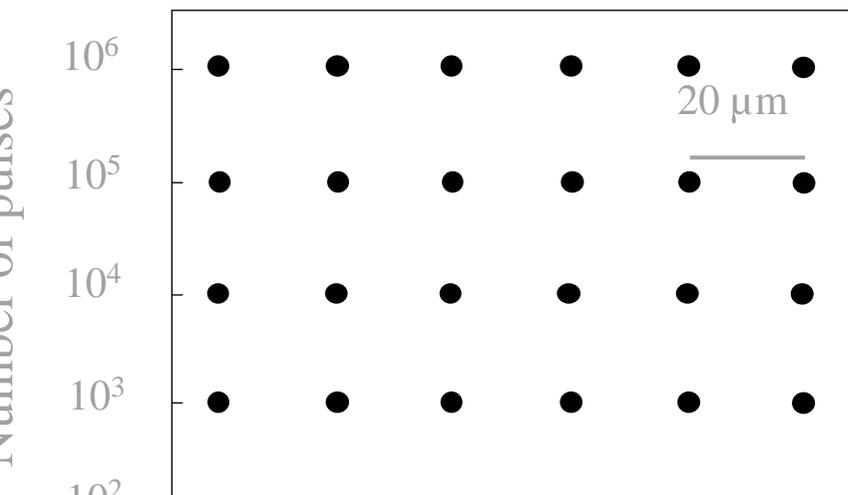
Interaction avec la lumière similaire au processus de photographie argentique → Photochimie



## Dispositif expérimental :



## Procédure expérimentale :



## • Laser :

Wavelength	1030 nm
Pulse width	500 fs
Repetition rate	10 MHz
Average power	6 W

## • Modulateur acousto-optique :

Number of pulses	10 <sup>2</sup> – 10 <sup>6</sup>
Irradiance	9 – 14 TW.cm <sup>-2</sup>

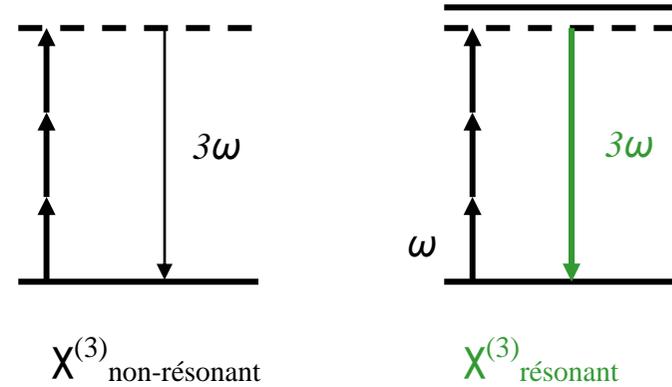
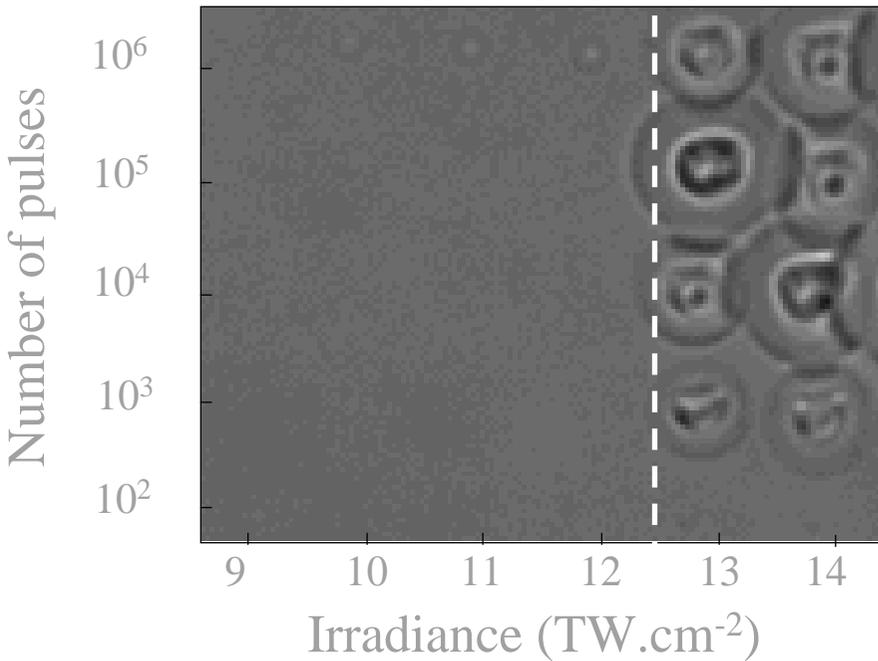
## • Optique de focalisation :

Reflection objective	36x NA=0.52
Beam diameter	1 μm

## • Platines de translation:

Range	25 mm
Speed	0 – 25 mm s <sup>-1</sup>

## Microscopie en lumière blanche :



Filtre passe bande



- Le **même laser** peut-être utilisé, mais à une **énergie moindre** ( $< 10$  nJ / pulse).

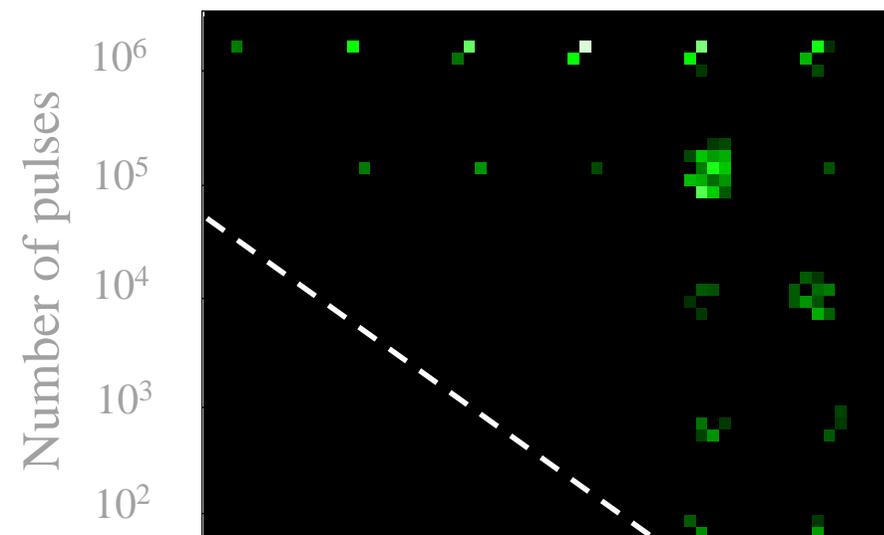
- Signal de GTH collecté par un **PMT** et un **filtre passe bande**.

- Mécanisme de contraste =  $\Delta\chi^{(3)}$   $\rightarrow$  Permet d'imager les **interfaces**.

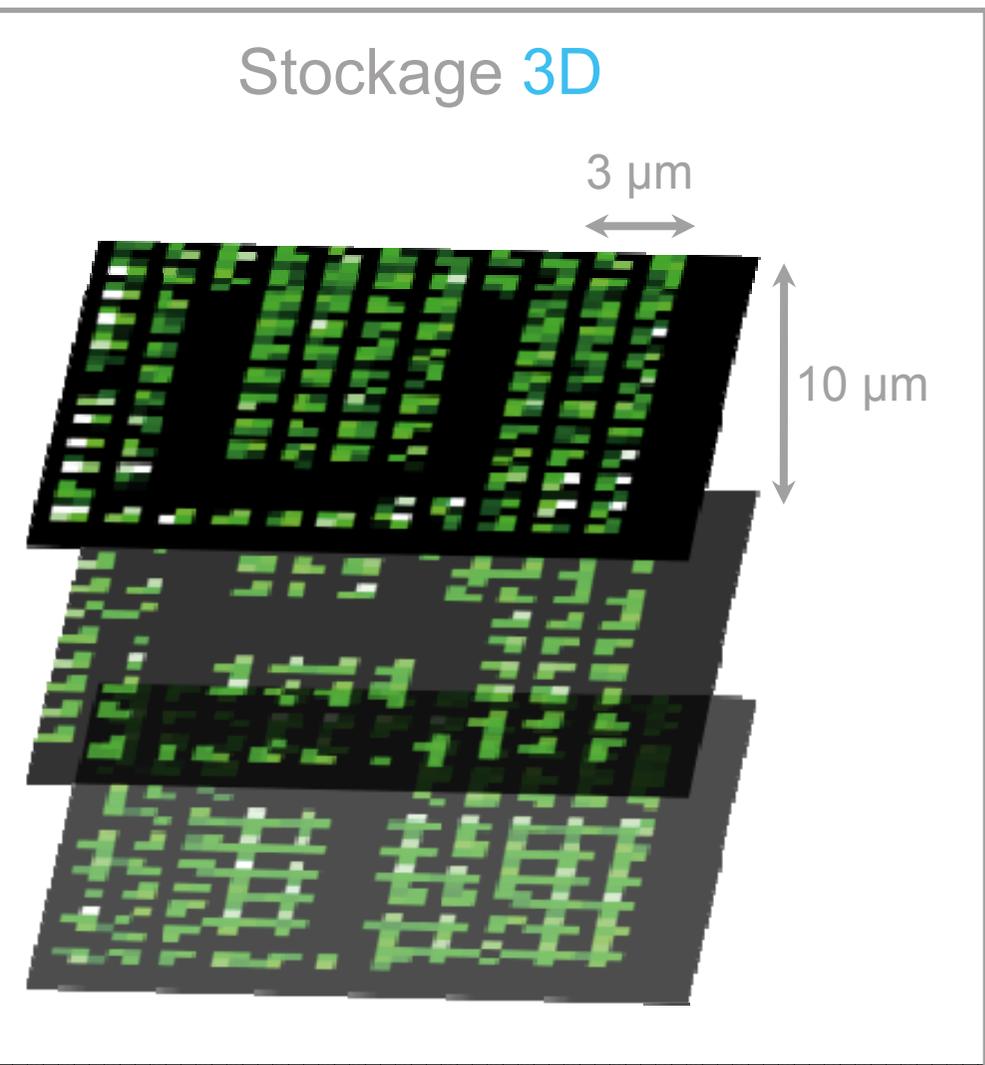
$$I_{3\omega} \propto \left| \chi_{irradiated}^{(3)} - \chi_{unirradiated}^{(3)} \right|^2$$

- Scanner le système mène à une **image en 2D** de  $\Delta\chi^{(3)}$ .

## Microscopie par GTH :

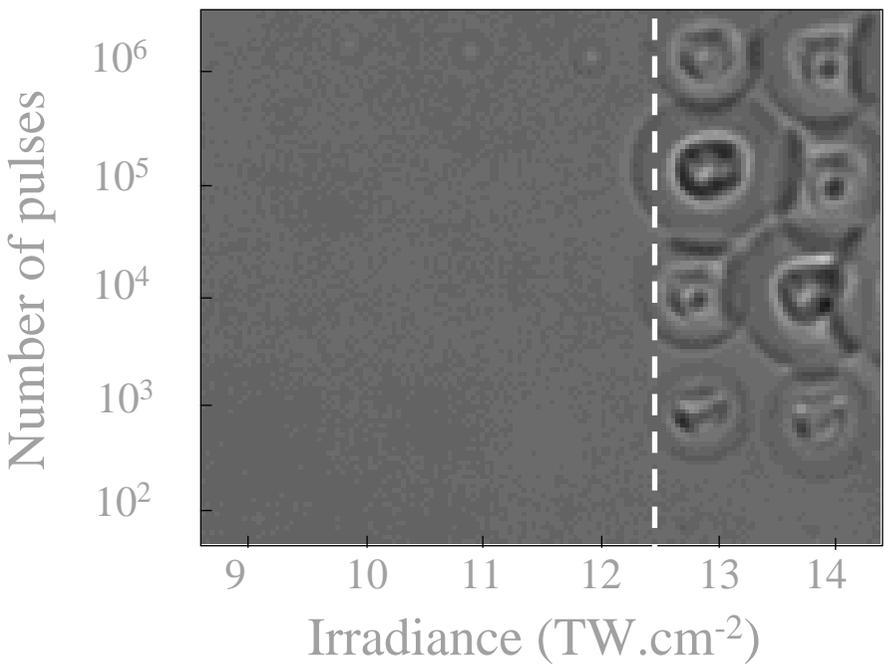


Pas de variation de  $n$  mais variation de  $\chi^{(3)}$   
avec une grande résolution spatiale.

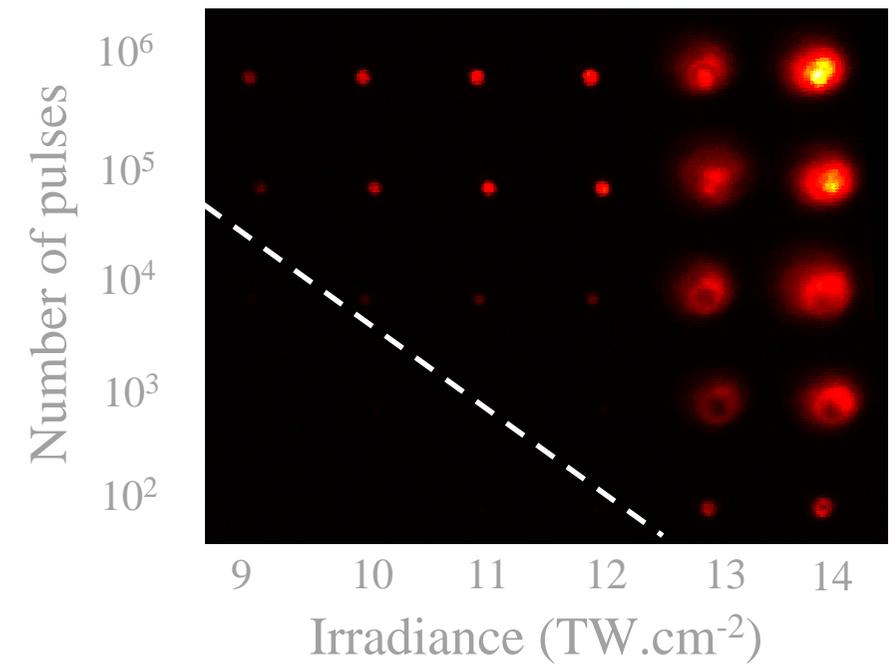


- Images inscrites dans le verre :
  - ▶ Taille : **12 × 12 pixels** (30  $\mu\text{m}$  × 30  $\mu\text{m}$ ).
  - ▶ Ecart entre pixels : **3  $\mu\text{m}$** . Diamètre pixel : **2  $\mu\text{m}$** .
  - ▶ Ecart entre couches : **10  $\mu\text{m}$** .
  - ▶ Capacité de stockage : **1 Gbits.cm<sup>-3</sup>**.
- Pas de diaphonie.
- Capacité de stockage élevée.
- Moyen élégant de stocker l'information.
- ☹ Nécessité d'un laser femtoseconde pour lire l'information.

## Microscopie en lumière blanche :



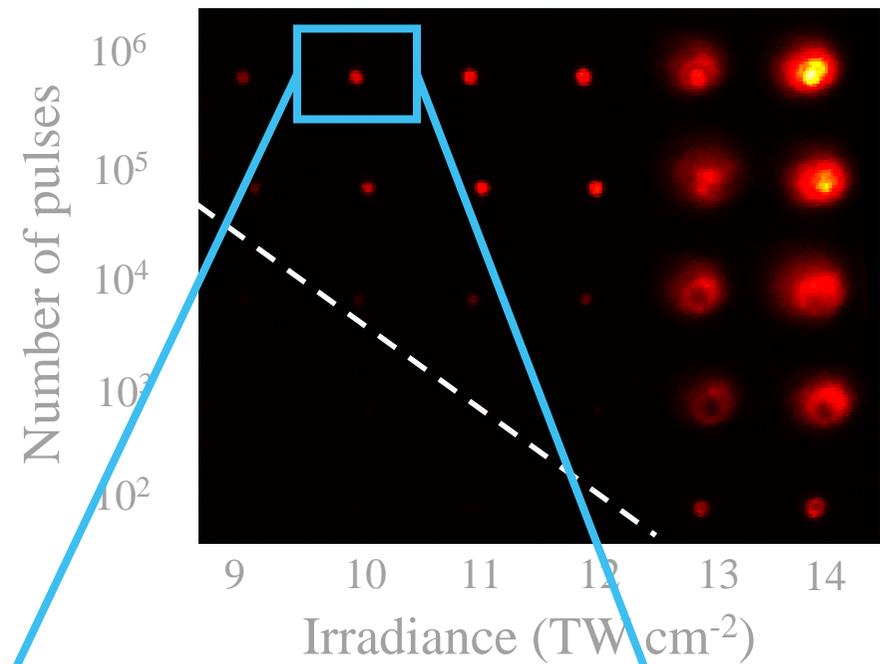
## • Microscopie confocale de fluorescence



réaction d'agrégats d'argent fluorescents, même où l'indice de réfraction n'a pas été modifié ( $\Delta n < 10^{-4}$ ).

## Réactions photochimiques :





- Fluorescence distribuée dans un **anneau** en 2D, un **tube** en 3D.
- Epaisseur de l'anneau :  $80 \text{ nm} \ll \lambda_{\text{laser}}$ .

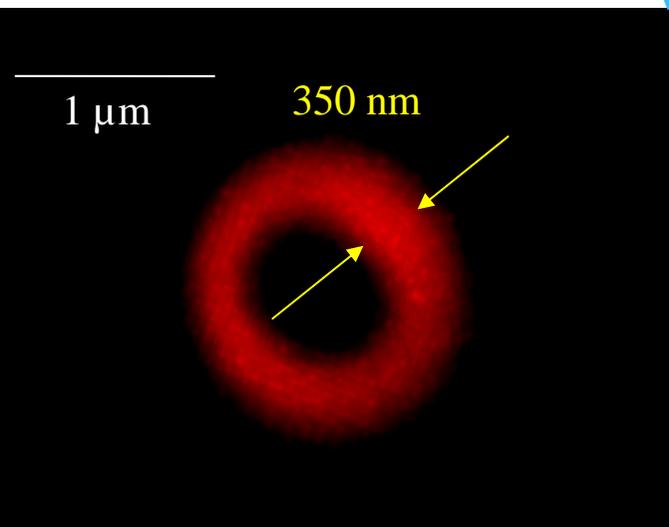


Image de fluorescence en 2D

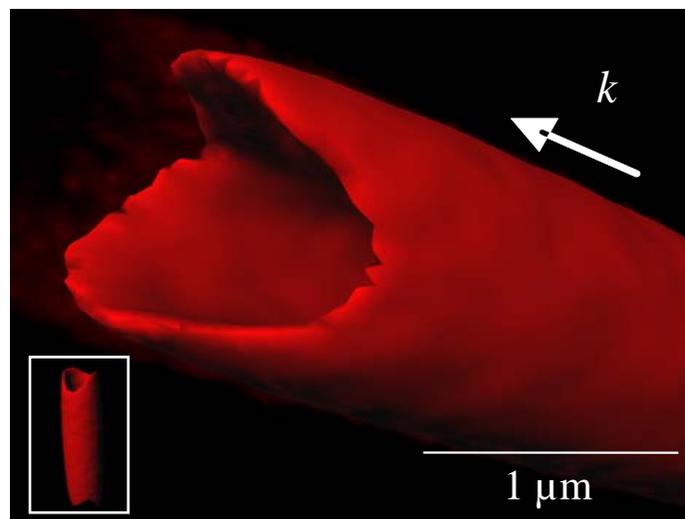


Image de fluorescence  
reconstruite en 3D

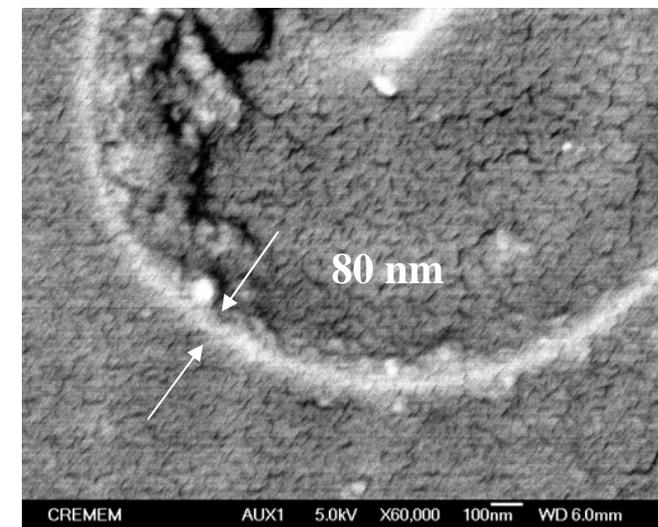
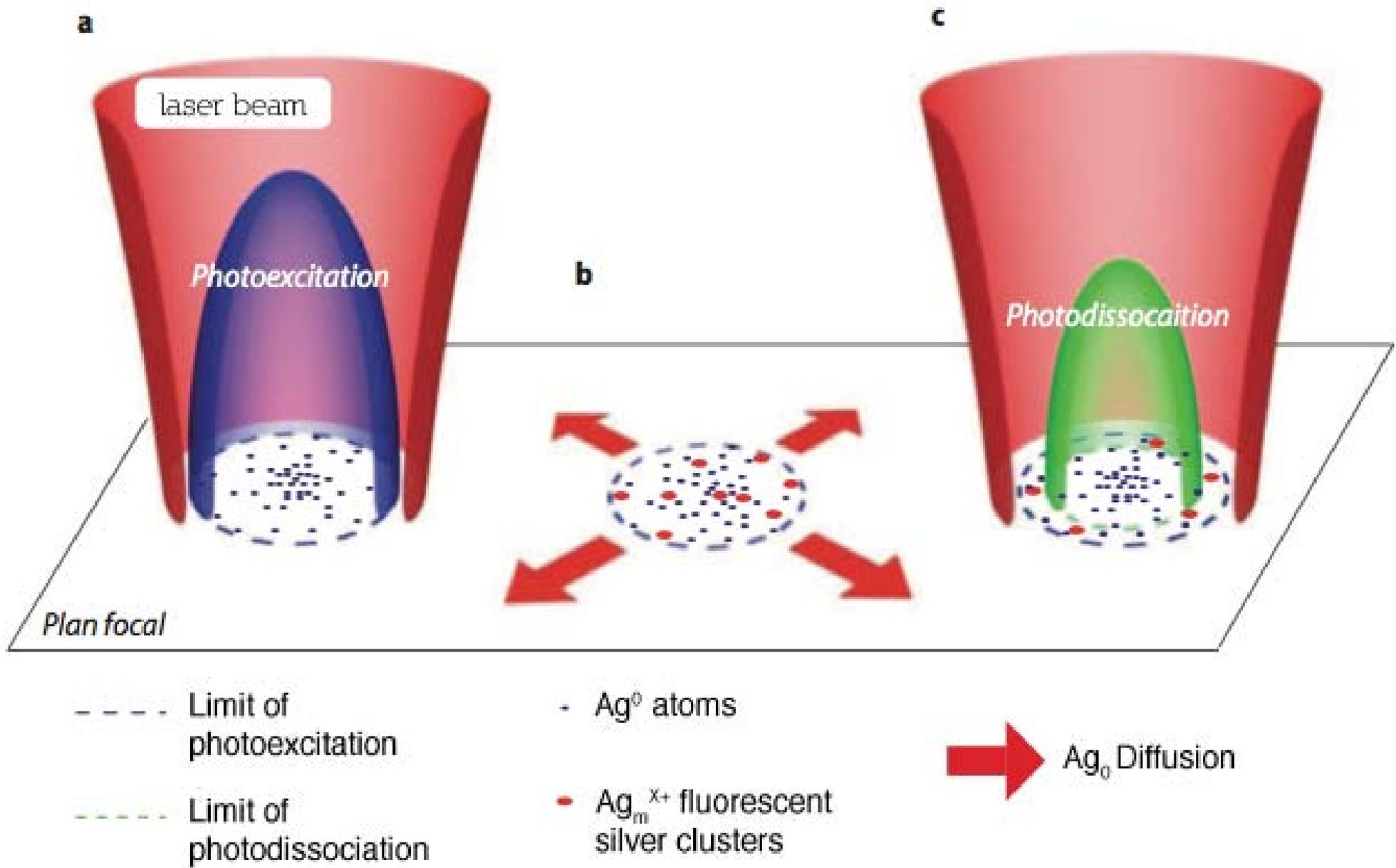


Image MEB



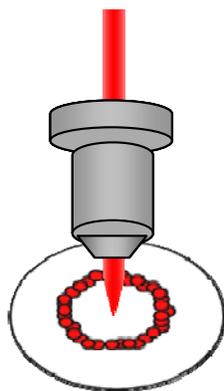
# un processus en 3 étapes



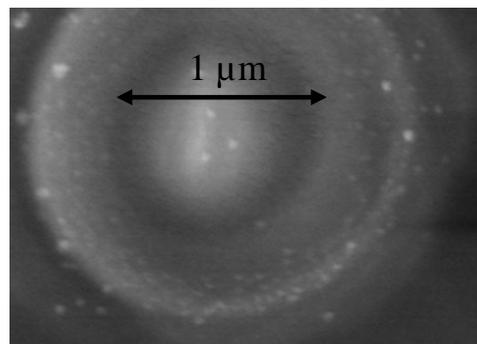
1) Photo-excitation → Génération d'électrons libres par absorption 4 photons.

2) Diffusion des électrons → Formation de clusters d'ions d'argent.

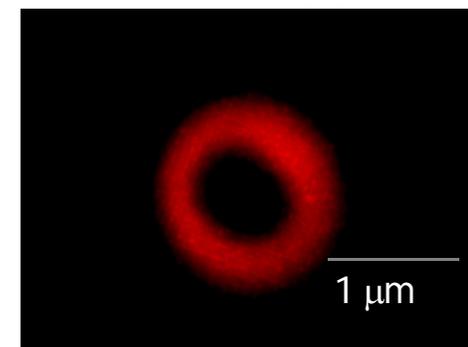
irradiation statique :



MEB-HR



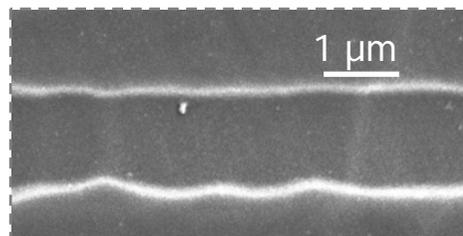
Fluorescence ( $\lambda_{exc}=405\text{ nm}$ )



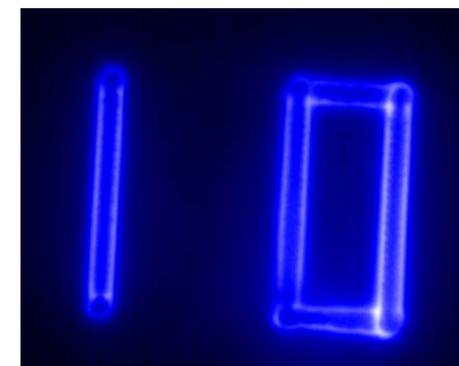
irradiation longitudinale :



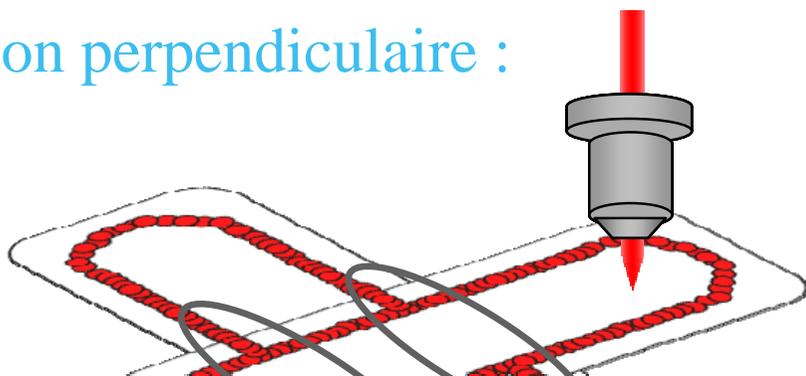
MEB-HR



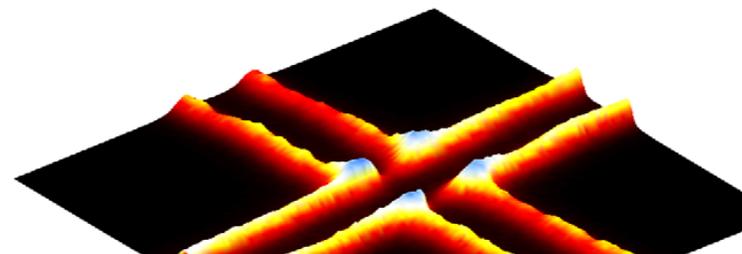
Fluorescence ( $\lambda_{exc}=405\text{ nm}$ )



irradiation perpendiculaire :



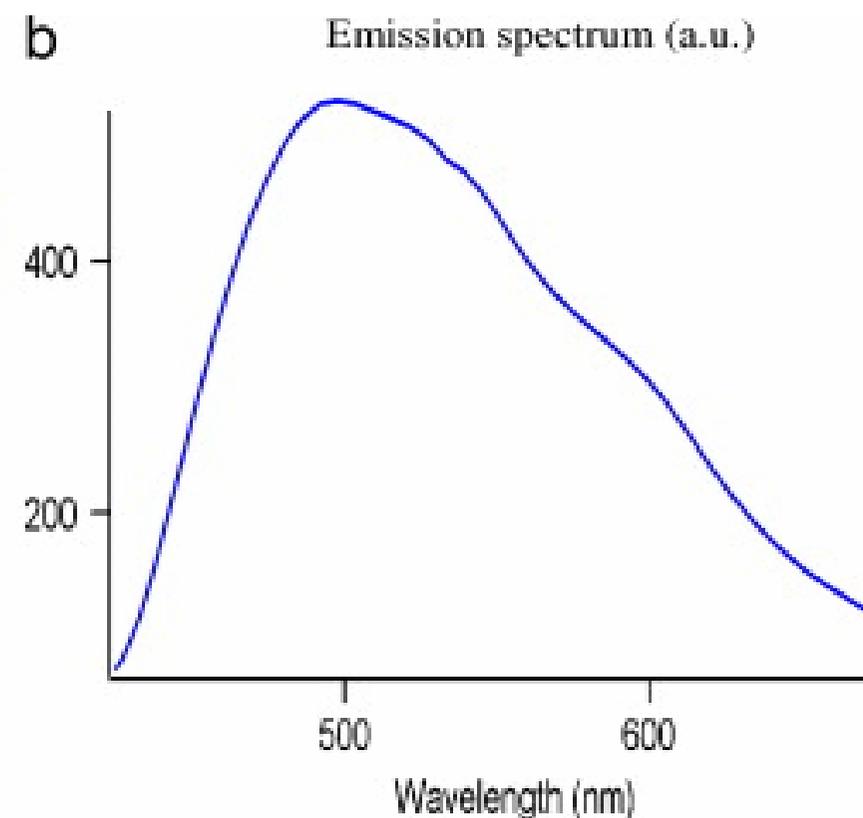
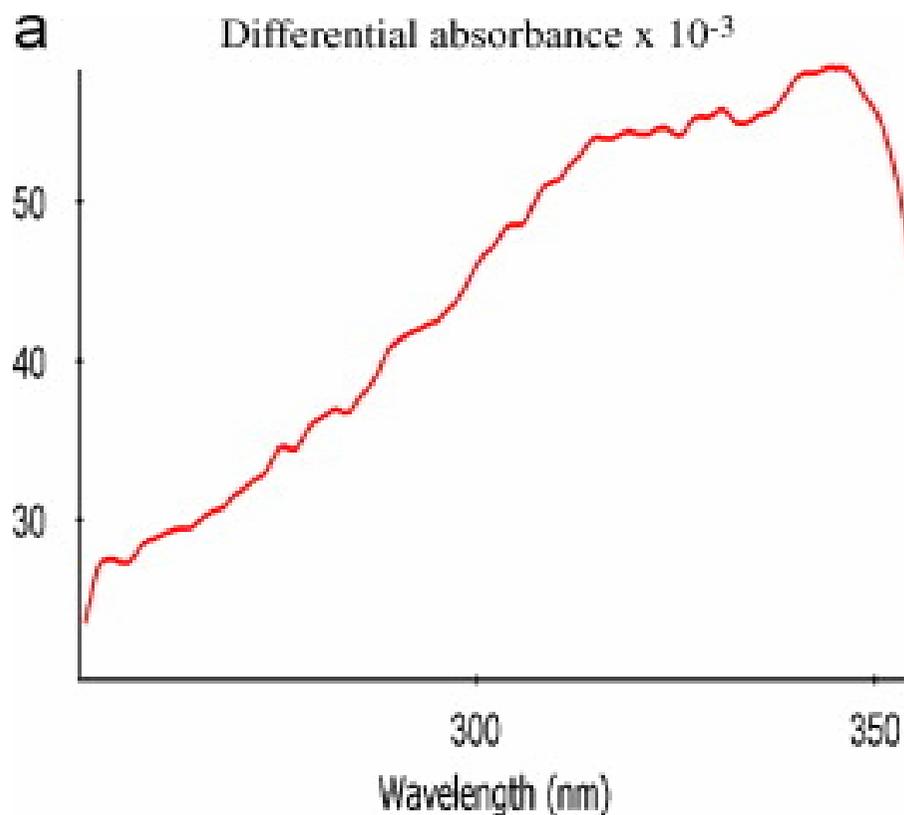
Fluorescence ( $\lambda_{exc}=405\text{ nm}$ )



réglage de la dose (fluence et/ou nombre d'impulsions)

Contrôle des propriétés de fluorescence :

- Spectre.
- Durée de vie.
- **Intensité.**

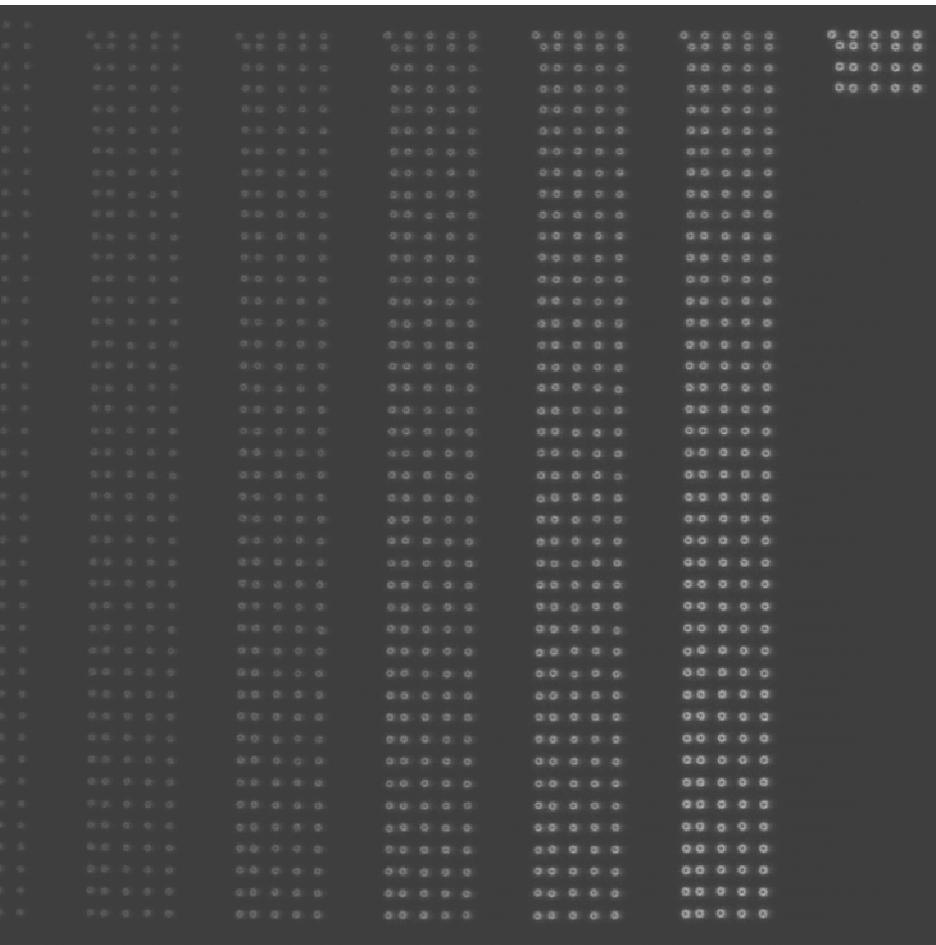


large absorption UV (de 200 à 420 nm).

large fluorescence blanche (de 400 à 800 nm).



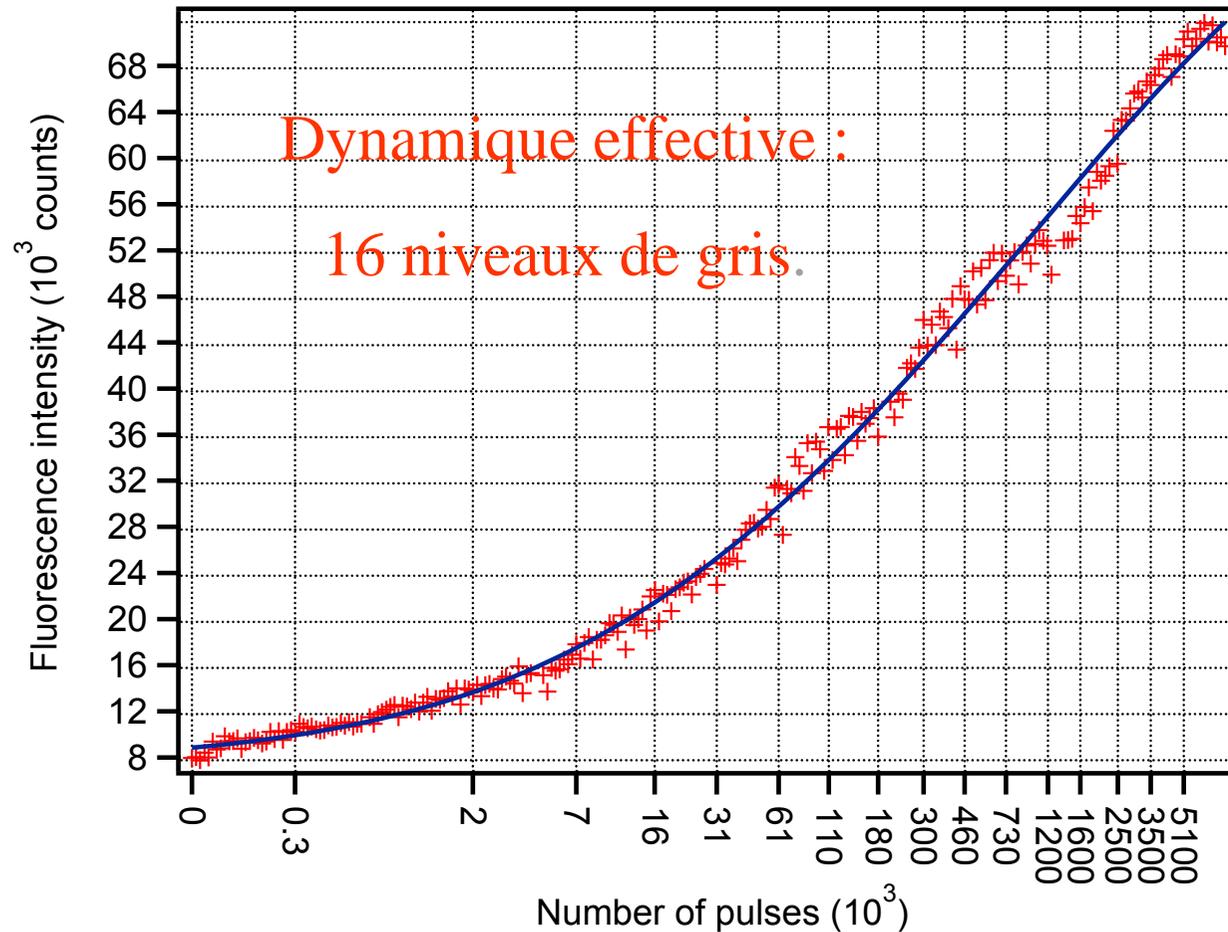
# : échelle de gris



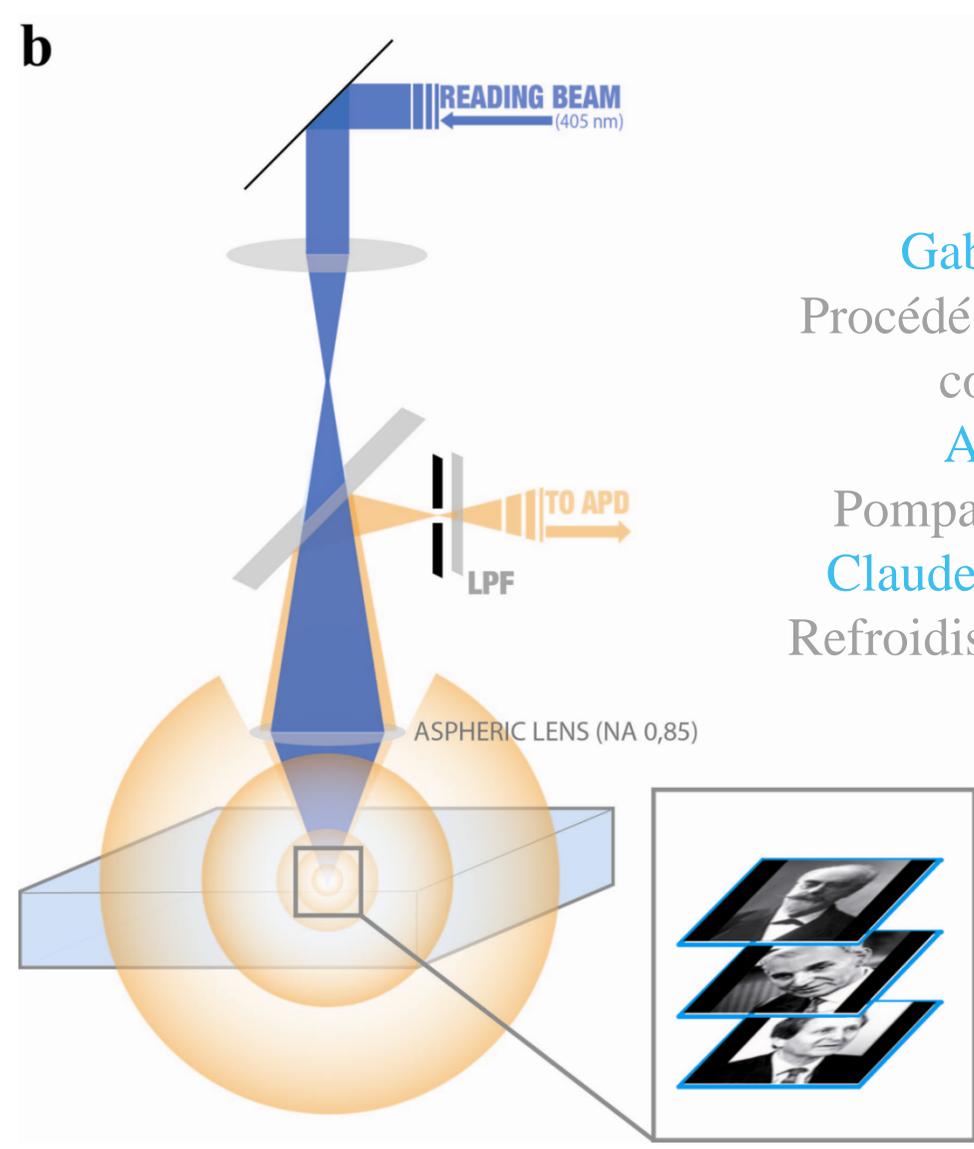
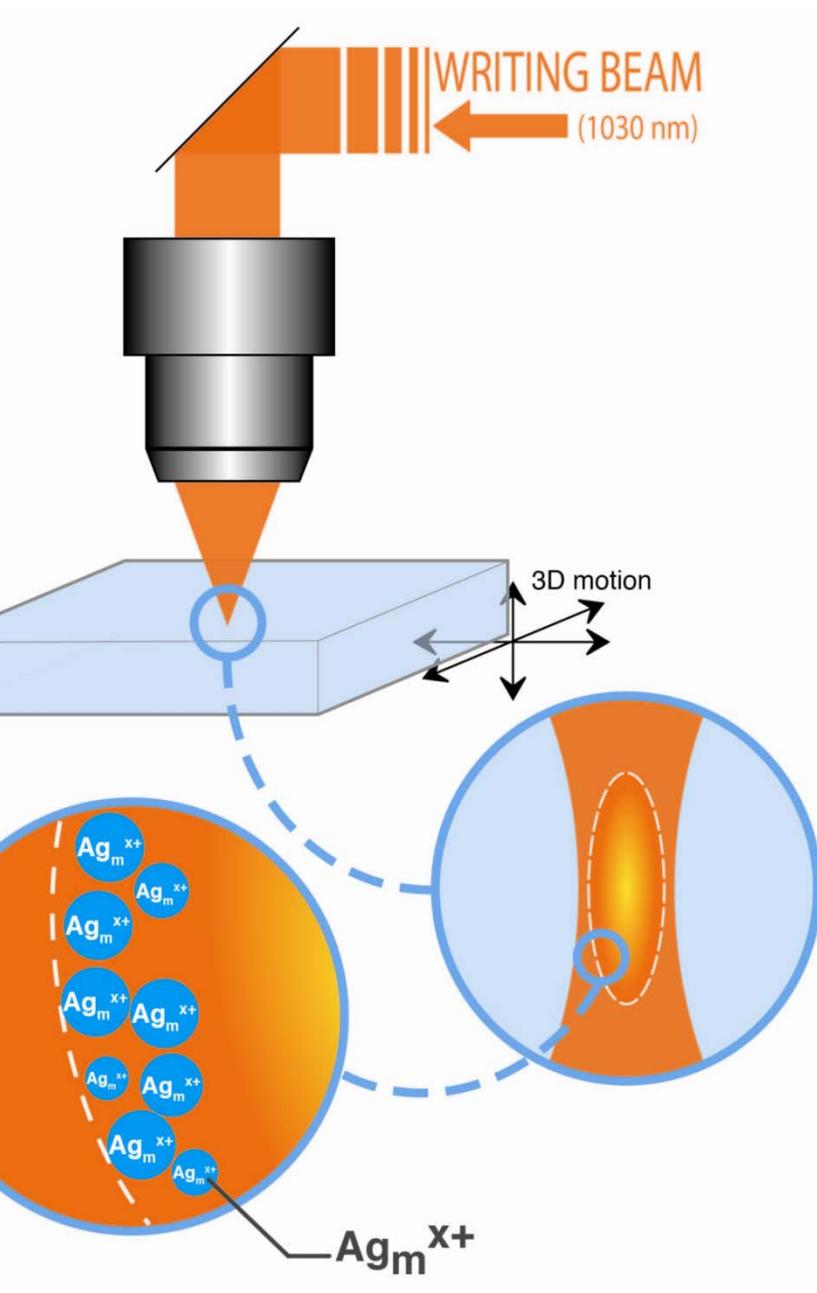
de fluorescence de 256 lignes de 5 iso-points.  
ce :  $5 \text{ J.cm}^{-2}$ . Nombre d'impulsions : de  $10^2$  à  $10^7$ .

- Limites :

- Stabilité du laser ( $< 1\%$ ).
- Homogénéité du matériau ( $\approx 1\%$ )



Intensité de fluorescence vs nombre d'impulsions et valeurs associées.

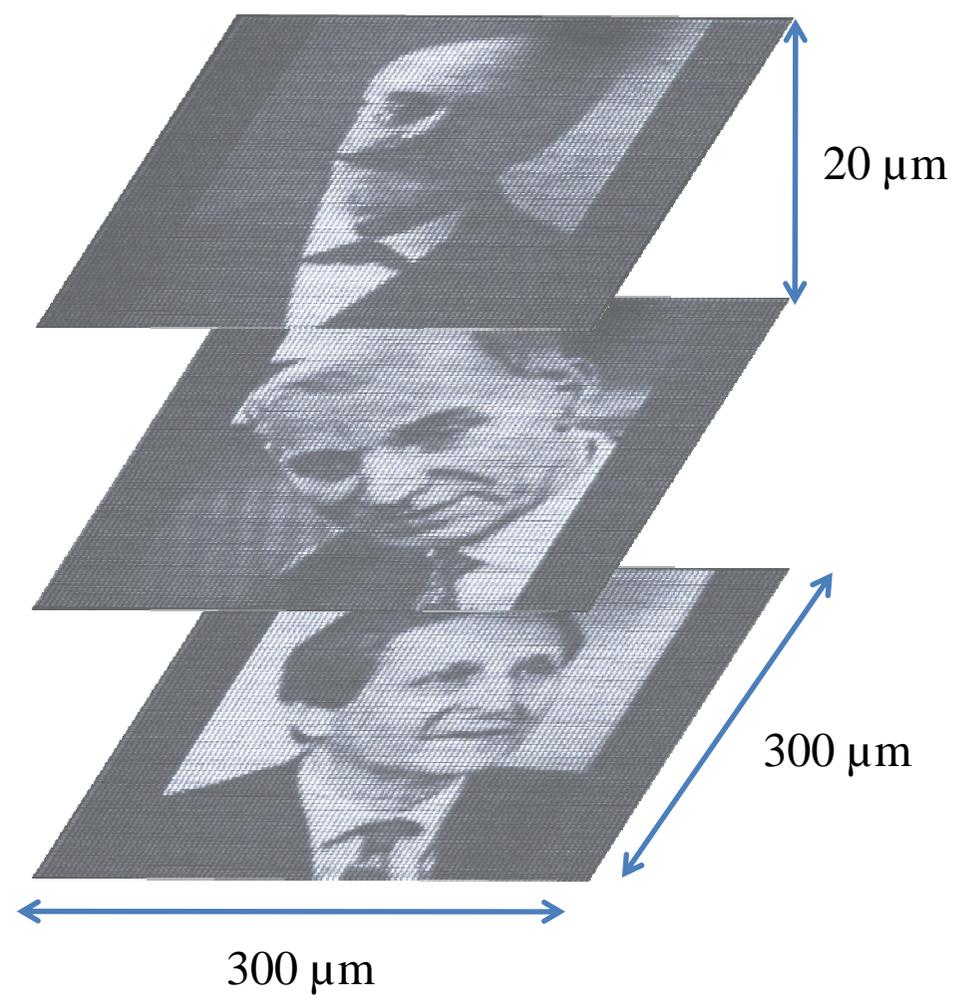


- Gabriel Lippmann
- Procédé de photographie couleur (1908)
- Alfred Kastler
- Pompage optique (1958)
- Claude Cohen-Tannoudji
- Refroidissement laser (1985)

## Images d'origine JPEG :

Taille : **100 × 100 pixels**.

Dynamique d'encodage : **8 bits (256 niveaux)**.



- Pas de diaphonie.

- Pas de photo blanchiment

- Images inscrites dans le verre :

- ▶ Taille : **100 × 100 pixels** (300 μm × 300 μm).

- ▶ Ecart entre pixels : **3 μm**. Diamètre pixel : **2 μm**.

- ▶ Ecart entre couches : **20 μm**.

- ▶ Dynamique effective : **4 bits (16 niveaux de gris)**.

- ▶ Capacité de stockage : **20 Gbits.cm<sup>-3</sup>**.

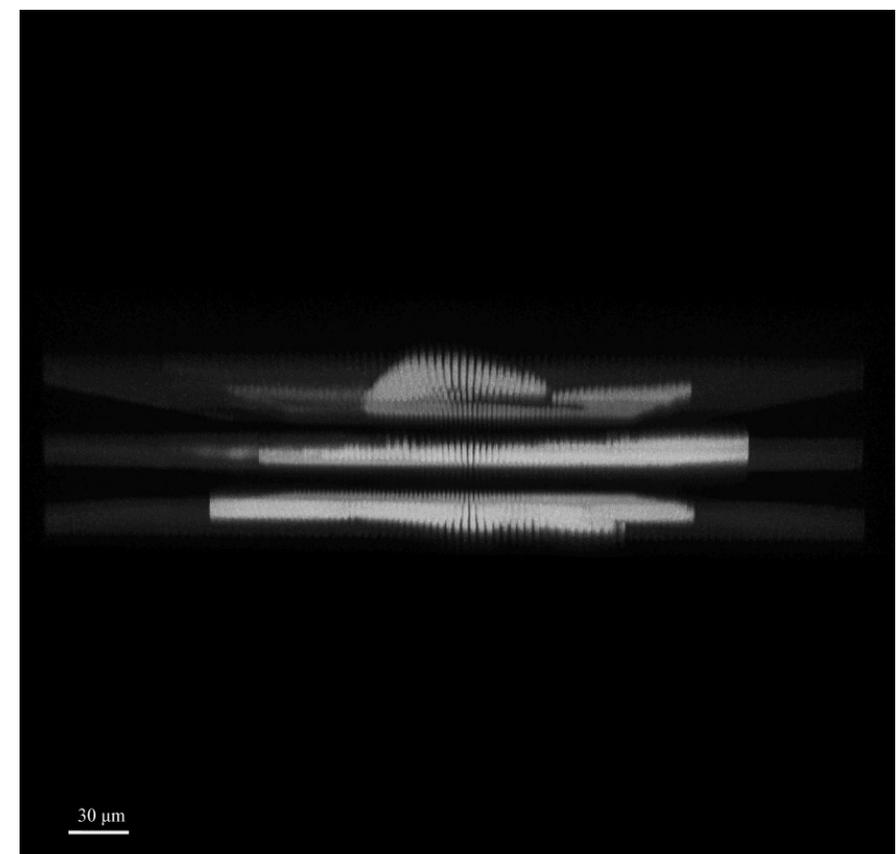




Image d'origine.

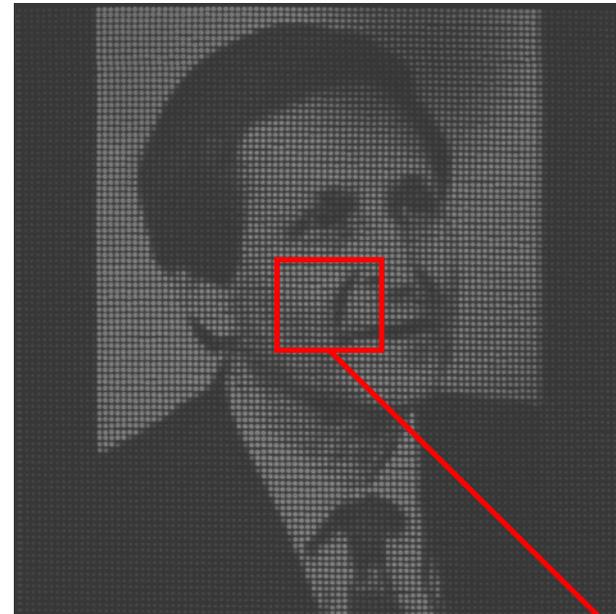


Image inscrite vue par microscopie confocale de fluorescence.

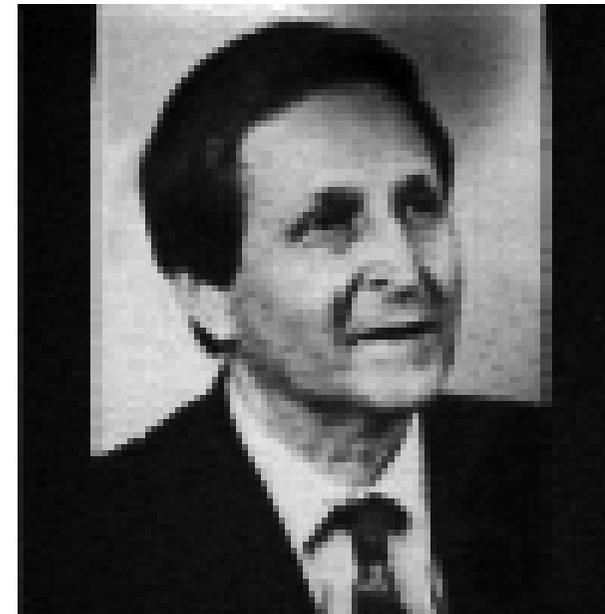
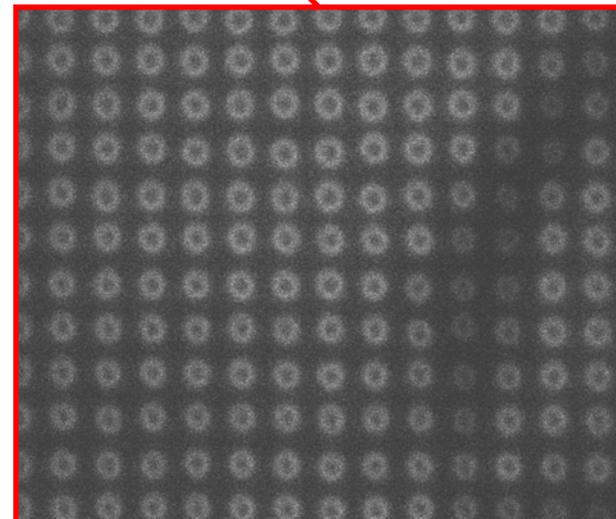


Image décodée affichée sur 256 niveaux.

Reconstruction précise des données.

Mais pixellisation à cause de la dynamique plus faible.

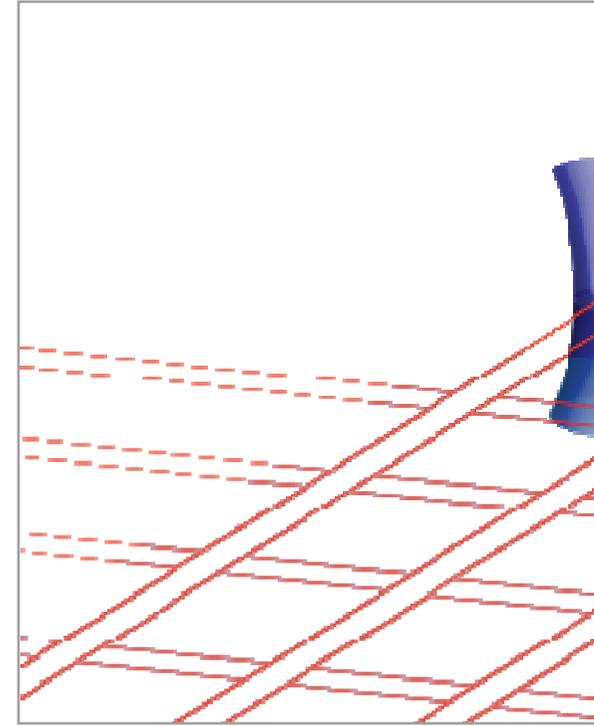




# (Fluorescent Multilayer Disk)

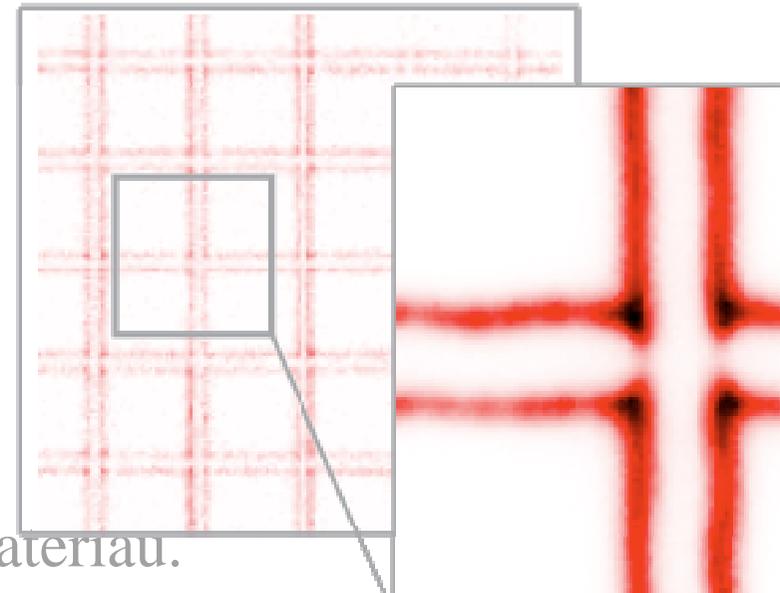
## Avantages:

- Disponibilité commerciale du lecteur (Blu-ray).
- Capacité de stockage élevée ( $\sim 100 \text{ Tbits.cm}^{-3}$ ).
- Pas de diaphonie entre les couches ( $\Delta n < 10^{-4}$ ).
- Pas de photo-blanchiment (agrégats stables dans la matrice).
- Vitesse de lecture élevée ( $\sim 500 \text{ Mbits.s}^{-1}$ ).
- Tolérance au vieillissement (les verres ne changent pas au cours du temps), à la température ( $< 350^\circ\text{C}$ ) et à l'humidité (faible solubilité,  $1 \mu\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ).



## Améliorations :

- Vitesse d'écriture
  - laser plus puissant et masques de phase.
- Dynamique d'encodage
  - longueur d'onde du laser de lecture / homogénéité du matériau.





PICS Grant 3179



Grant ANR-05-BLAN  
0212-01



GIS AMA



UNIVERSITÉ DE  
BORDEAUX

