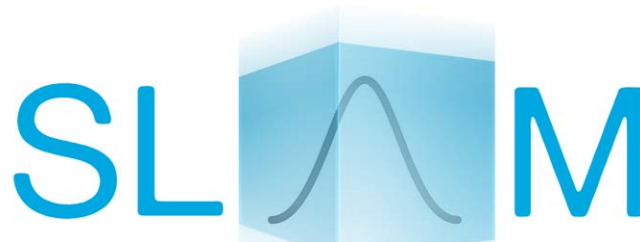


Le stockage de données pérenne dans les verres : mythe ou réalité ?

*A. Royon¹, K. Bourhis², G. Papon¹,
Y. Deshayes³, T. Cardinal², et L. Canioni¹*
CPMOH-CNRS / Université de Bordeaux, France
ICMCB-CNRS / Université de Bordeaux, France
IMS-CNRS / Université de Bordeaux, France

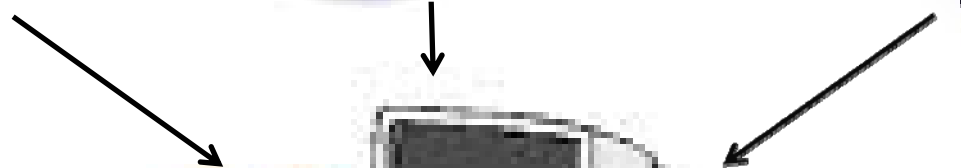
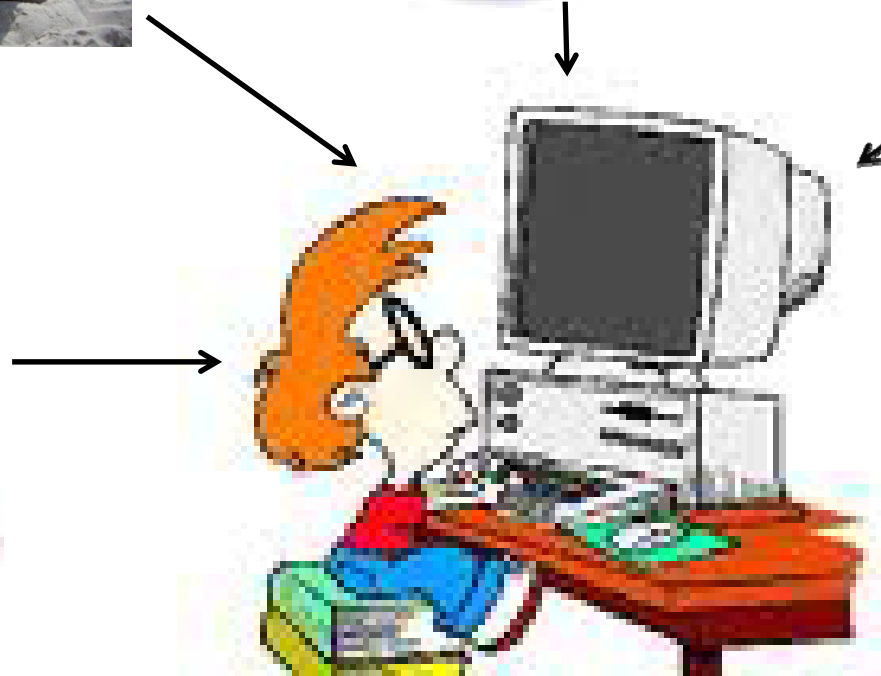
GDR Verres
25/11/2010



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.



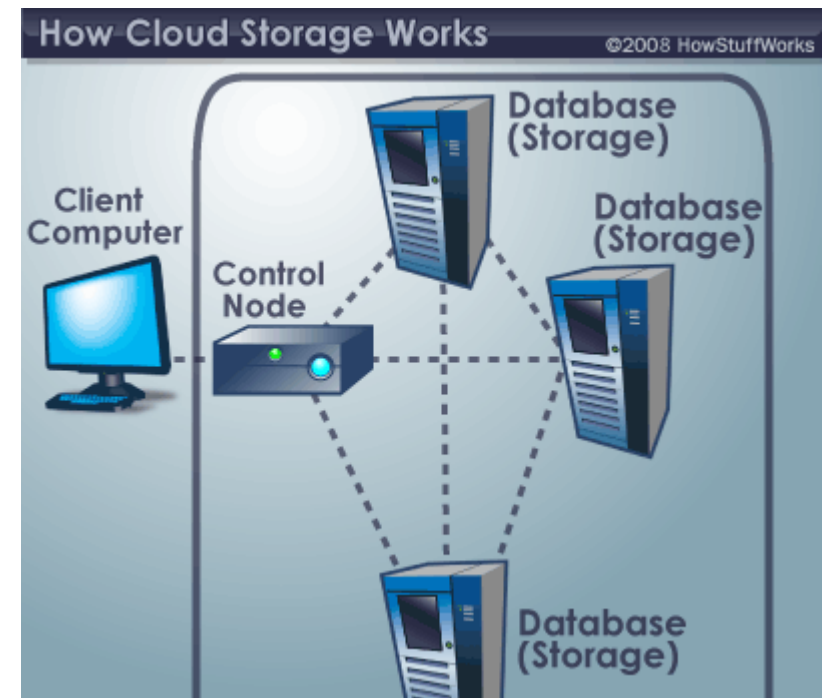
Disque dur et clé USB :

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



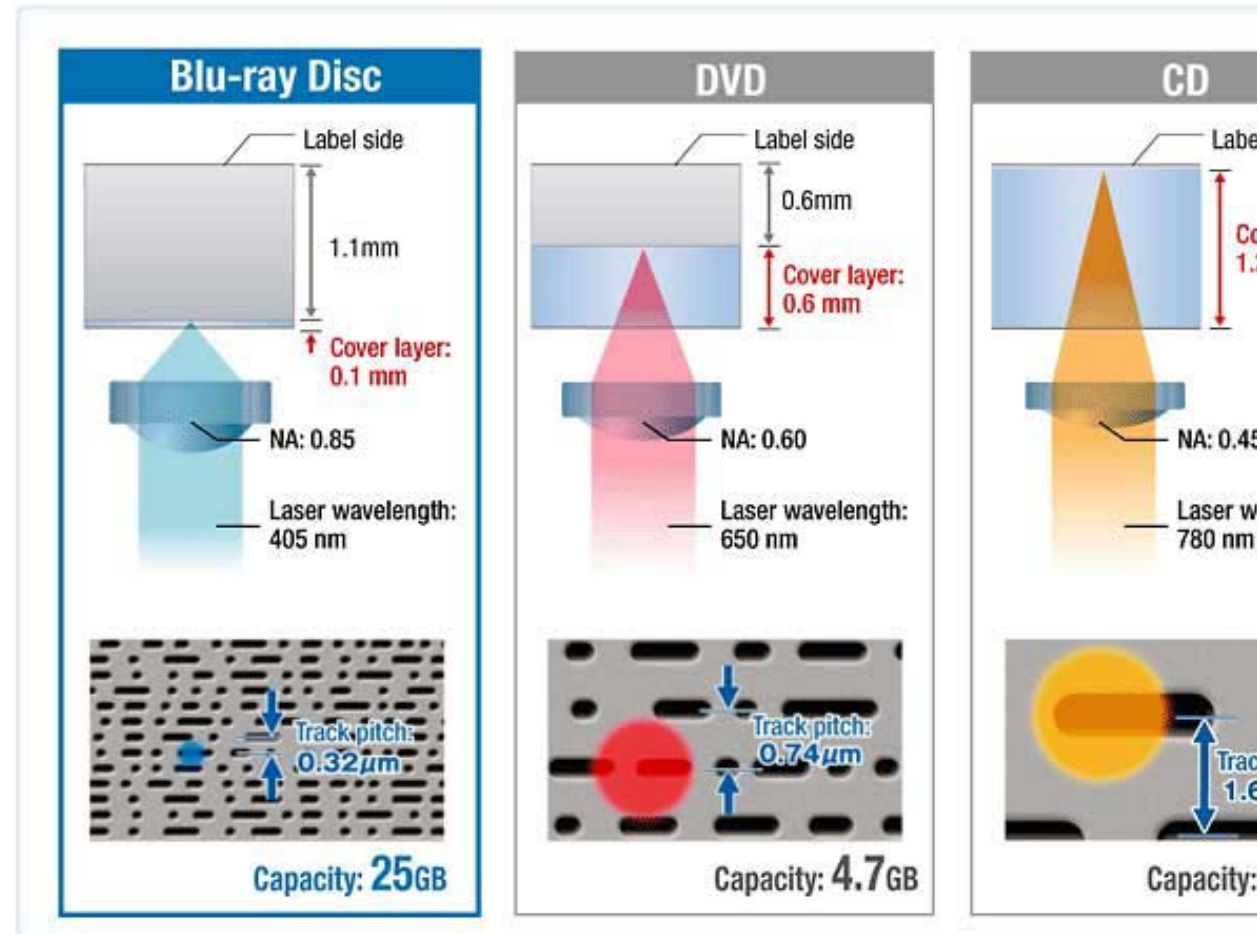
Stockage en réseau :

- ☺ 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)

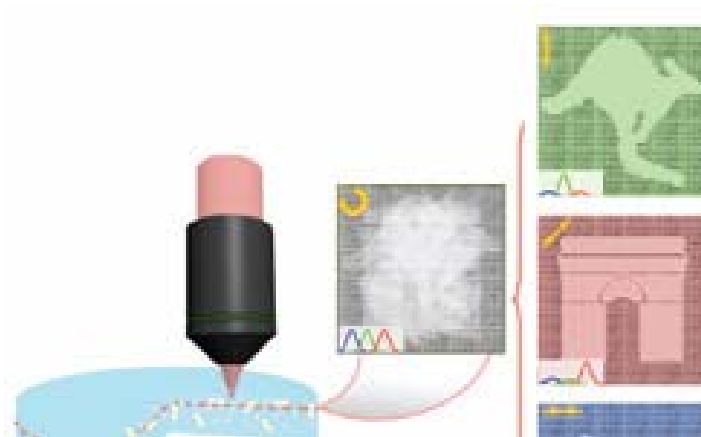
Point par point par absorption multi-photonique :

- ☺ 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





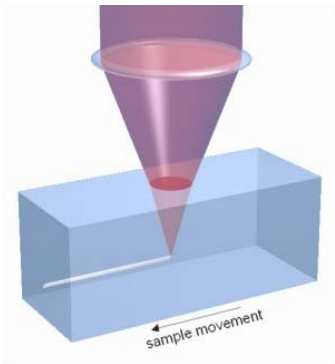
de matériaux transparents

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

Possibilité de fabriquer des motifs en 3D.

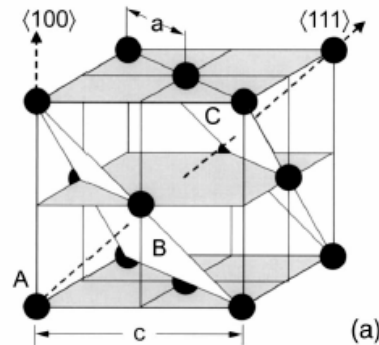
Utilisée pour de nombreuses applications.

Guides d'onde

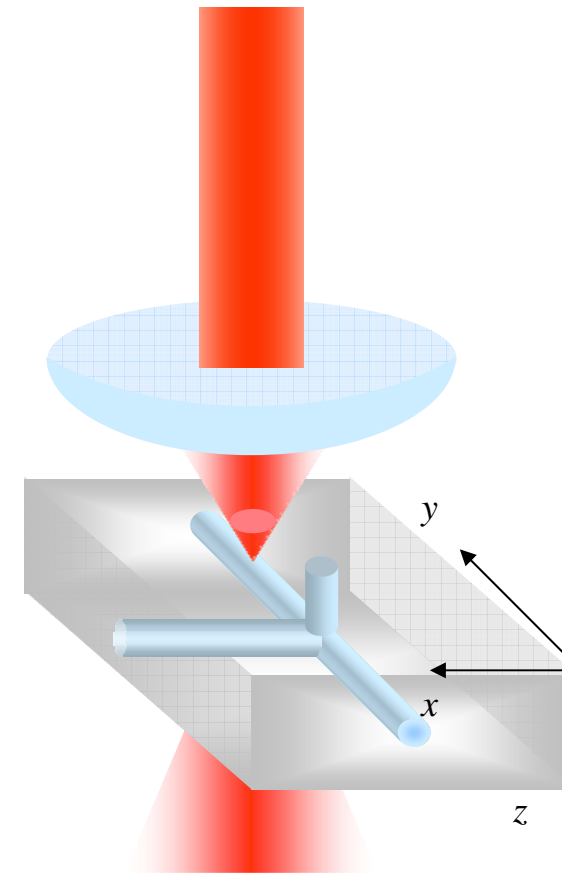


Davis *et al.*, Opt. Lett. **21**, 1729-1731 (1996).

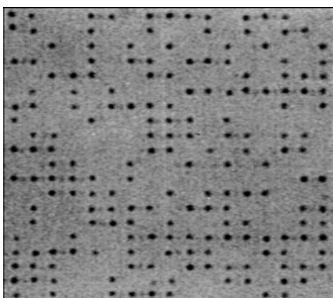
Cristaux photoniques



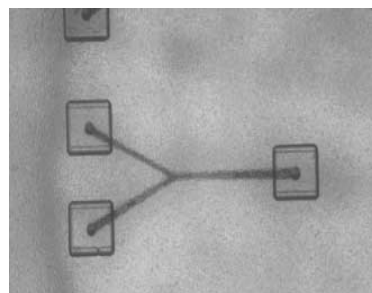
Sun *et al.*, Opt. Lett. **26**, 325-327 (2001).



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.

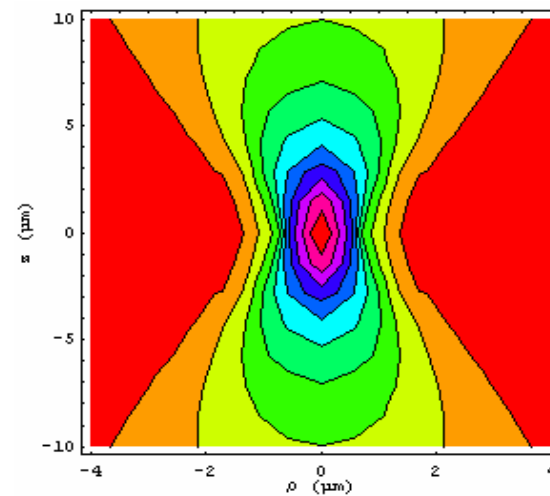
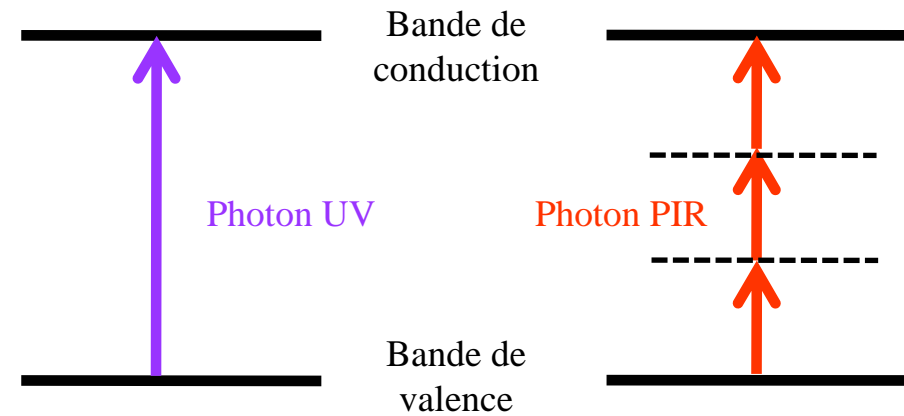
Cadence élevée :

Accumulation d'énergie.

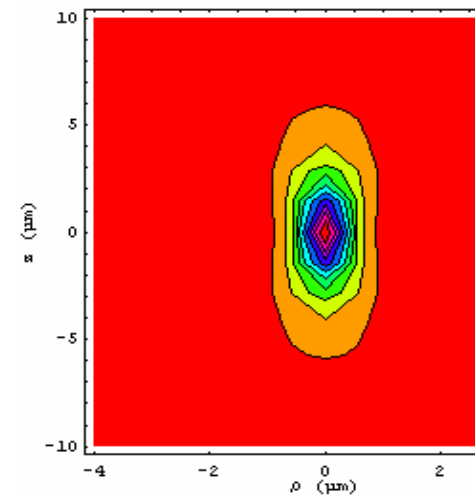
Effets thermiques cumulés.

Absorption non-linéaire.

Absence d'effet thermique.



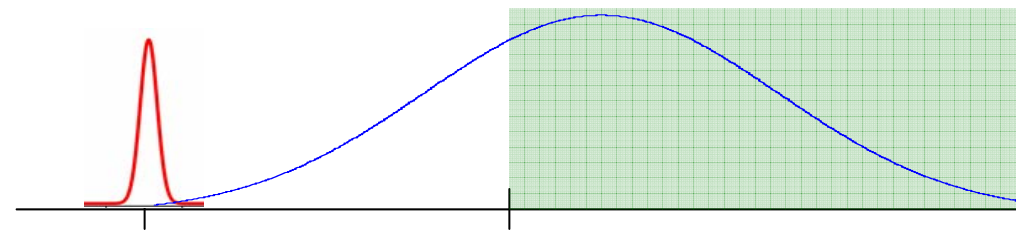
Absorption linéaire



Absorption à 3 photons

Impulsion fs

Impulsion ns



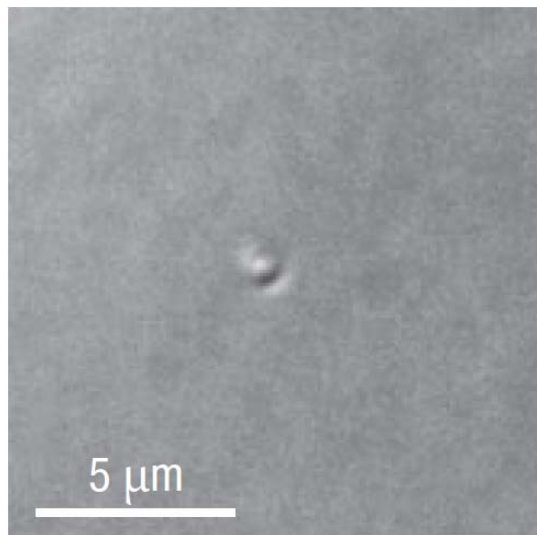


Différents **types de réponse** suivant l'énergie du laser.

Dans le cas de la **silice** :

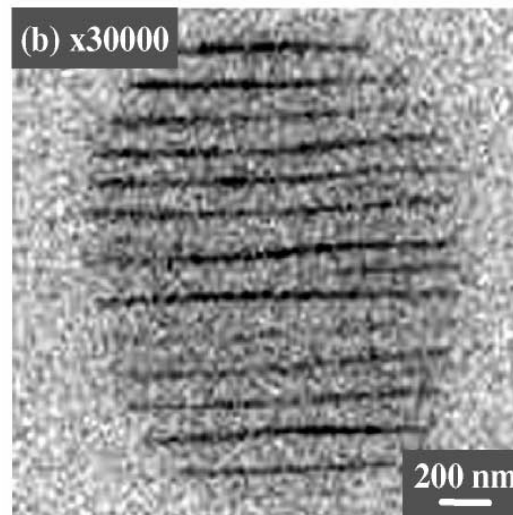
- **Isotrope (type 1)** : guides d'onde, coupleurs...
- **Biréfringent (type 2)** : contrôleurs de polarisation...
- **Micro-cavité (type 3)** : mémoires, cristaux photoniques...

Type 1



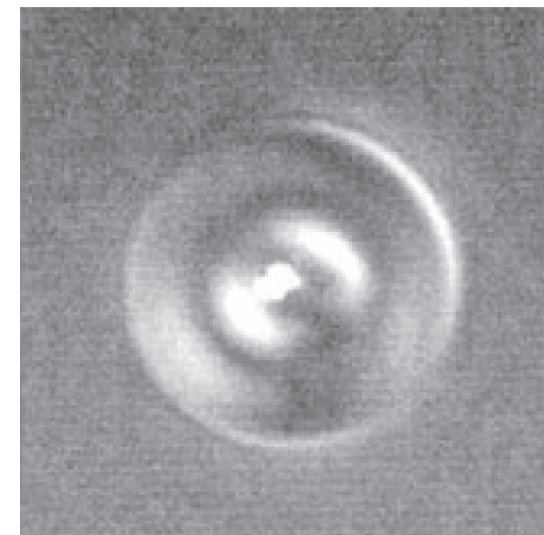
Gattas and Mazur, Nature

Type 2



Shimotsuma *et al.*, Phys.

Type 3



Gattas and Mazur, Nature

Micro-cavités (type 3) :

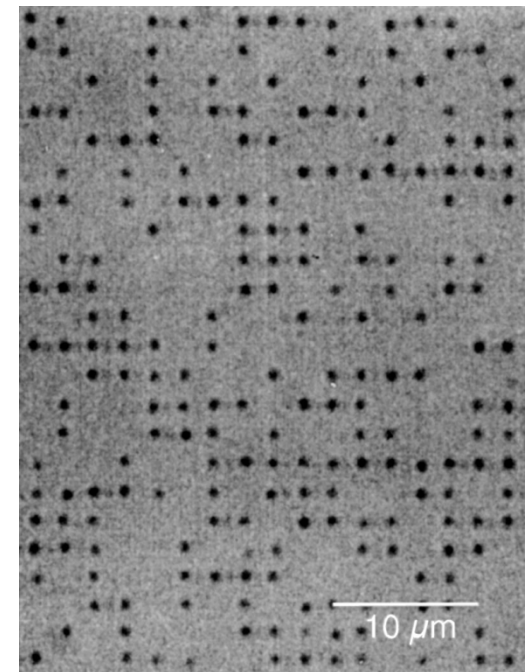
Glezer *et al.*, Opt. Lett. **21**,
2023-2025 (1996).

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) :

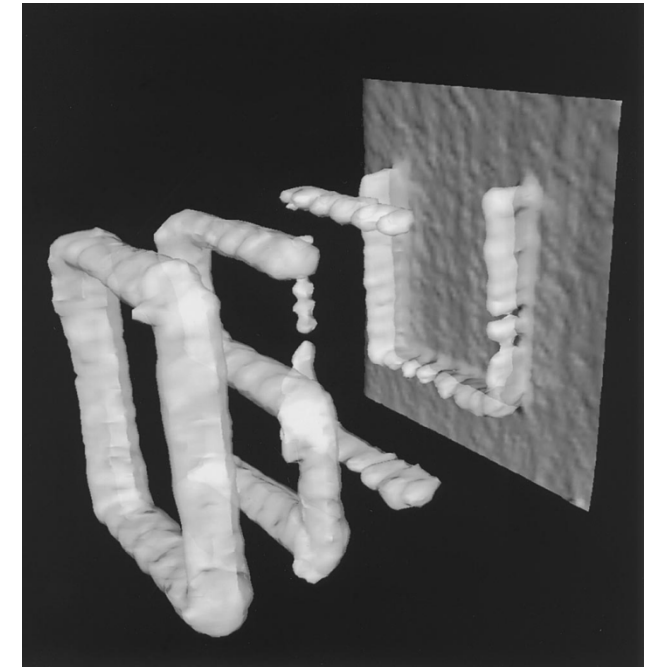
Squier and Müller, *App. Opt.*
38, 5789-5794 (1999).

Capacité de stockage élevée (~ 1 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) :

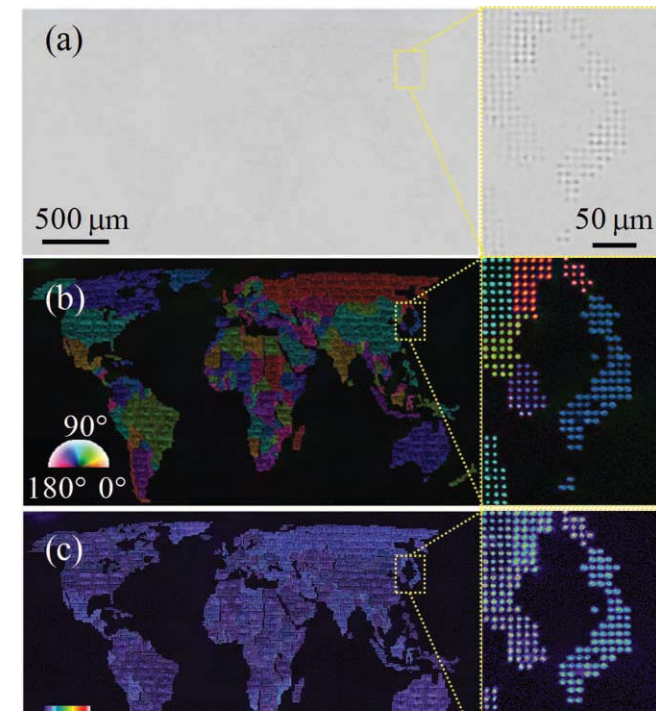
Shimotsuma *et al.*, *Adv. Mat.*
22, 4039-4043 (2010).

Capacité de stockage élevée (~ 300 Gbits.cm⁻³).

Ecriture = laser femtoseconde / Lecture = CCD +
polariseurs.

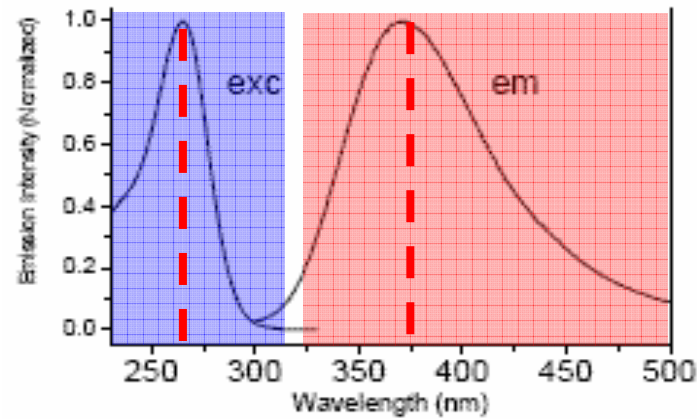
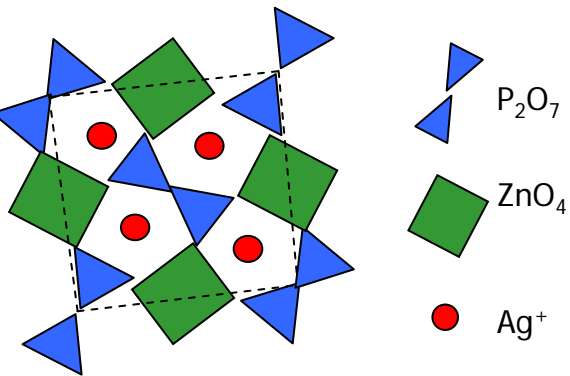
3 dimensions de l'espace + direction de l'axe lent +
retard = 5D.

☹ Diaphonie entre les couches (modification de



(FPL)

Composition chimique : 55% ZnO – 40% P₂O₅ – x% Ga₂O₃ – (5-x)% Ag₂O.



ZnO – P₂O₅: matrice vitreuse.

Ga₂O₃: stabilisateur.

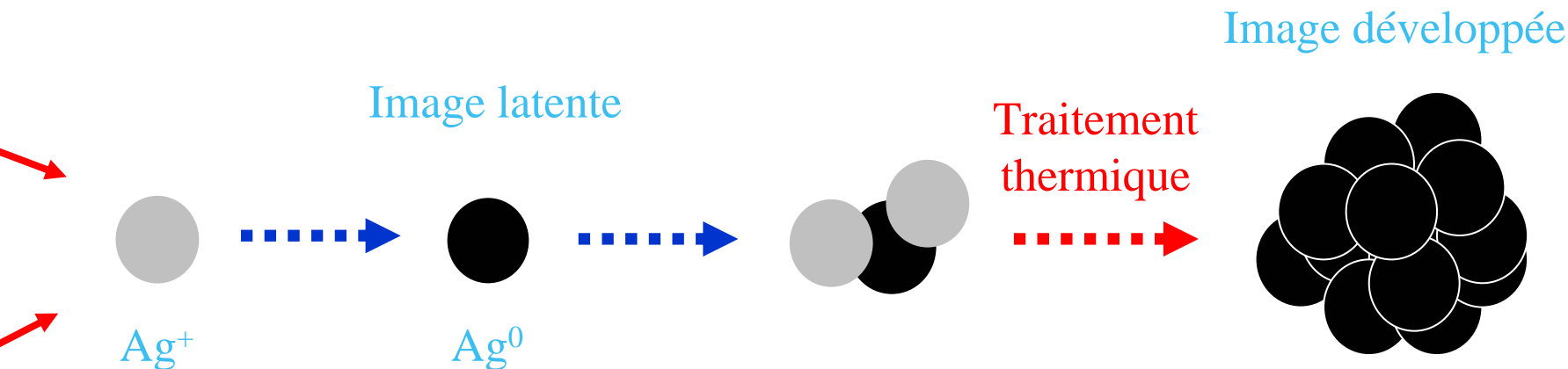
Ag₂O: sensibilisateur.

Bande d'absorption @ 260 nm.

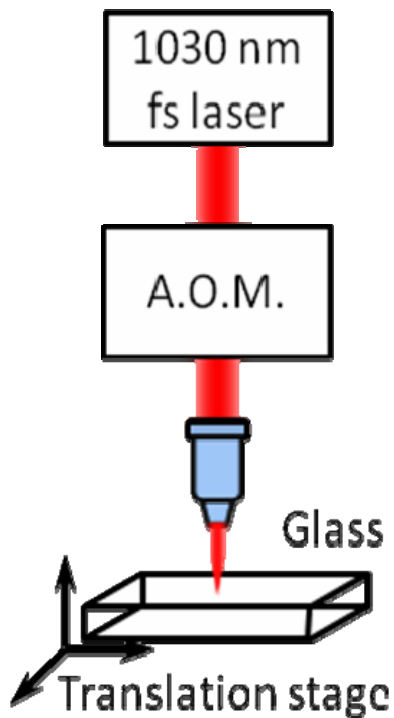
Bande d'émission @ 380 nm.

Fluorescence intrinsèque
bleue. Excitation @ 254 nm

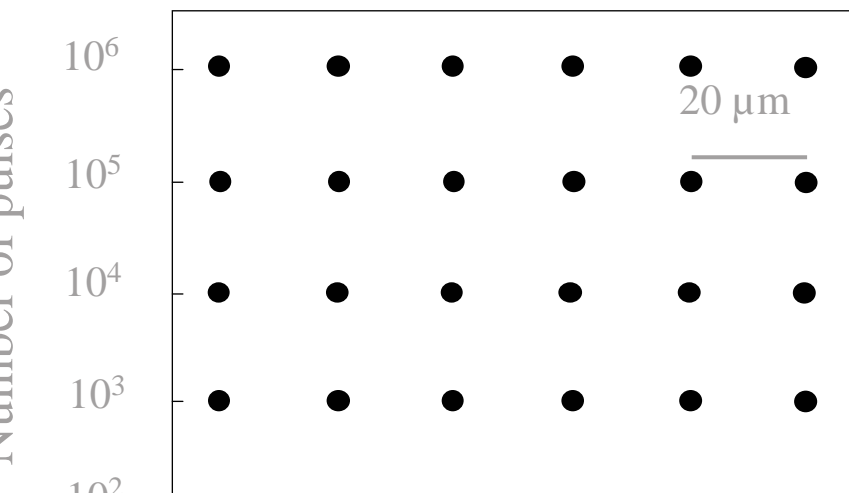
Interaction avec la lumière similaire au processus de photographie argentique → Photochimie



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 ² – 10 ⁶
Irradiance	9 – 14 TW.cm ⁻²

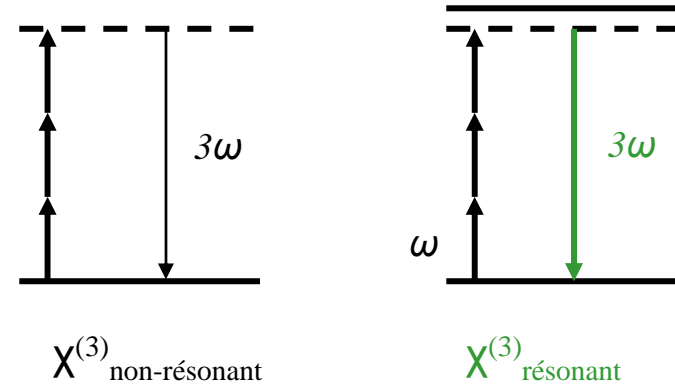
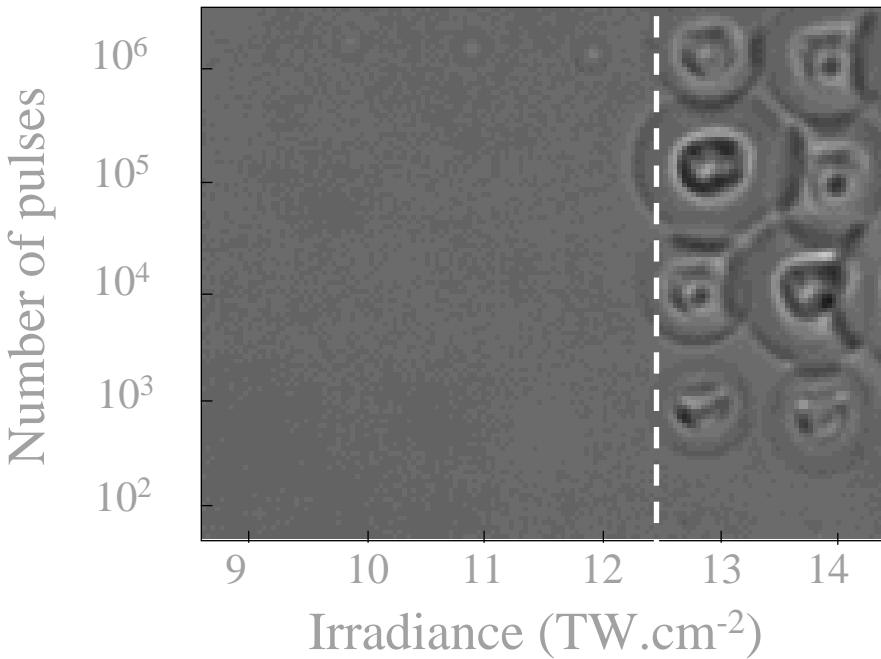
• Optique de focalisation :

Reflection objective	36x NA=0.52
Beam diameter	1 μm

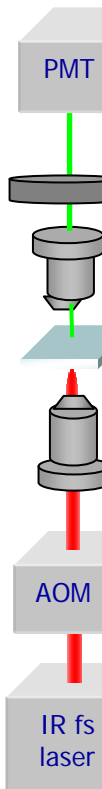
• Platines de translation:

Range	25 mm
Speed	0 – 25 mm s ⁻¹

Microscopie en lumière blanche :



Filtre passe bande



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

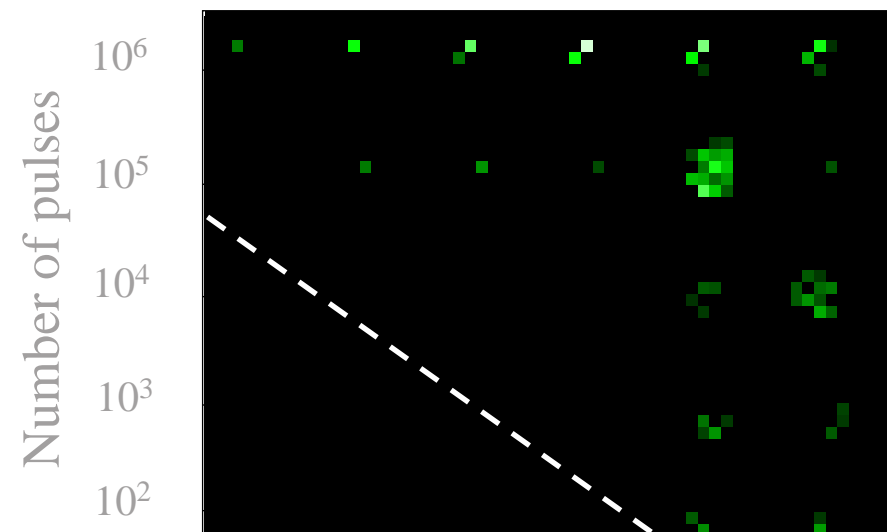
- Signal de GTH collecté par un **PMT** et un **filtre passe bande**.

- 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.

Stockage 3D

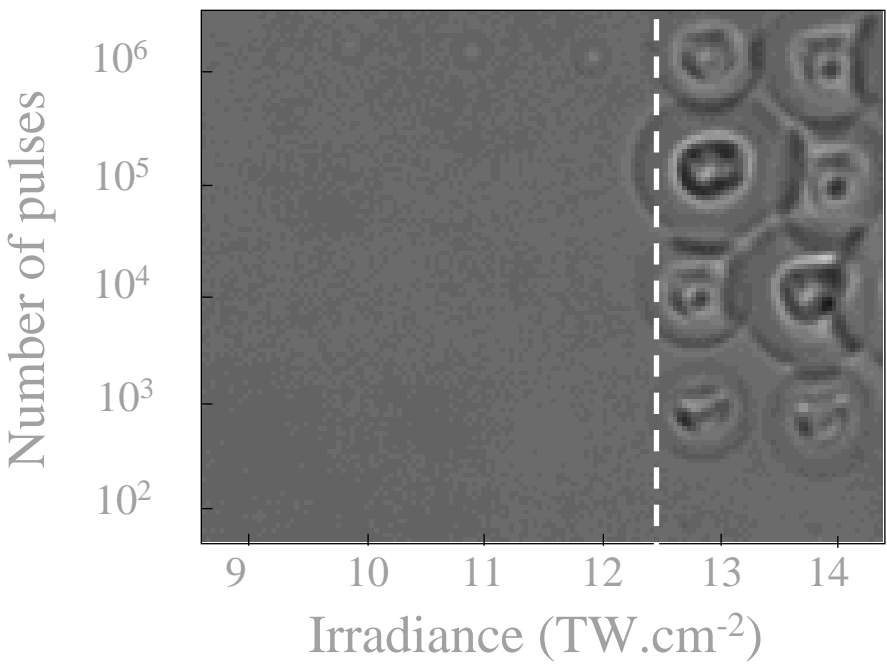
3 μm

10 μm

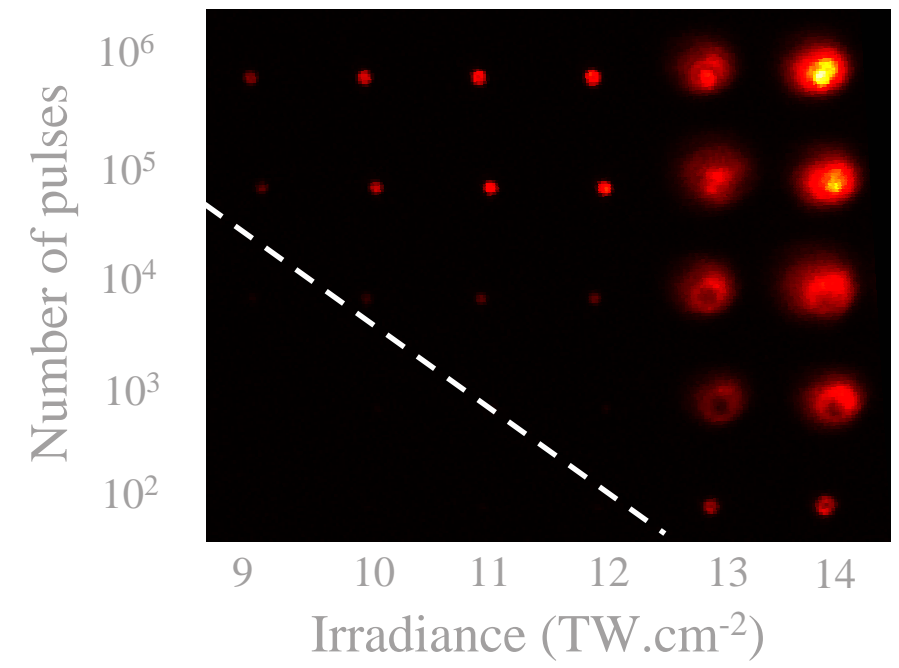


- Images inscrites dans le verre :
 - ▶ Taille : **12 × 12 pixels** (30 μm × 30 μm).
 - ▶ Ecart entre pixels : **3 μm** . Diamètre pixel : **2 μm** .
 - ▶ Ecart entre couches : **10 μm** .
 - ▶ Capacité de stockage : **1 Gbits.cm⁻³**.
- Pas de diaphonie.
- Capacité de stockage élevée.
- Moyen élégant de stocker l'information.
- ☹ Nécessité d'un laser femtoseconde pour lire l'information.

Microscopie en lumière blanche :



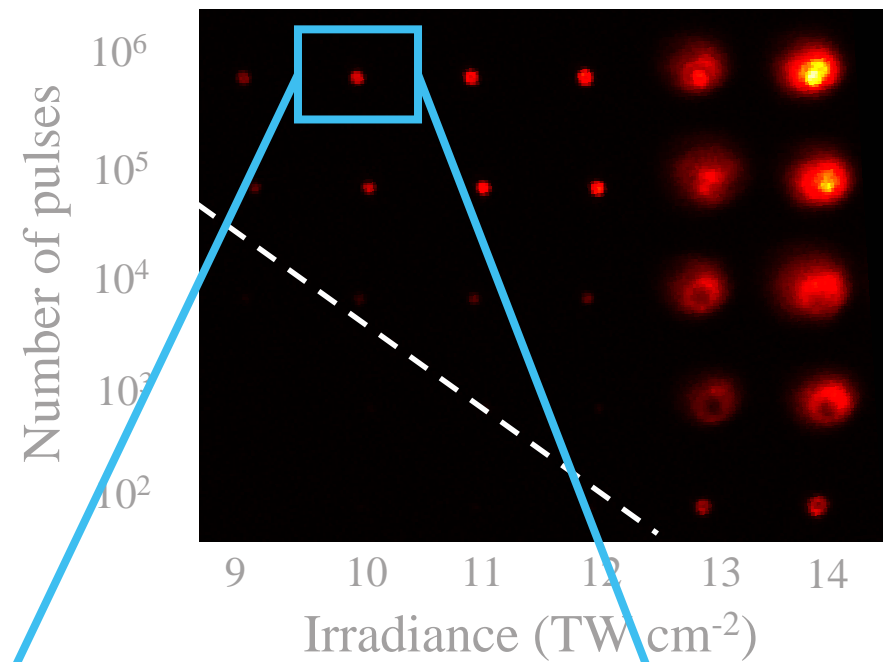
• Microscopie confocale de fluorescence



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

Réactions photochimiques :





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

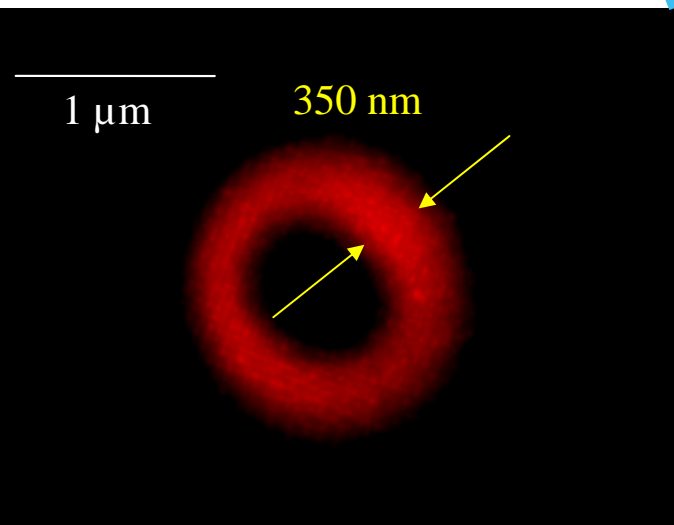


Image de fluorescence en 2D

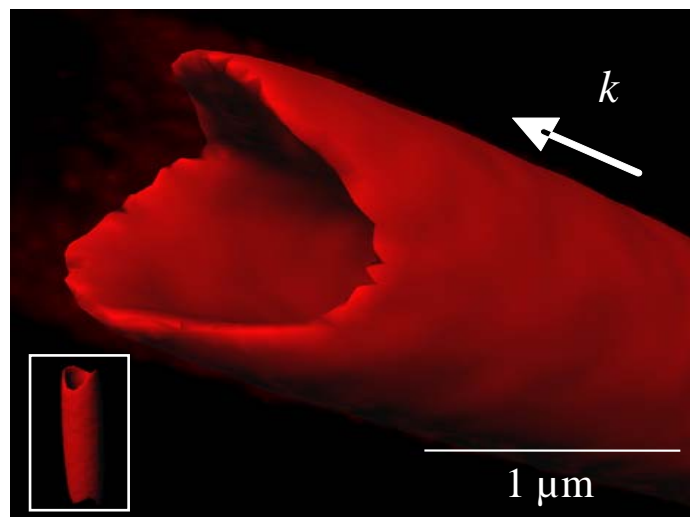


Image de fluorescence
reconstruite en 3D

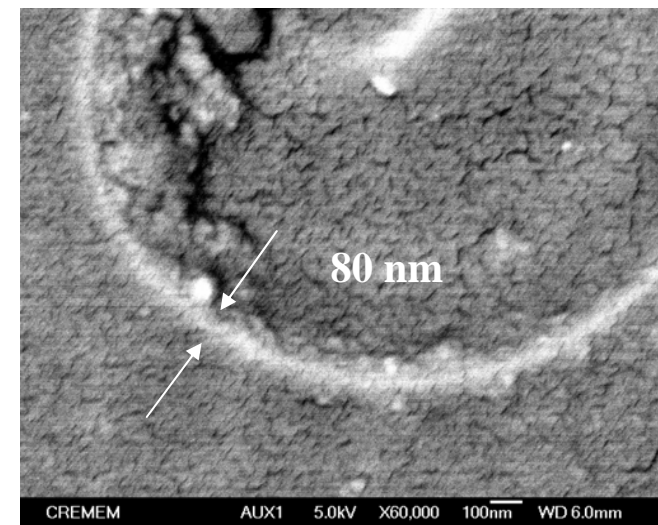
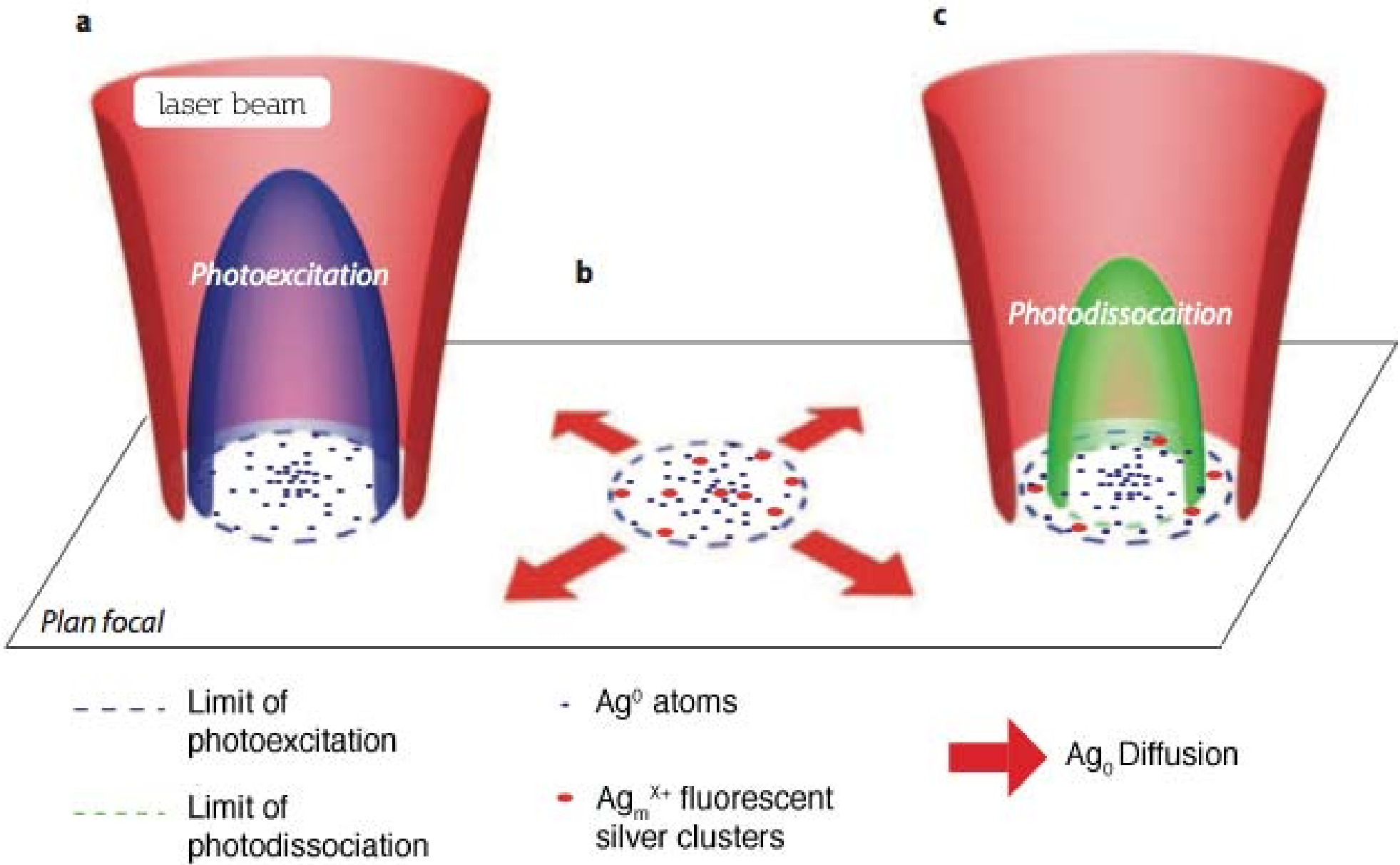


Image MEB



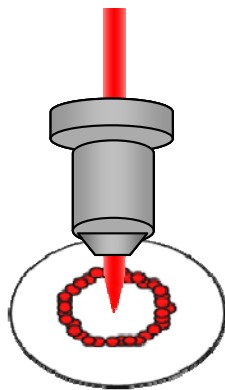
un processus en 3 étapes



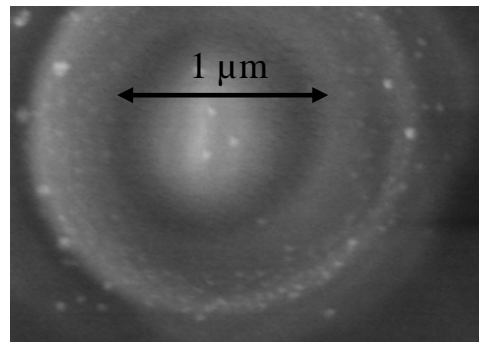
1) Photo-excitation → Génération d'électrons libres par absorption 4 photons.

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

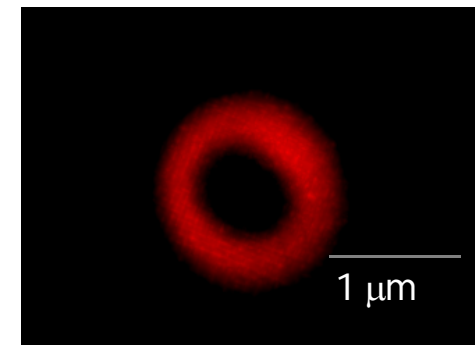
irradiation statique :



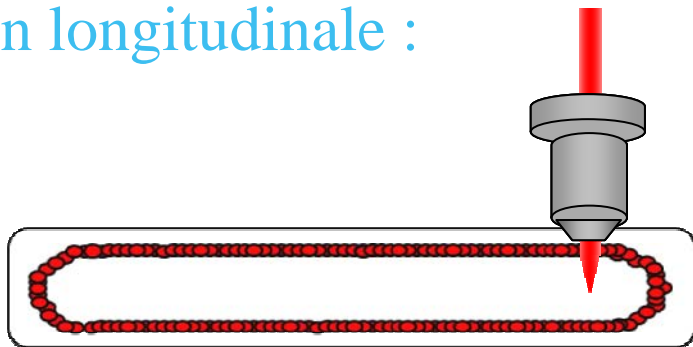
MEB-HR



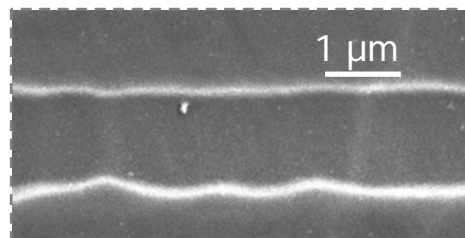
Fluorescence ($\lambda_{exc}=405\text{ nm}$)



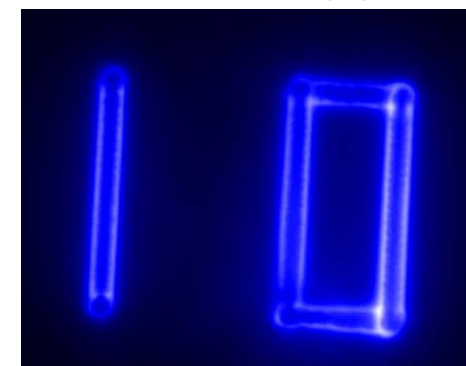
irradiation longitudinale :



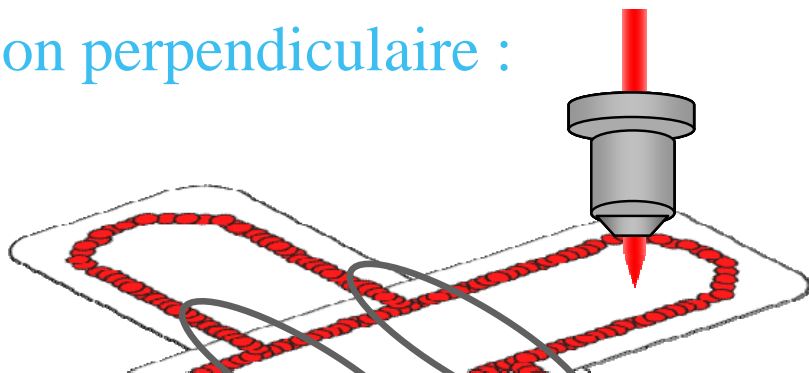
MEB-HR



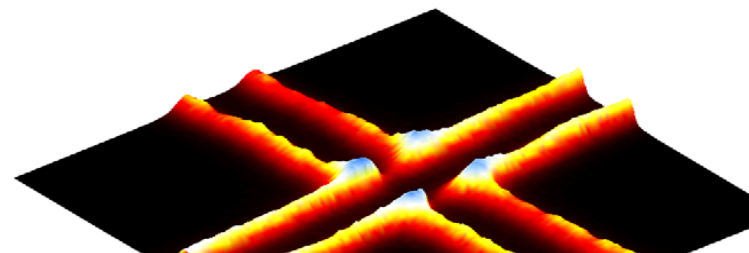
Fluorescence ($\lambda_{exc}=405\text{ nm}$)



irradiation perpendiculaire :



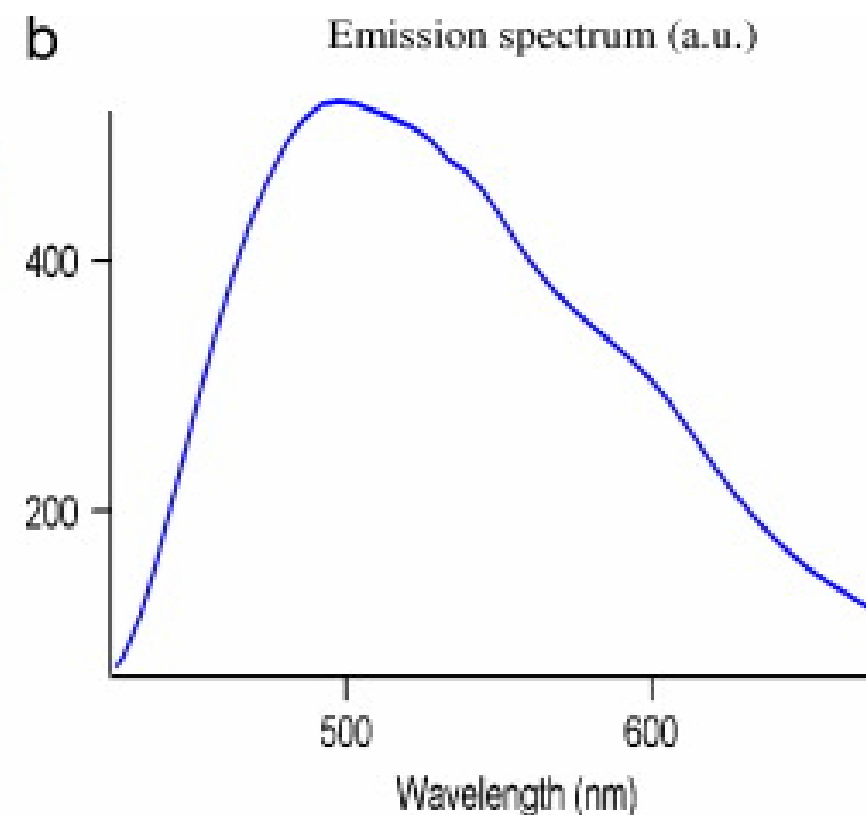
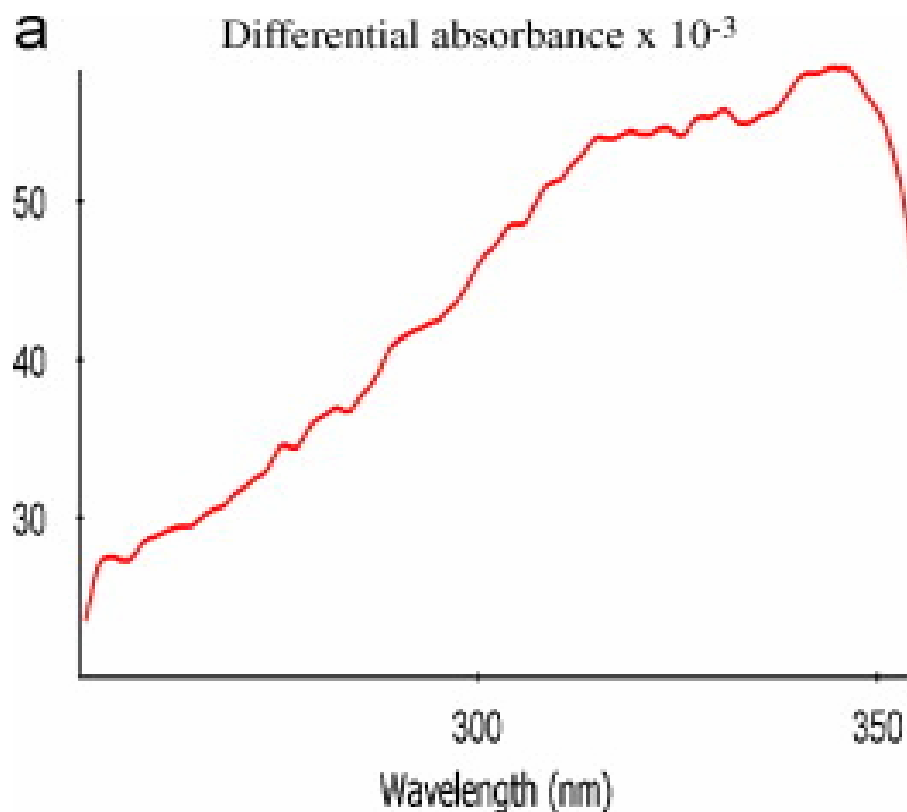
Fluorescence ($\lambda_{exc}=405\text{ nm}$)



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

Contrôle des propriétés de fluorescence :

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

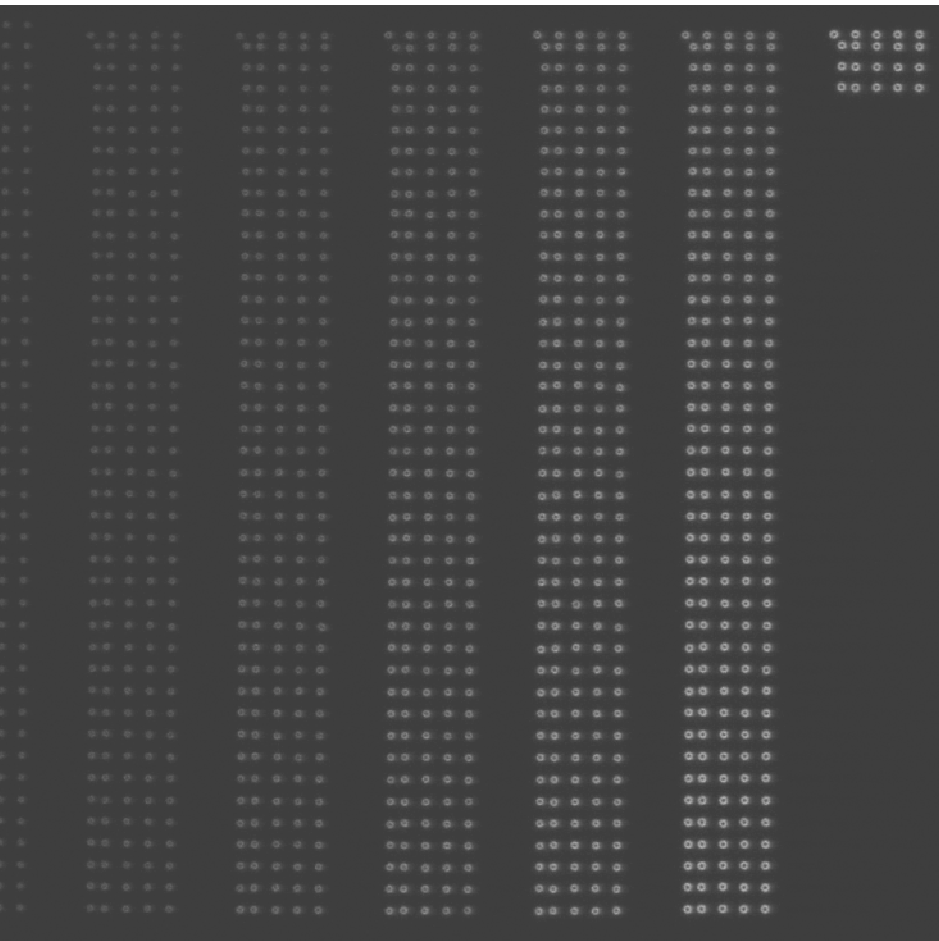


large absorption UV (de 200 à 420 nm).

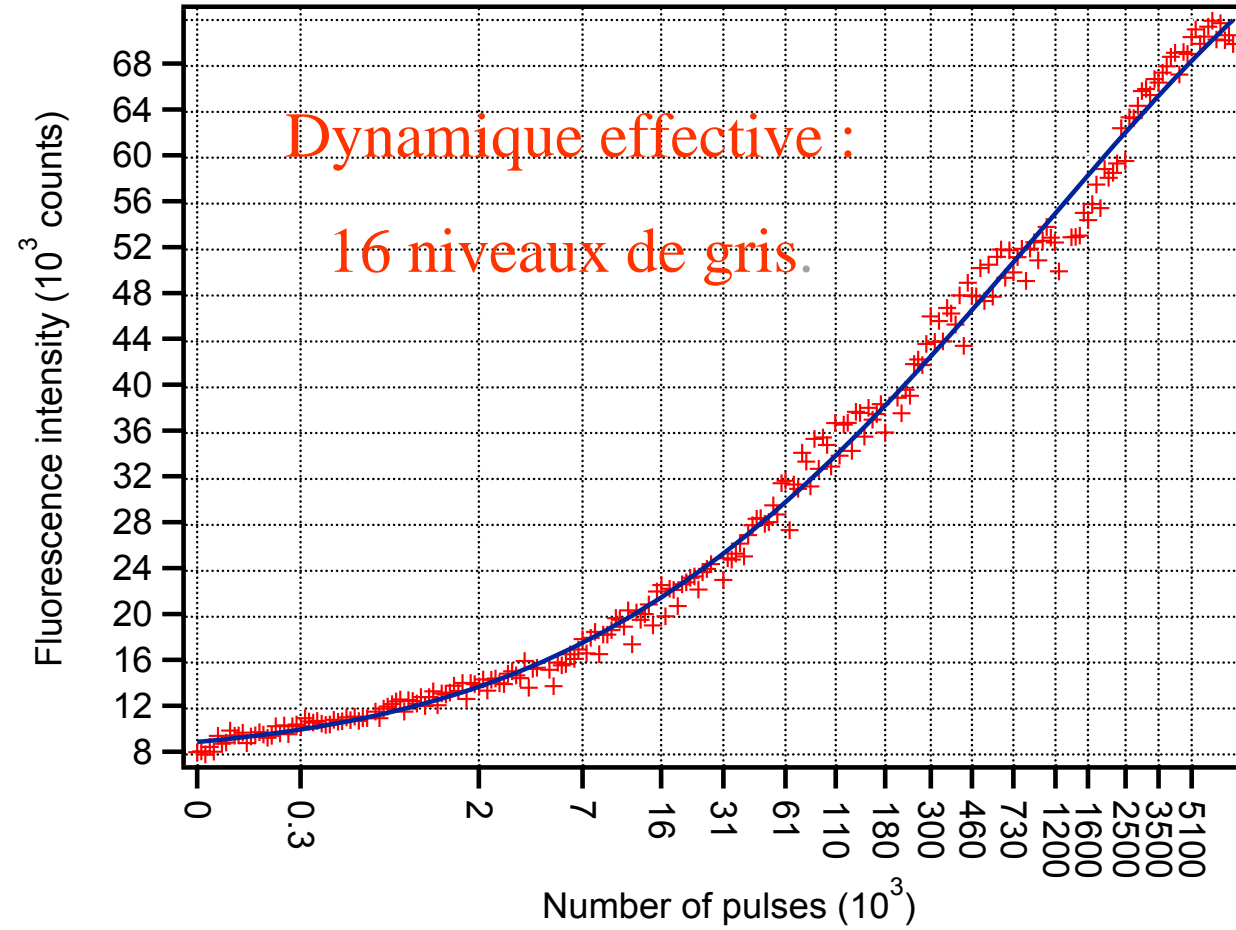
large fluorescence blanche (de 400 à 800 nm).



: échelle de gris



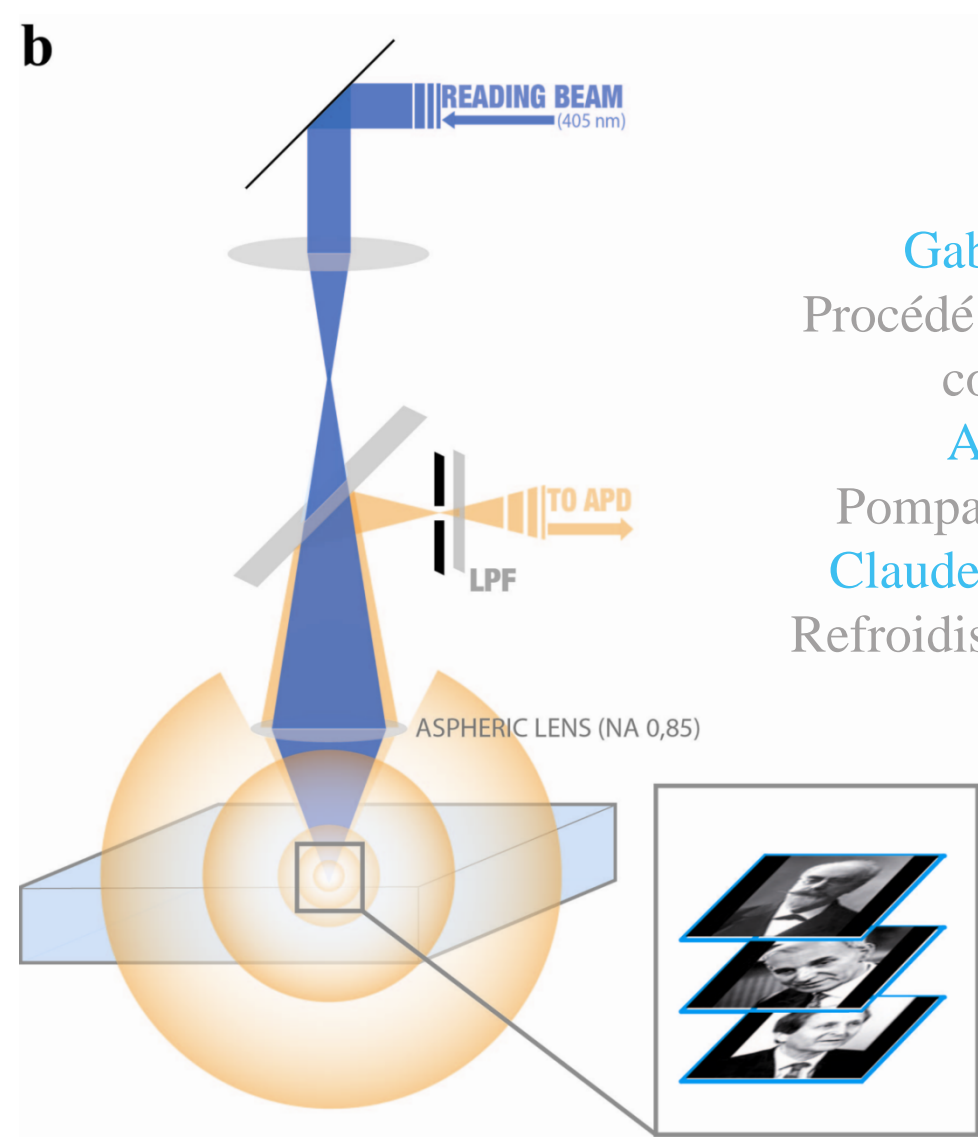
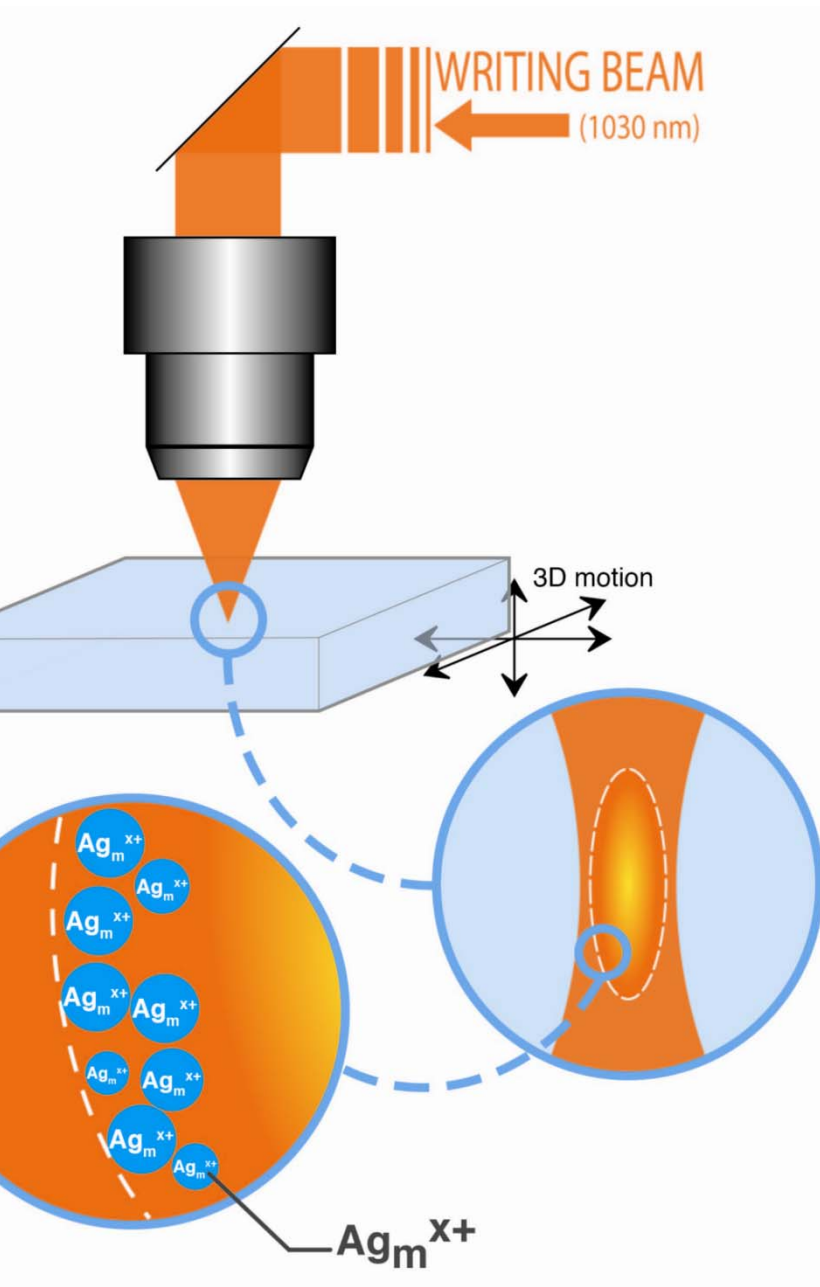
de fluorescence de 256 lignes de 5 iso-points.
ce : 5 J.cm^{-2} . Nombre d'impulsions : de 10^2 à 10^7 .



Intensité de fluorescence vs nombre d'impulsions et v
lues associées.

- Limites :

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

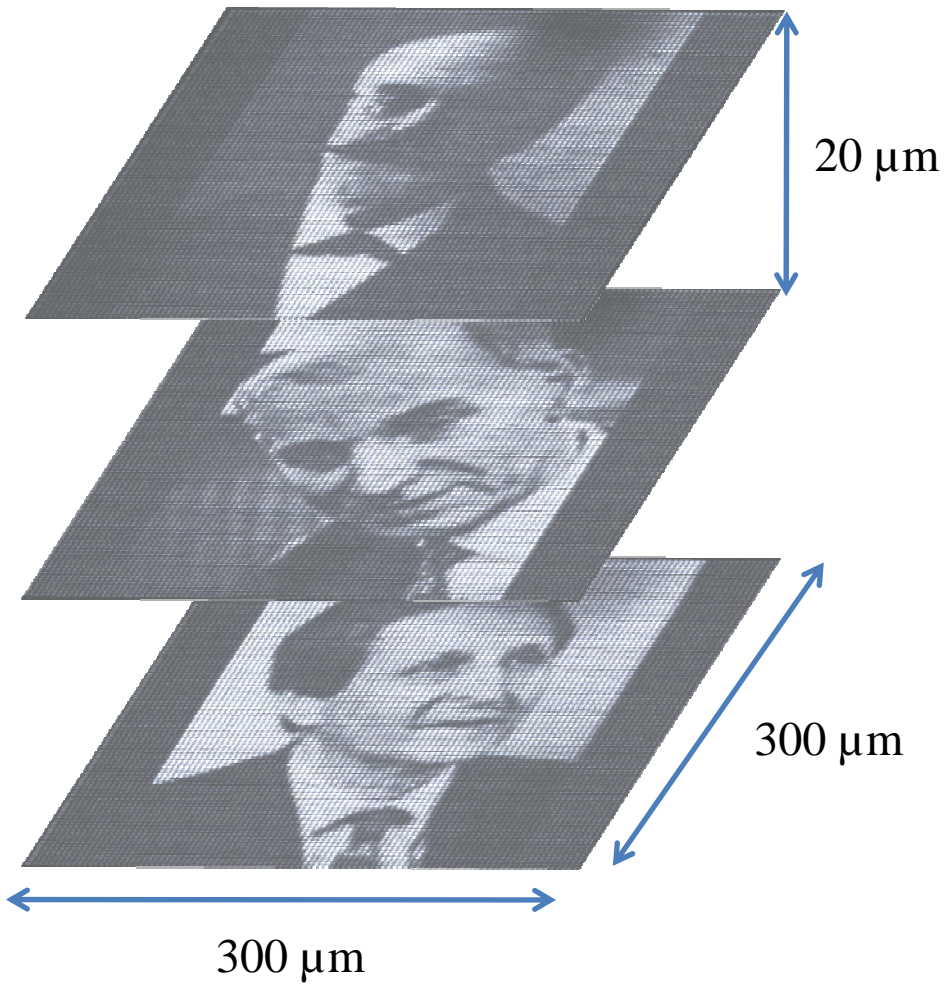


- Gabriel Lippmann
- Procédé de photographie couleur (1908)
- Alfred Kastler
- Pompage optique (1917)
- Claude Cohen-Tannoudji
- Refroidissement laser (1985)

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 gr**

- ▶ Capacité de stockage : **20 Gbits.cm⁻³**.

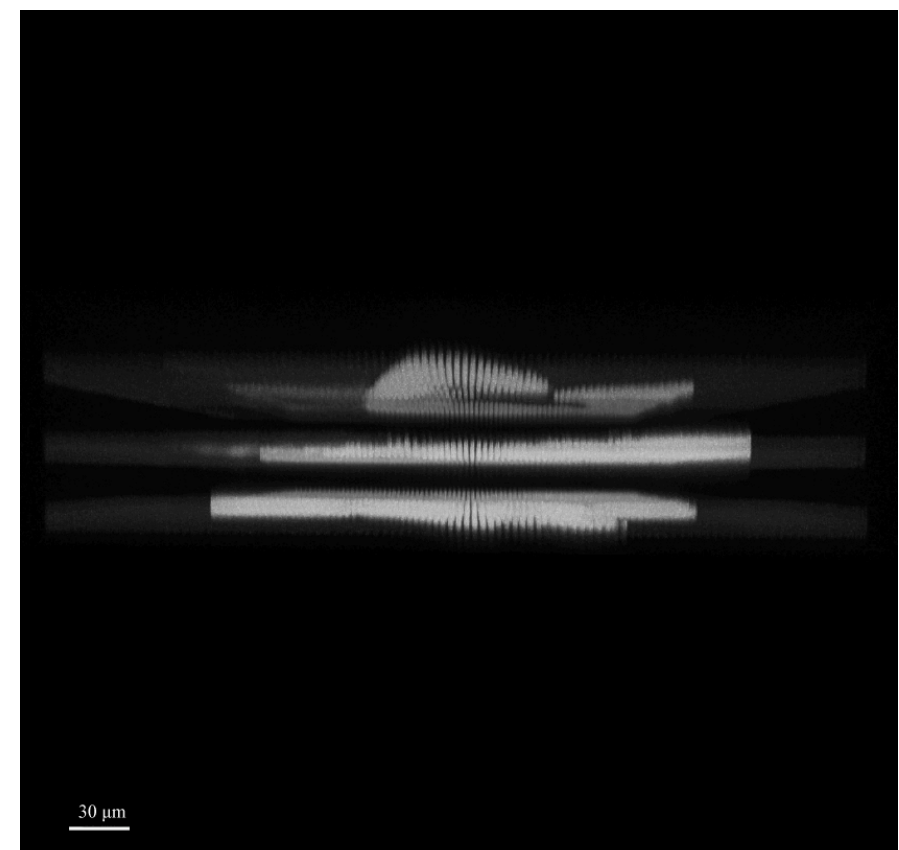




Image d'origine.

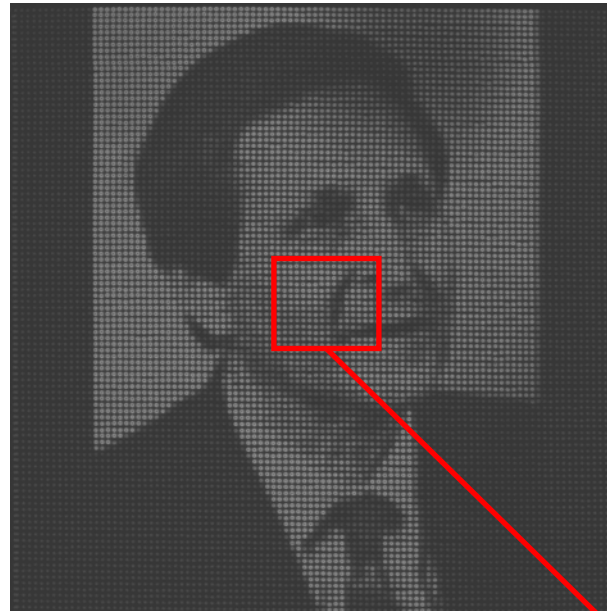


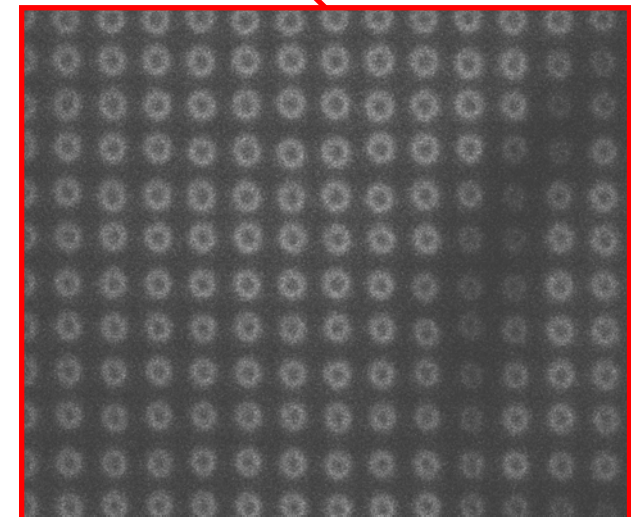
Image inscrite vue par microscopie confocale de fluorescence.



Image décodée affichée sur 256 niveaux.

Reconstruction précise des données.

Mais pixellisation à cause de la dynamique plus faible.

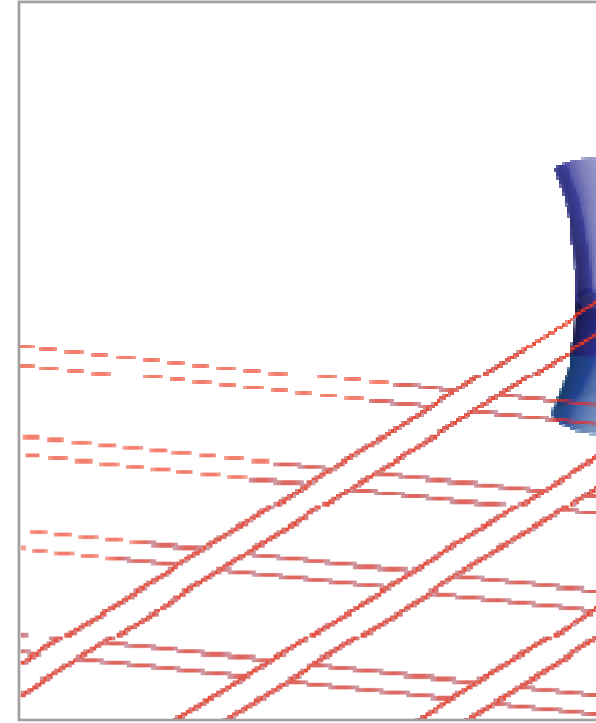




(Fluorescent Multilayer Disk)

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, $1 \mu\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$).



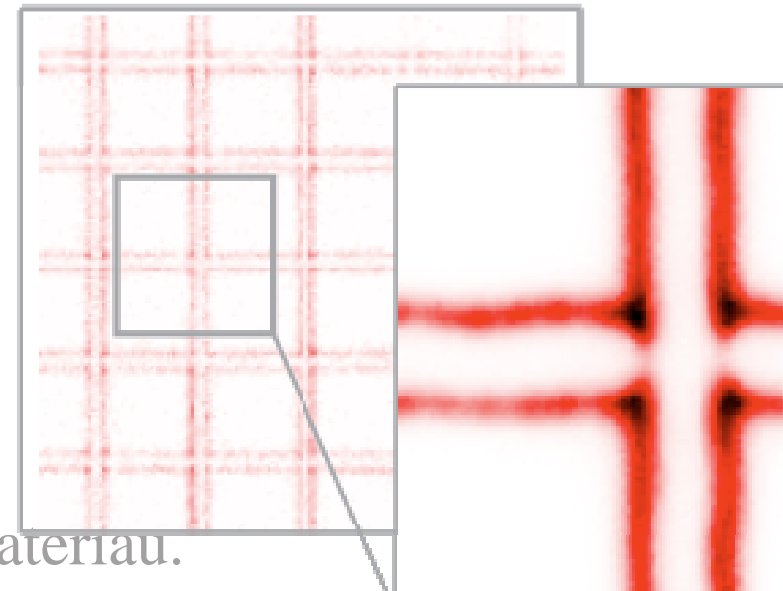
Améliorations :

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

