

Le stockage de données pérenne dans les verres : Etat de l'avancement du projet à Bordeaux.

A. Royon^{1,2}, Y. Deshayes², Y. Petit^{1,3}, T. Cardinal³, et L. Canioni¹

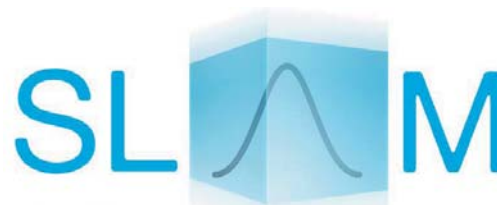
¹ LOMA-CNRS / Université de Bordeaux, France

² IMS-CNRS / Université de Bordeaux, France

³ ICMCB-CNRS / Université de Bordeaux, France

GIS DON

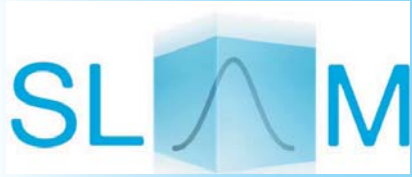
Paris, 13/09/2011



short lasers: applications
& materials

<http://www.loma.cnrs.fr/SLAM/>

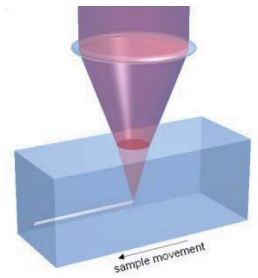




Le laser femtoseconde : un outil de choix pour structurer la matière

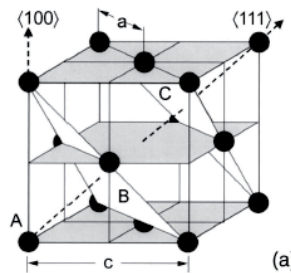
- Technique flexible pour induire des **modifications localisées** (**structurelles ou physico-chimiques**) dans un matériau.
- Possibilité de fabriquer des **motifs en 3D**.
- Utilisée pour de **nombreuses applications**.

Guides d'onde

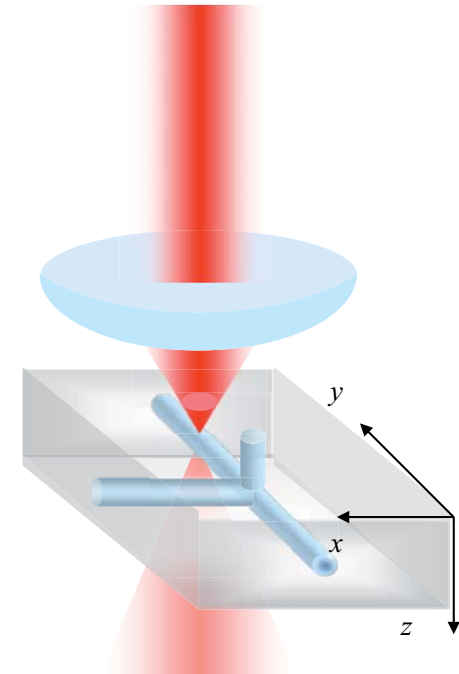


Davis *et al.*, Opt. Lett. **21**, 1729-1731 (1996).

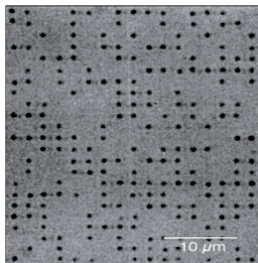
Cristaux photoniques



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

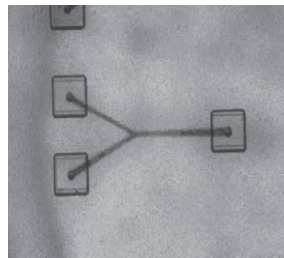


Mémoires optiques



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

Micro-canaux

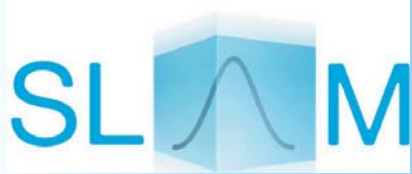


Masuda *et al.*, Appl. Phys. A **76**, 857-860 (2003).

Cristaux fonctionnels



Dai *et al.*, Chem. Phys. Lett. **443**, 253-257 (2007).



Avantages du laser femtoseconde

- **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.

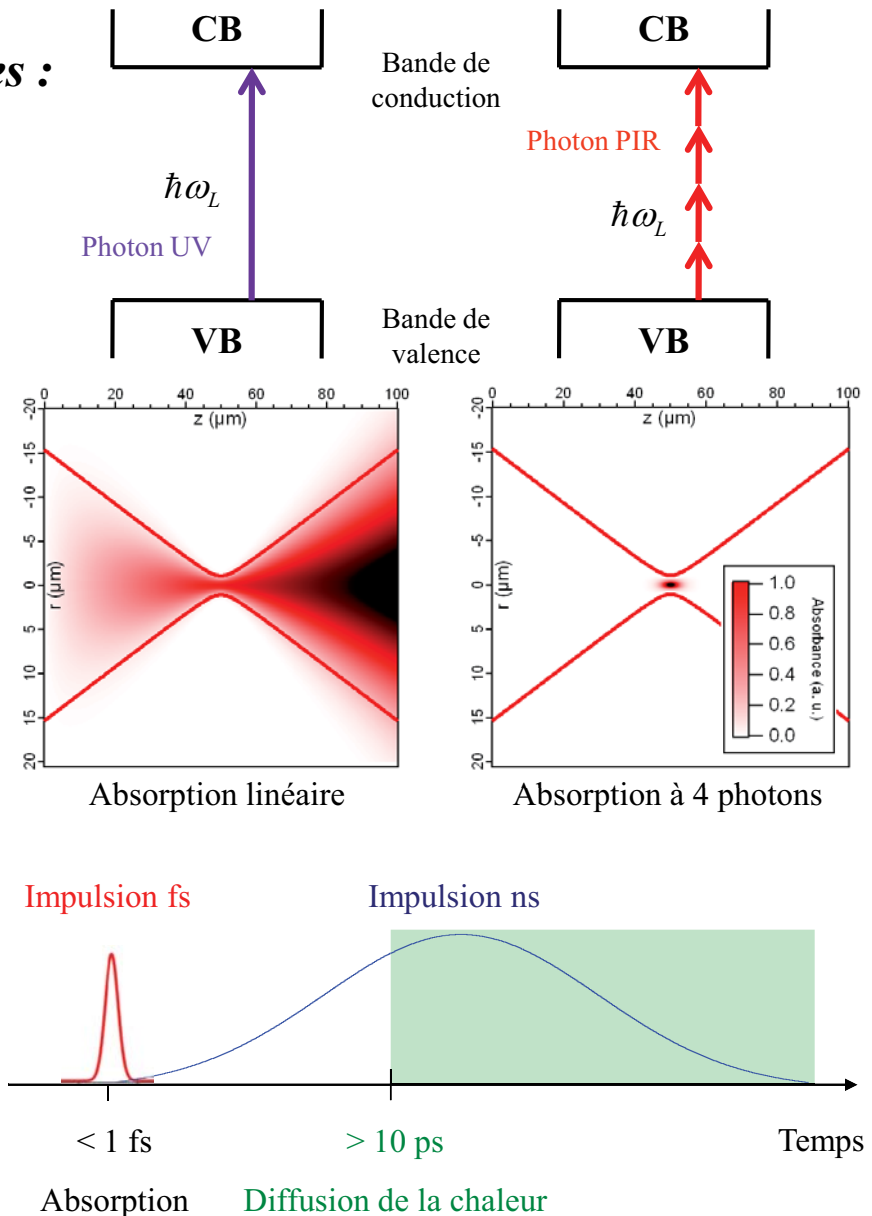
Absorption non-linéaire

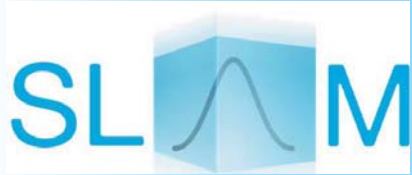
+

Contrôle des effets thermiques



***Grande résolution spatiale
pour modifier le matériau***



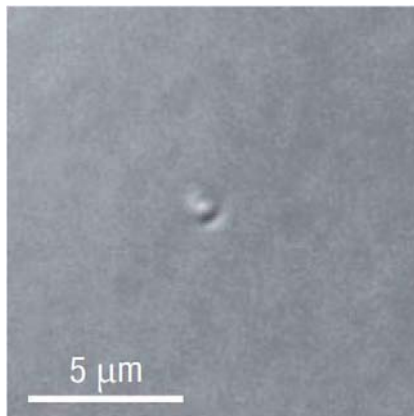


Réponses de la matière à une excitation laser femtoseconde

- 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 :

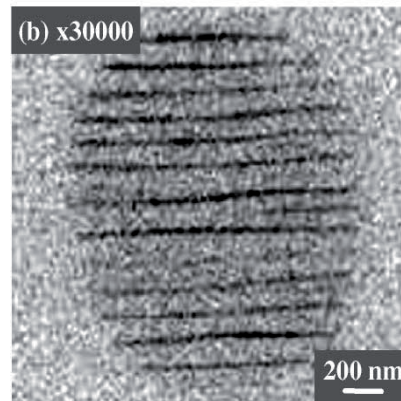
$$\Delta n \sim +10^{-3}$$



Gattas and Mazur, Nature Photonics **2**, 219-225 (2008).

Type 2 :

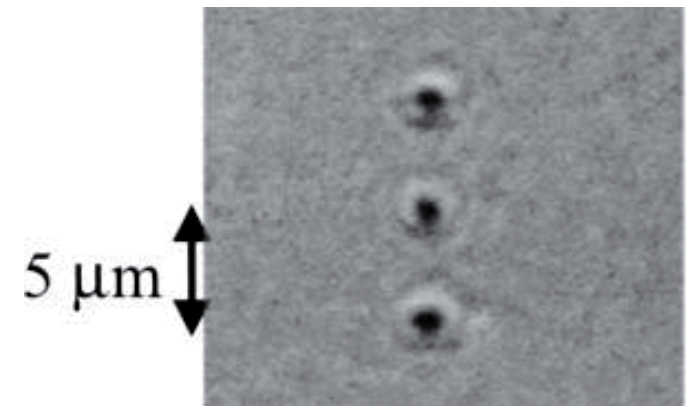
$$\Delta n \sim \pm 10^{-2}$$



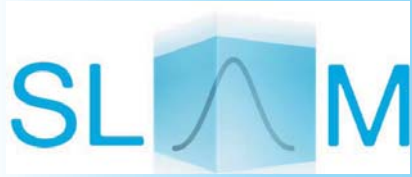
Shimotsuma *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 247405 (2003).

Type 3 :

$$\Delta n \sim \pm 10^{-1}$$

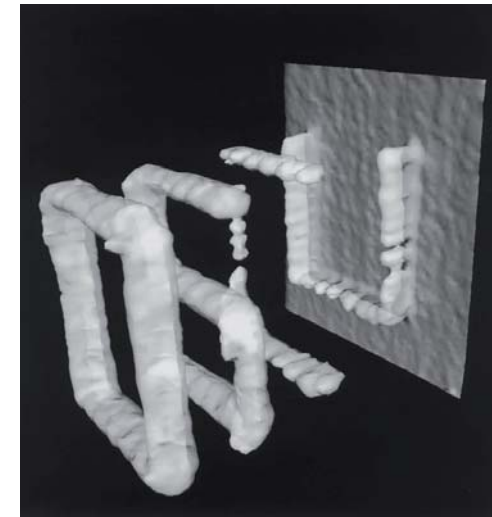
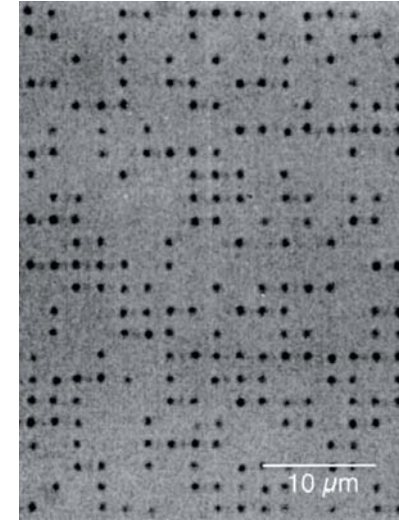


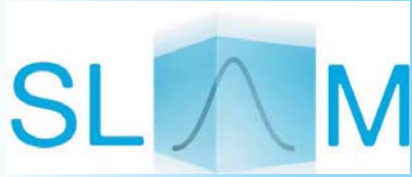
Watanabe *et al.*, Opt. Lett. **25**, 1662-1671 (2000).



Etat de l'art du stockage de données dans les verres par laser femtoseconde

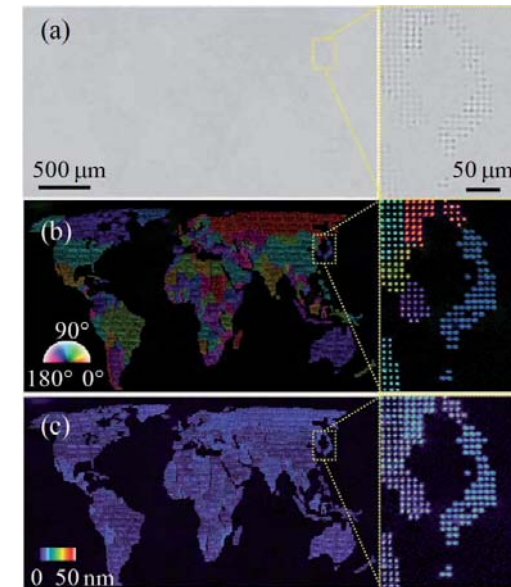
- **Micro-cavités (type 3) :** Glezer *et al.*, Opt. Lett. **21**, 2023-2025 (1996).
 - ▶ Capacité de stockage élevée ($\sim 1 \text{ Tbits.cm}^{-3}$).
 - ▶ Ecriture = laser femtoseconde / Lecture = microscopie optique en lumière blanche.
 - ▶ 3 dimensions de l'espace.
 - ▶ ☹ Diaphonie entre les couches (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.
 - ▶ ☹ Diffusion du faisceau laser de lecture (modification de l'indice de réfraction).

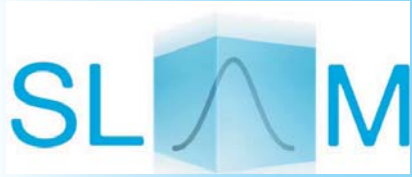




Etat de l'art du stockage de données dans les verres par laser femtoseconde

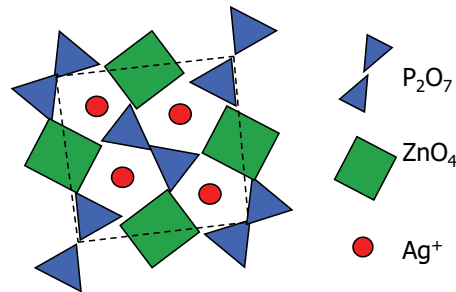
- “Nano-réseaux” (type 2) : Shimotsuma *et al.*, Adv. Mat. **22**, 4039-4043 (2010).
 - ▶ Capacité de stockage élevée ($\sim 300 \text{ Gbits.cm}^{-3}$).
 - ▶ Ecriture = laser femtoseconde / Lecture = par polarisation avec caméra CCD.
 - ▶ 3 dimensions de l'espace + direction de l'axe lent + retard = 5D.
 - ▶ ☹ Diaphonie entre les couches (modification de l'indice de réfraction).
- Equipe à Southampton (Kazansky) :
 - ▶ Démonstration d'un prototype.
 - ▶ Capacité de stockage : 50 Go.
 - ▶ Résistance à la chaleur : jusqu'à 980°C .
 - ▶ Collaboration avec une entreprise lithuanienne : Altechna Ltd.





Verre Femto Photo-Luminescent (FPL)

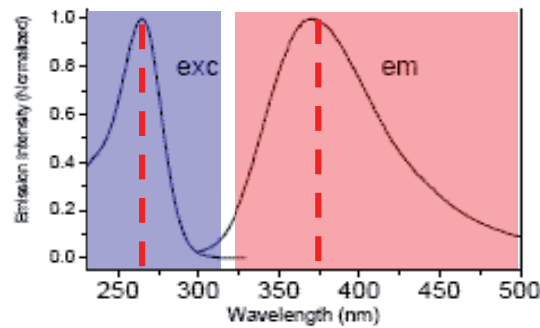
- Composition chimique : 55% ZnO – 40% P₂O₅ – x% Ga₂O₃ – (5-x)% Ag₂O.



ZnO – P₂O₅: matrice vitreuse.

Ga₂O₃: stabilisateur.

Ag₂O: sensibilisateur.



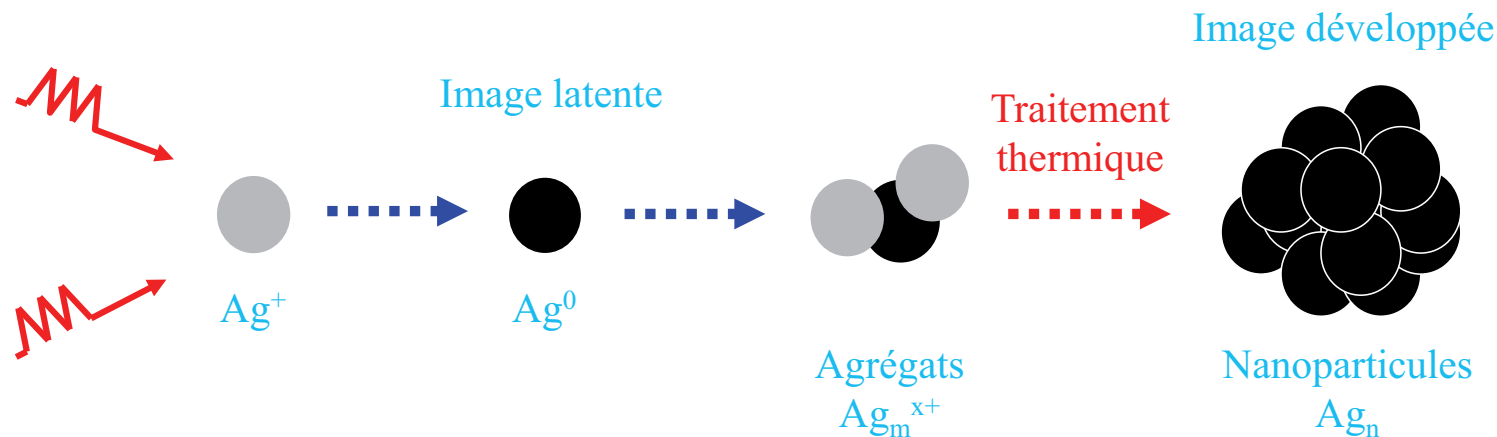
Bande d'absorption @ 260 nm.

Bande d'émission @ 380 nm.



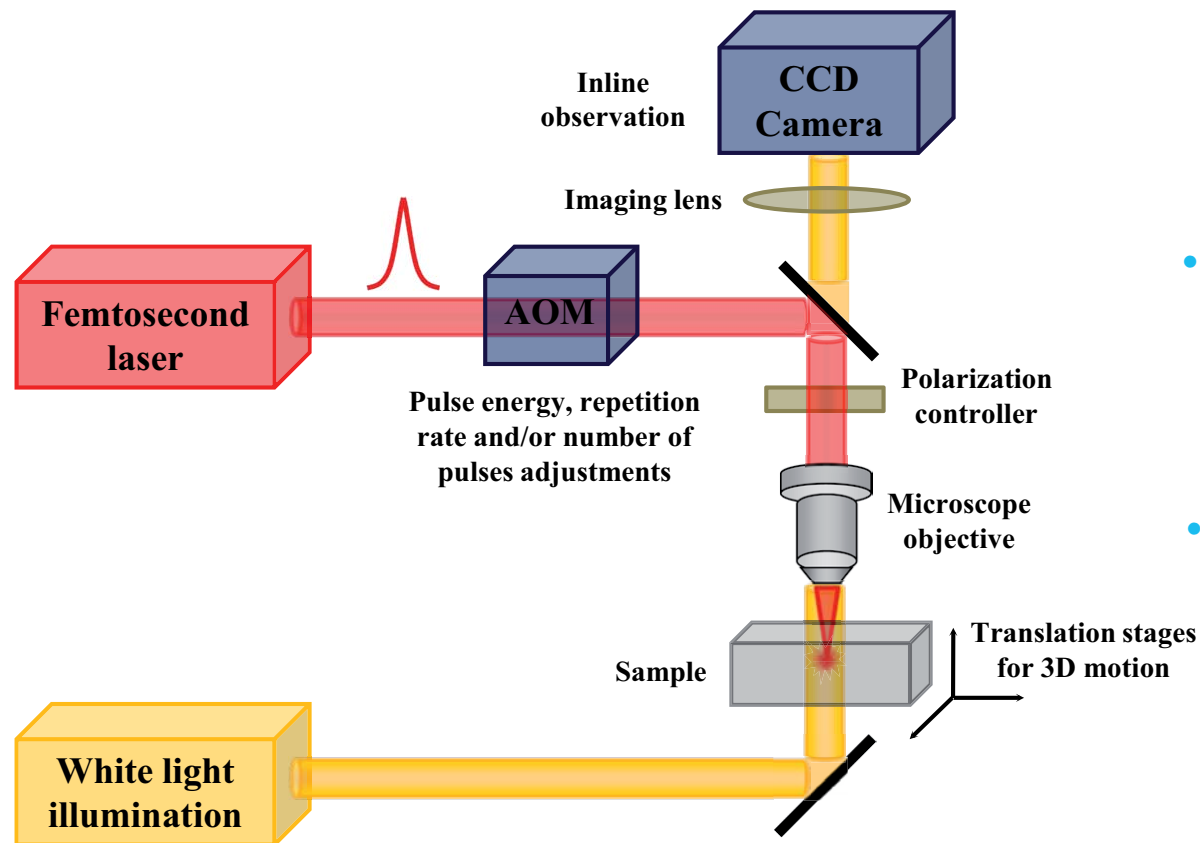
Fluorescence intrinsèque
bleue. Excitation @ 254 nm.

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



Stookey, Ind. Eng. Chem.
41, 856 5 (1949).

- Dispositif expérimental :



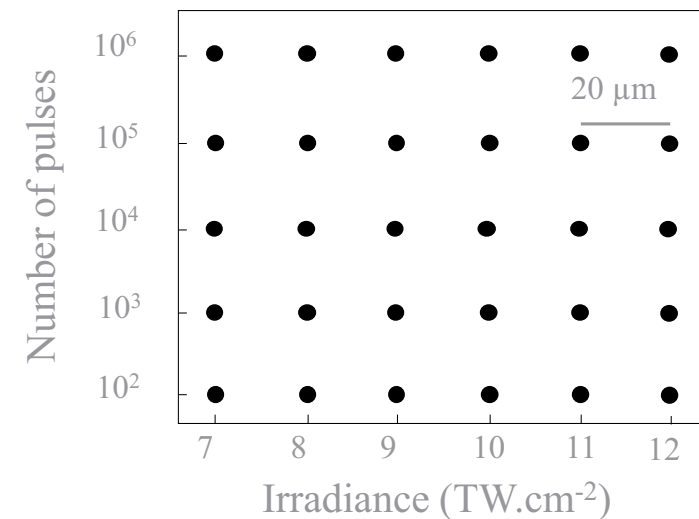
- Laser :

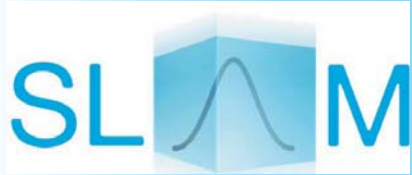
Wavelength	1030 nm
Pulse width	500 fs
Repetition rate	10 MHz
Average power	6 W

- Modulateur acousto-optique :

Number of pulses	$10^2 - 10^6$
Irradiance	$7 - 12 \text{ TW.cm}^{-2}$

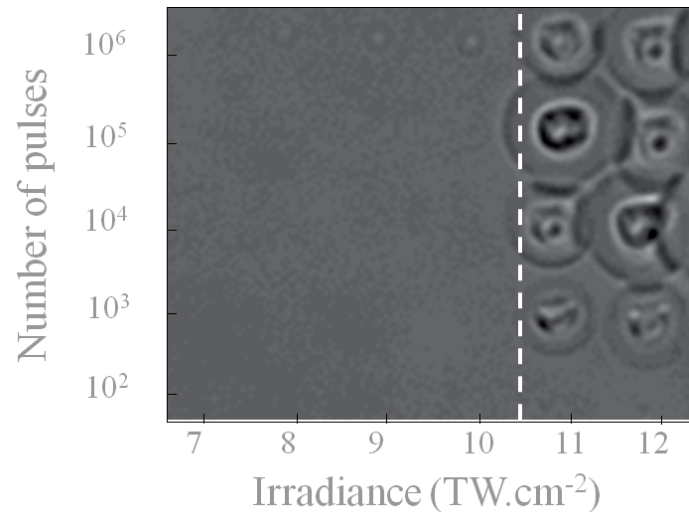
- Procédure expérimentale :





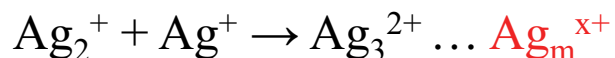
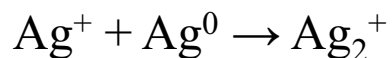
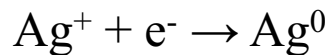
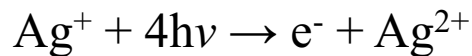
Caractérisation des structures photo-inscrites

- Microscopie en lumière blanche :

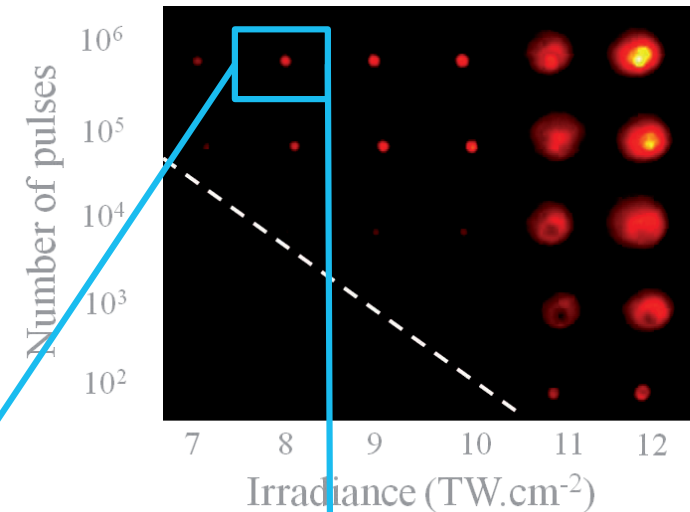


- Création d'agrégats d'argent fluorescents, même où l'indice de réfraction n'a pas été modifié ($\Delta n < 10^{-4}$).

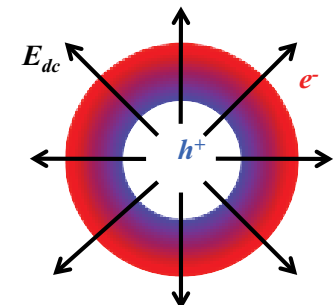
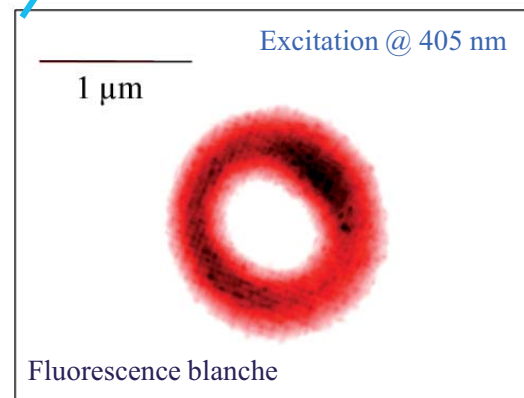
- Réactions photochimiques :



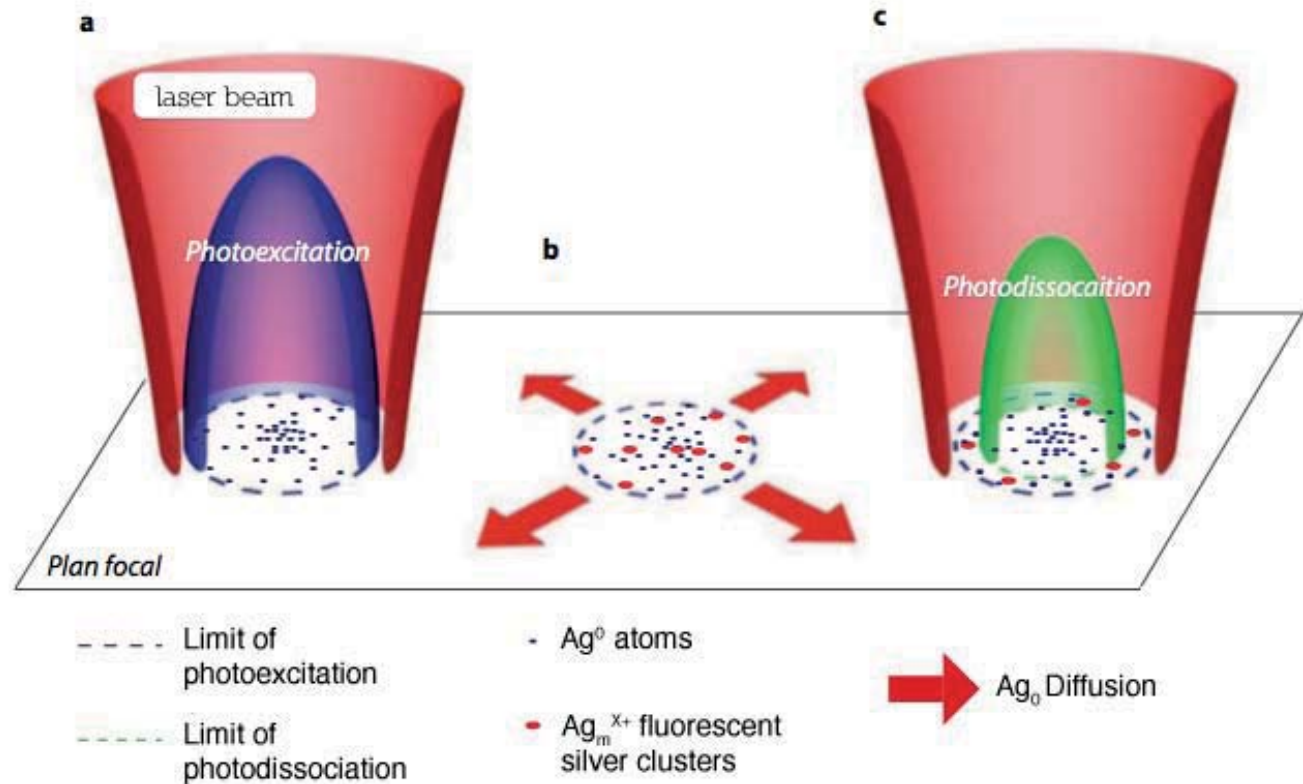
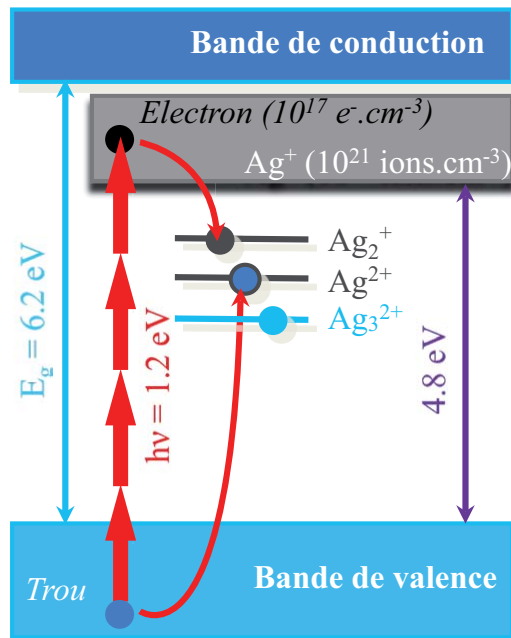
- Microscopie confocale de fluorescence :



Bellec *et al.*, Opt. Exp. 17, 10304-10318 (2009).

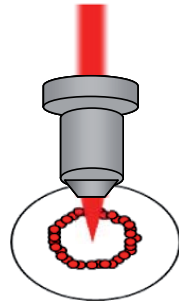


Formation de l'anneau : un processus en 3 étapes

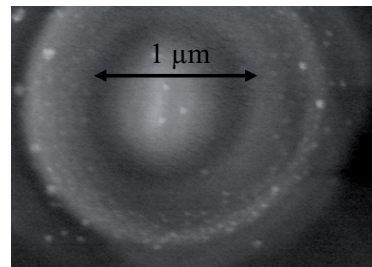
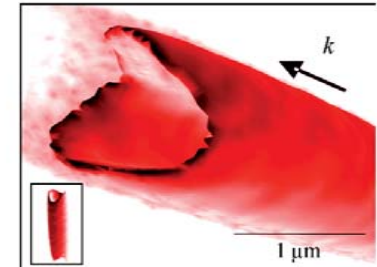
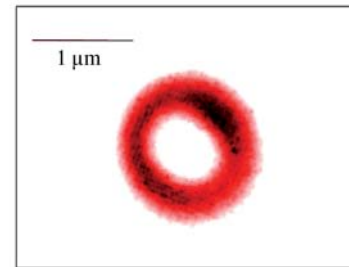


- 1) **Photo-excitation** → Génération d'électrons libres par absorption 4 photons.
- 2) **Diffusion thermique** → Formation d'agrégats d'argent.
- 3) **Photo-dissociation** → Effacement au centre et accumulation à la périphérie.

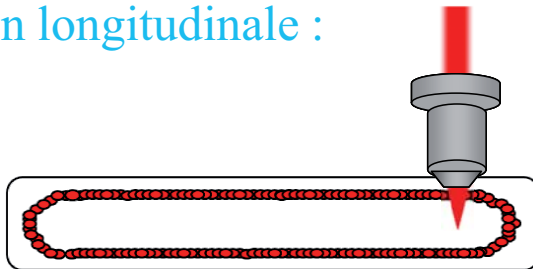
- Irradiation statique :



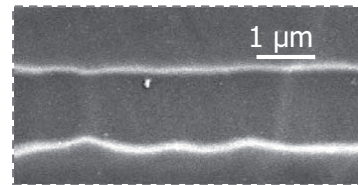
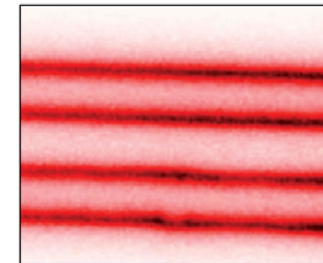
MEB-HR

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

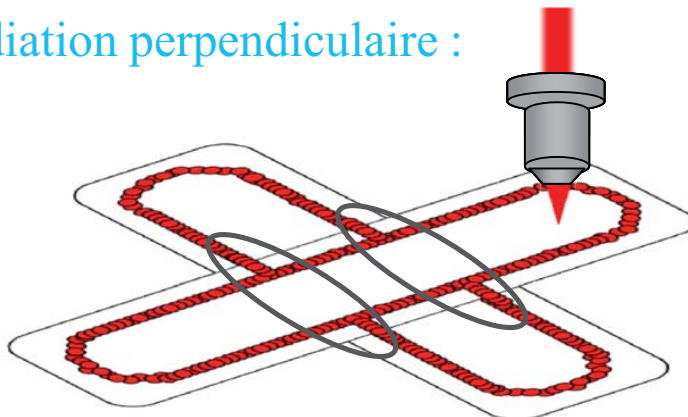
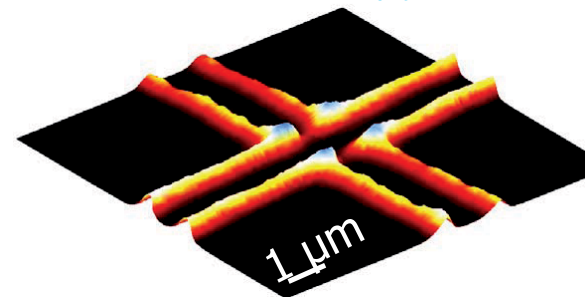
- Irradiation longitudinale :

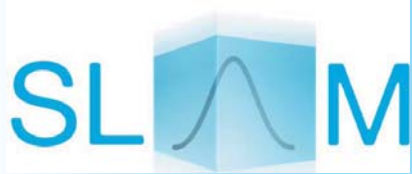


MEB-HR

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

- Irradiation perpendiculaire :

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

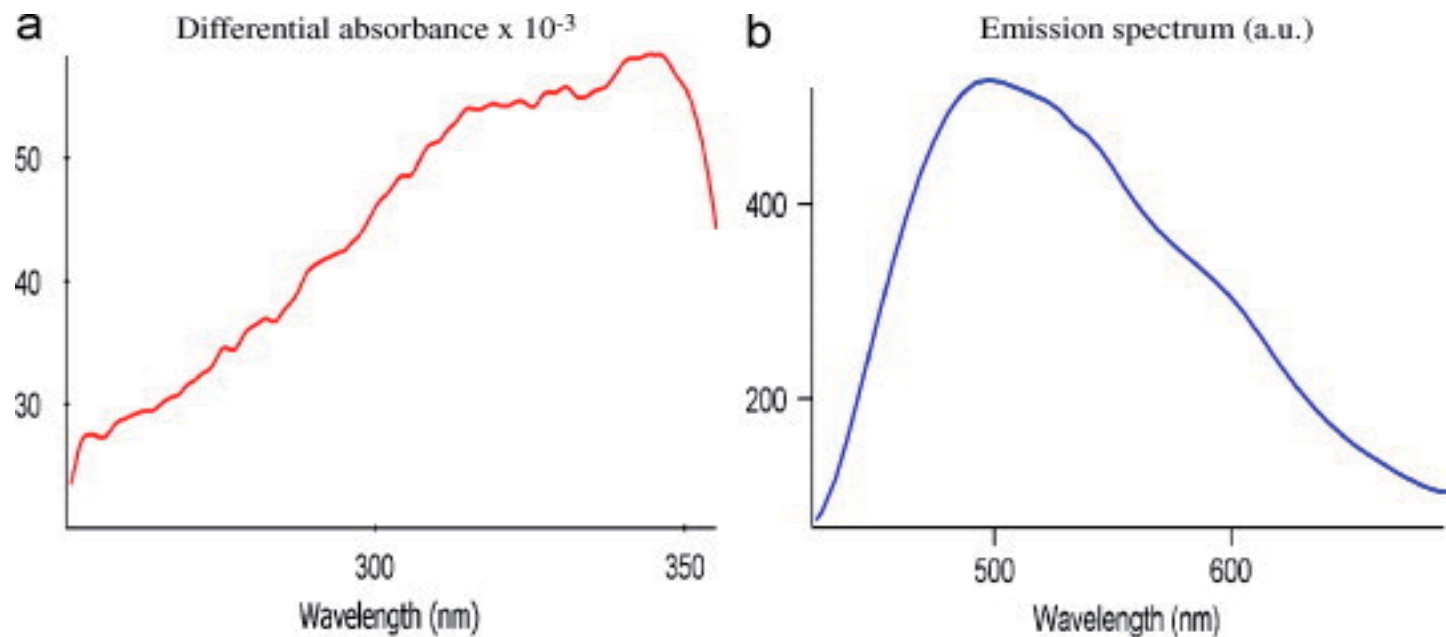


Caractéristiques spectrales

- Réglage de la dose laser (fluence et/ou nombre d'impulsions)

→ Contrôle des propriétés de fluorescence :

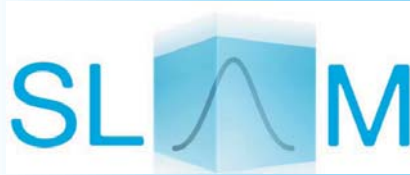
- Spectre.
- Durée de vie.
- Intensité.



- Large absorption UV : de 200 à 420 nm.
- Large fluorescence blanche : de 400 à 800 nm.
- Courte durée de vie : ~ 3 ns.

Bourhis *et al.*, J. Non. Cryst. Sol. **356**, 2658-2665 (2010).

Bellec *et al.*, J. Phys. Chem. C **114**, 15584-15588 (2010).



Contrôle de l'intensité de fluorescence : échelle de gris

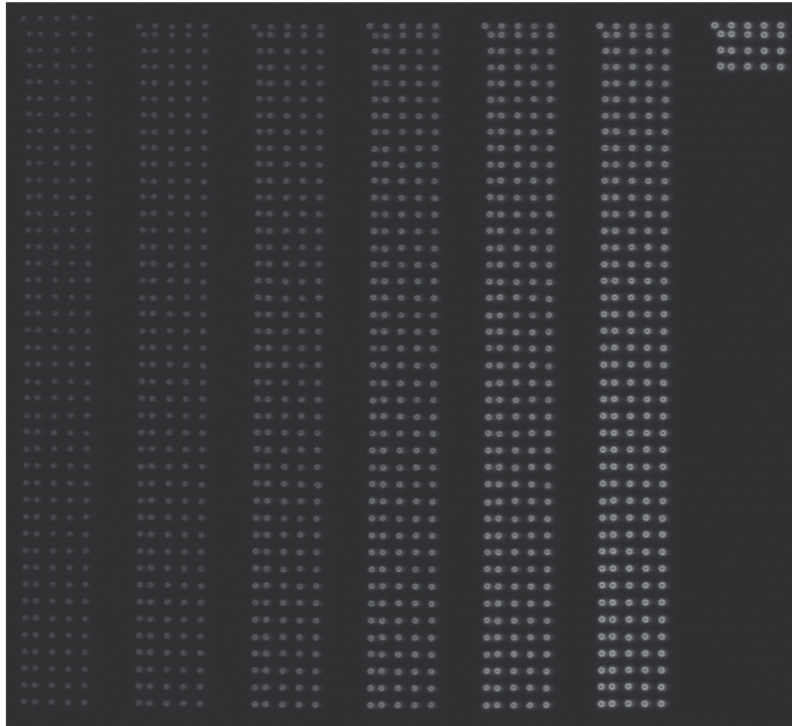
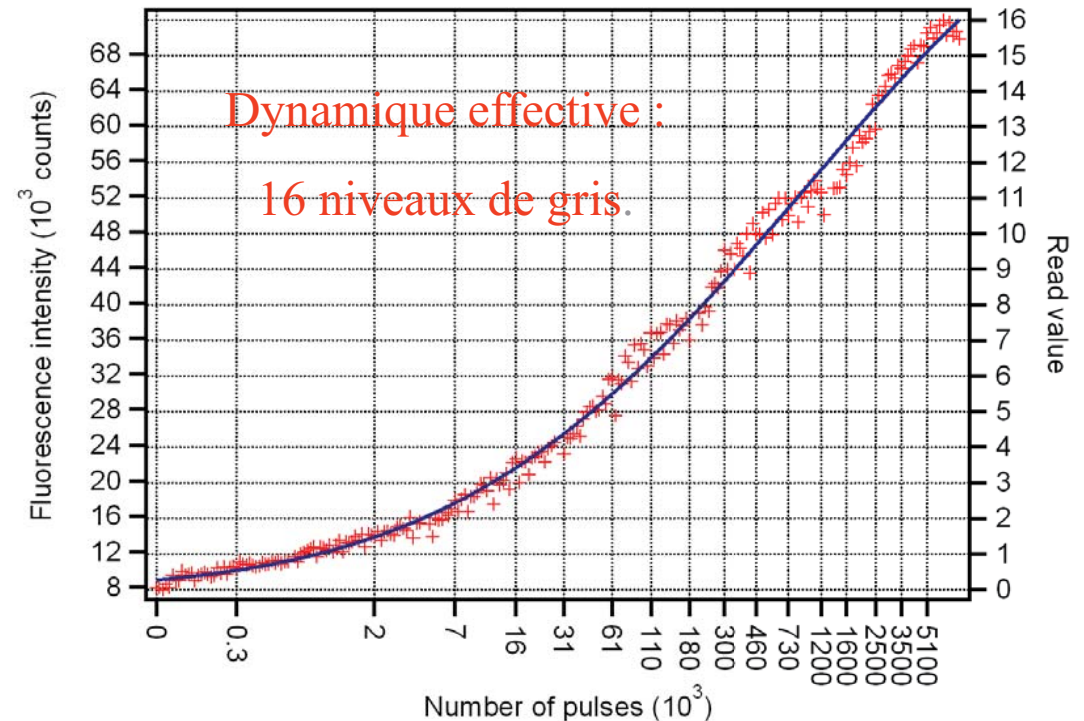


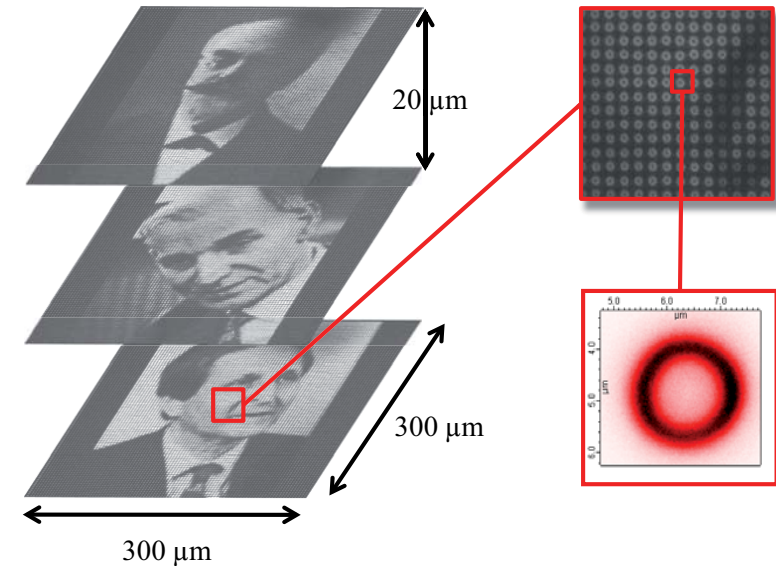
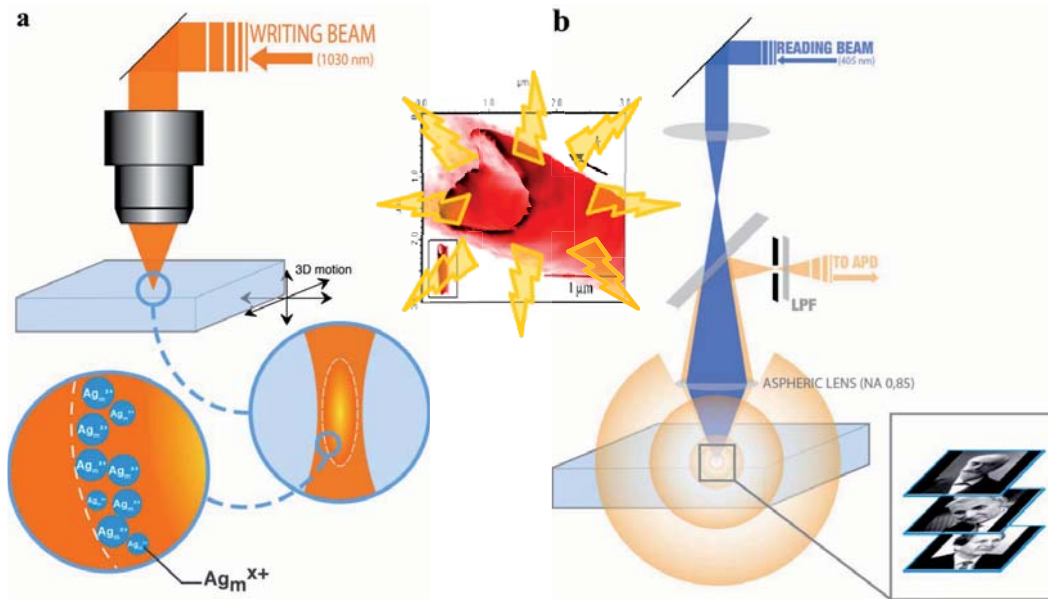
Image de fluorescence de 256 lignes de 5 iso-points.
Fluence : 5 J.cm^{-2} . Nombre d'impulsions : de 10^2 à 10^7 .



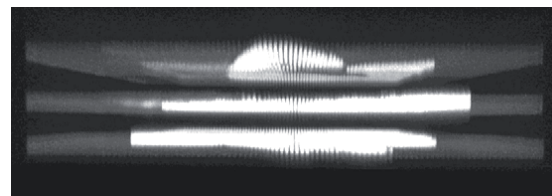
Intensité de fluorescence vs nombre d'impulsions et valeurs lues associées.

- Limites :

- Stabilité du laser ($< 1\%$).
- Homogénéité du matériau ($\sim 1\%$).
- Inhomogénéité du champ de lecture.



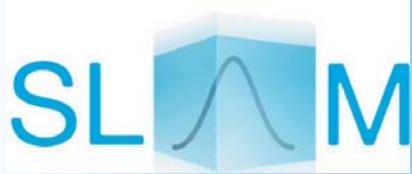
Royon *et al.*, Adv. Mat. **22**, 5282-5286 (2010).



- Pas de diaphonie entre couches.
- Pas de photo-blanchiment.
- Capacité de stockage élevée.
- Lecture Blu-ray.
- Vitesse de lecture max : 500 Mbits.s⁻¹.

- Images d'origine JPEG :
 - Taille : **100 × 100 pixels**.
 - Dynamique d'encodage : **8 bits (256 niveaux)**.
 - **Gabriel Lippmann** (procédé photographique en couleur, 1908).
 - **Alfred Kastler** (pompage optique, 1966).
 - **Claude Cohen-Tannoudji** (refroidissement laser, 1997).

- 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⁻³**.



Reconstruction des données



Image JPEG d'origine codée sur 256 niveaux.



Image inscrite vue par microscopie confocale de fluorescence.

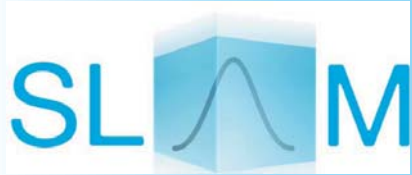


Image décodée affichée sur 256 niveaux.

- Reconstruction précise des données.
- Pixellisation à cause de la dynamique plus faible.

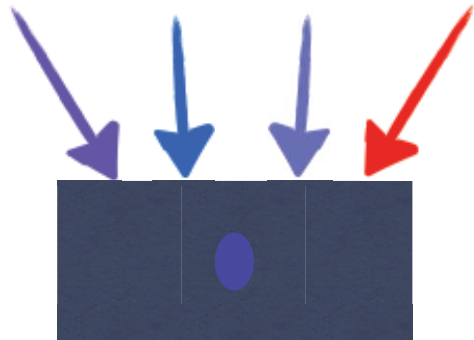
Sur la route du FMD (Fluorescent Multilayer Disk) ?

- Verrous :
 - Vitesse d'écriture → puissance et cadence du laser + masques de phase + four.
 - Motifs au format DVD ou Blu-ray → longueur d'onde du laser / ON de l'objectif.
 - Durabilité → protocoles de vieillissements accélérés.



Fiabilité et vieillissement du dispositif

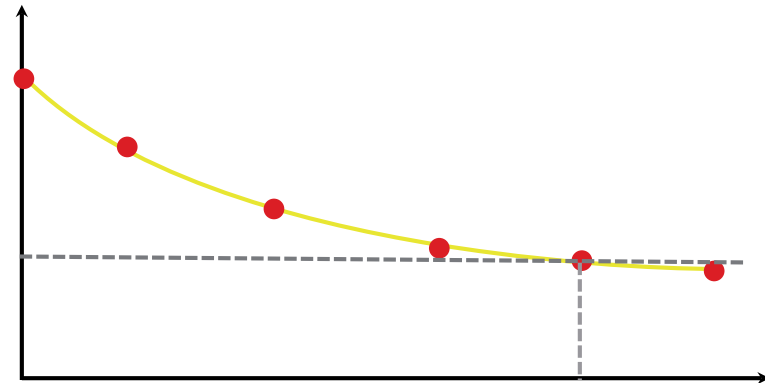
UV Humidité Radioactivité Température



Mémoire optique



Paramètre
fonctionnel



Temps de vie

- Facteurs de vieillissement :

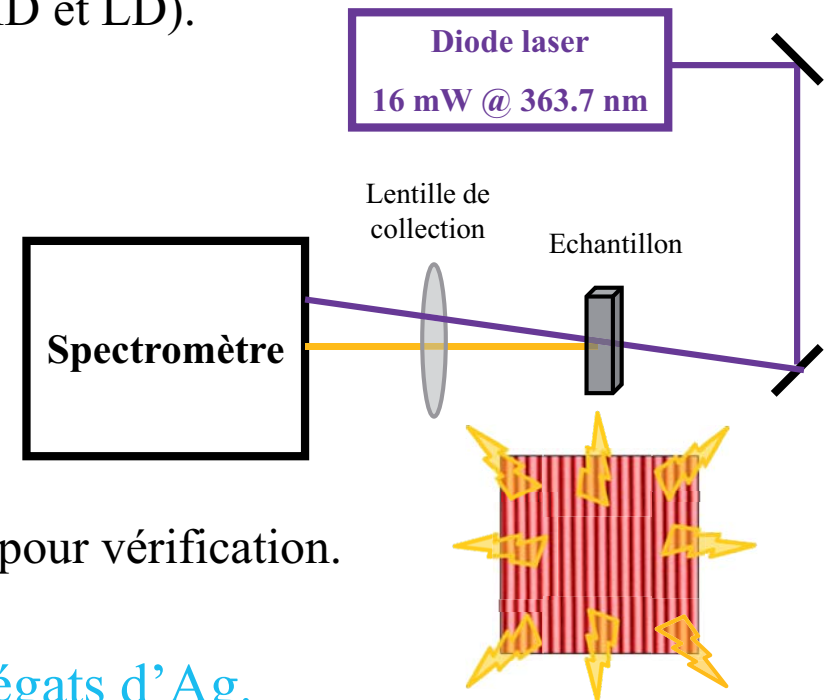
- Processus de **diffusion des espèces**.
- Modification locale du **champ cristallin** (relaxation de contraintes).
- **Défauts** (centres colorés, etc...).

- Objectifs :

- Détermination des **lois de dégradation** (Physique des défaillances).
- Estimation de la **durée de vie** en fonction des **contraintes environnementales**.
- Séparation de **l'impact de chacune des contraintes** sur le dispositif.

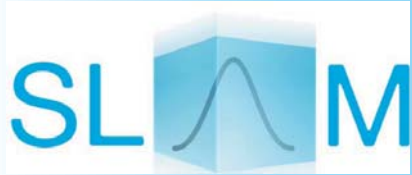
- Protocole :

- ▶ Deux échantillons contenant deux motifs de 2 mm × 2 mm inscrits par laser femtoseconde avec deux intensités différentes (HD et LD).
- ▶ Vieillissement en étuve à 100°C.
- ▶ Mesures des spectres d'émission à :
 - t_0 .
 - $t_1 = t_0 + 168$ h (1 semaine).
 - $t_2 = t_1 + 500$ h (3 semaines).
 - $t_3 = t_2 + 1000$ h (6 semaines).
 - $t_4 = t_3 + 1500$ h (9 semaines).
- ▶ Mesure du spectre d'un échantillon de référence pour vérification.



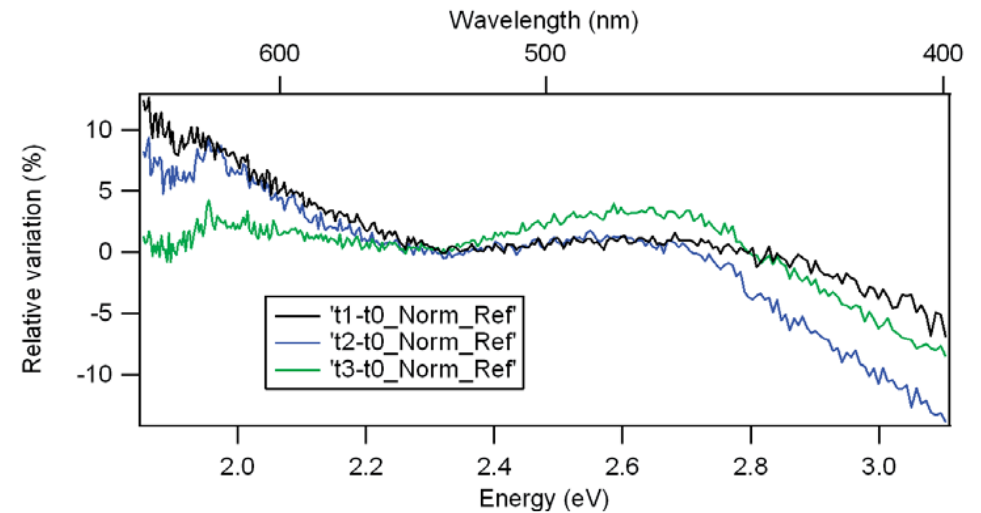
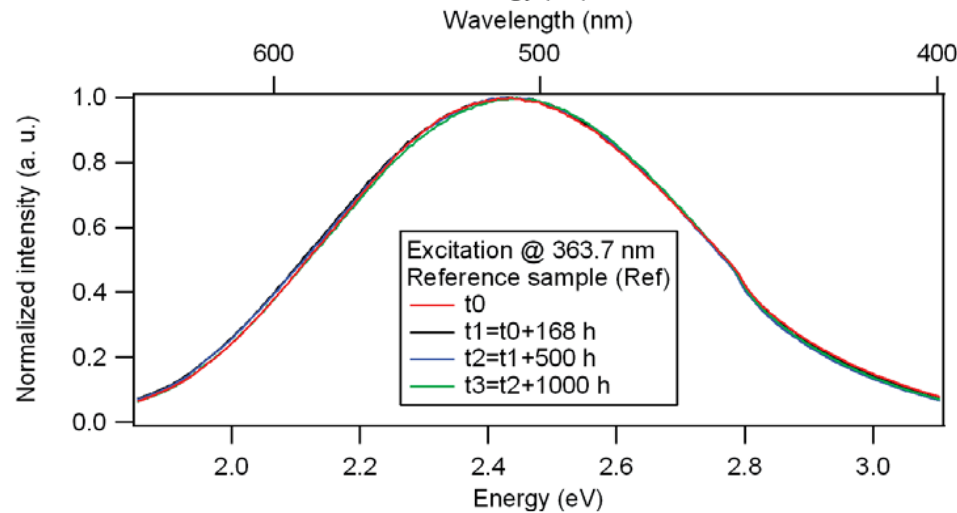
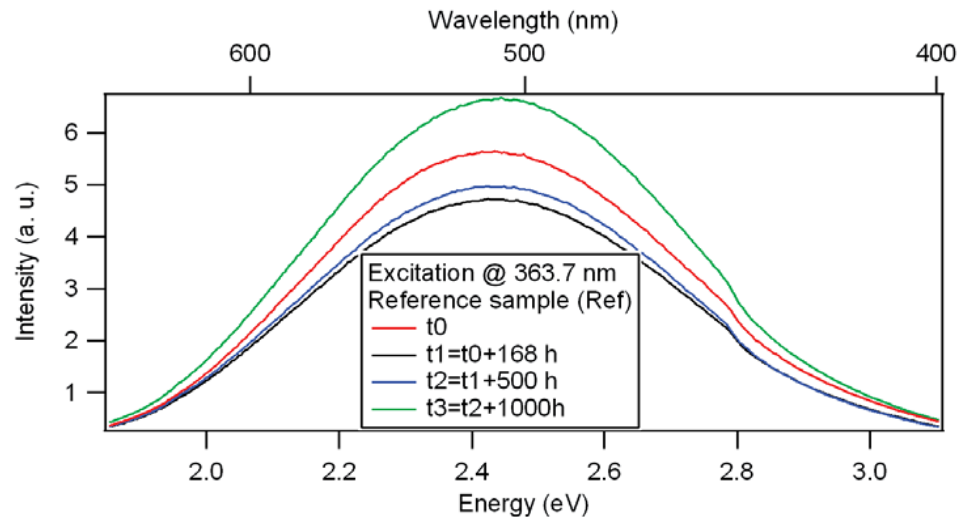
- Paramètre fonctionnel : fluorescence des agrégats d'Ag.

- ▶ Intensité.
 - Diffusion des agrégats → Modification du champ électrique.
- ▶ Forme du spectre.
 - Stabilisation, dissociation, croissance des agrégats →
- ▶ Durée de vie.
 - Modification des bandes spectrales associées.

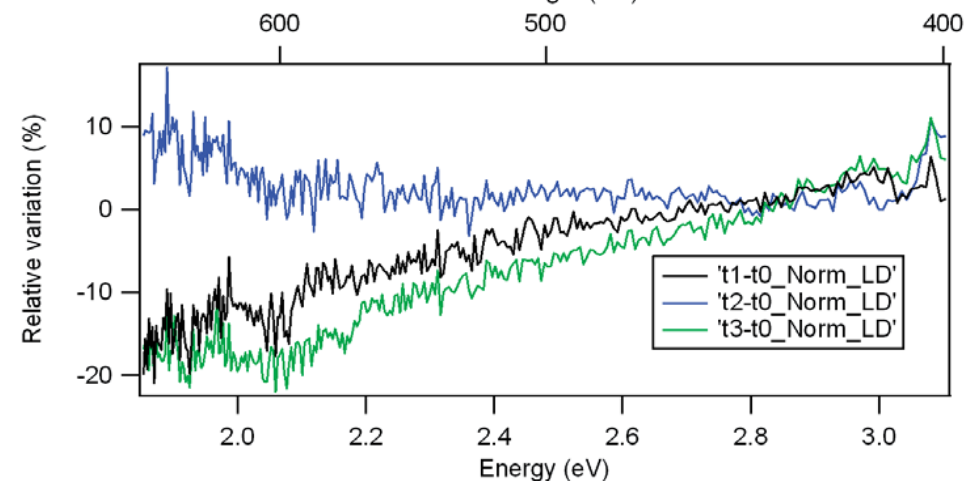
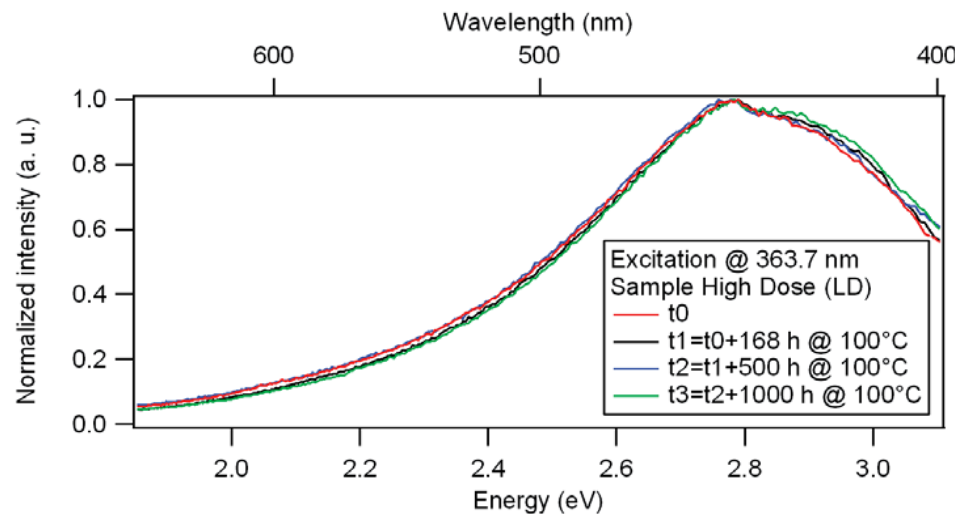
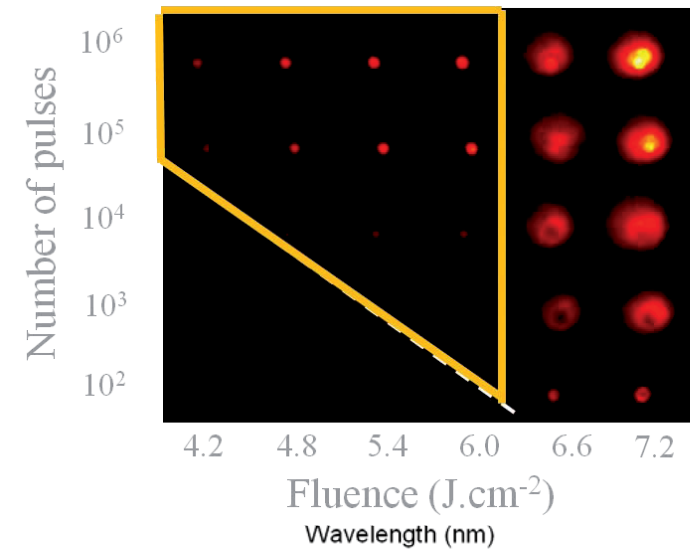
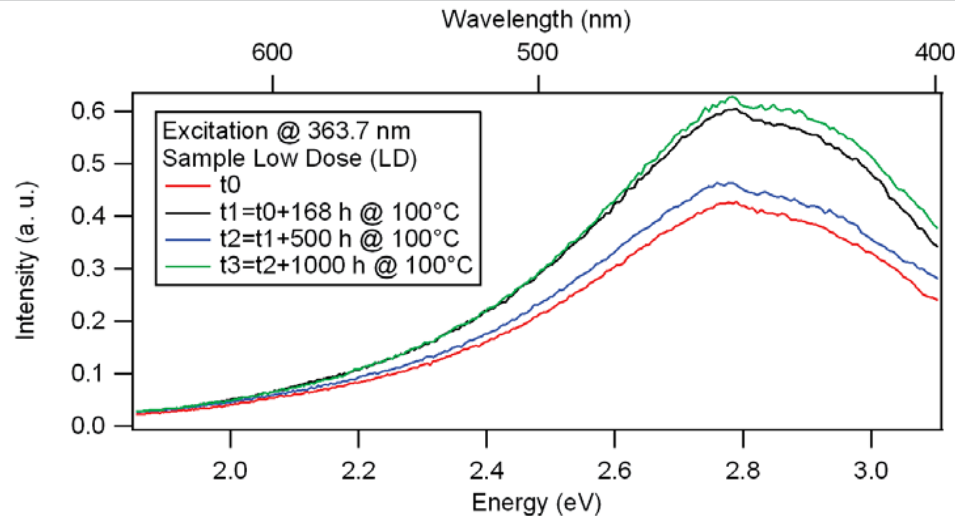


Echantillon de référence

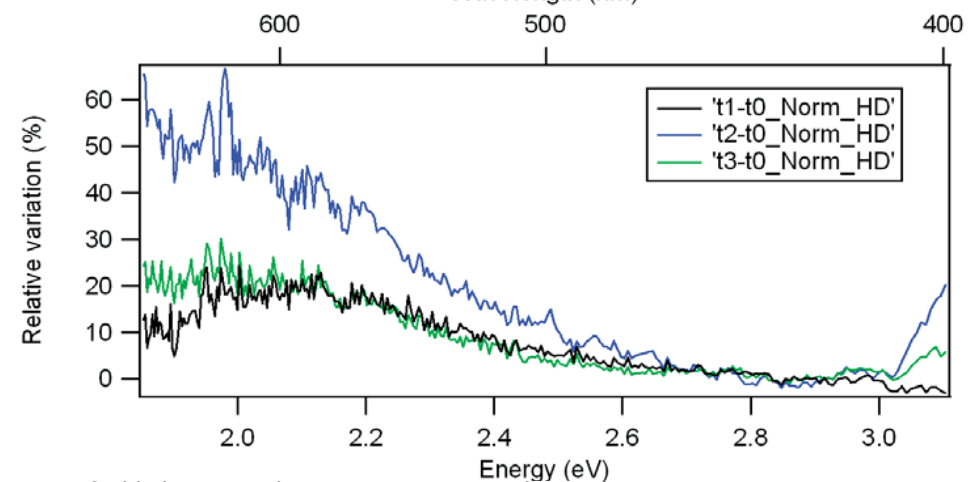
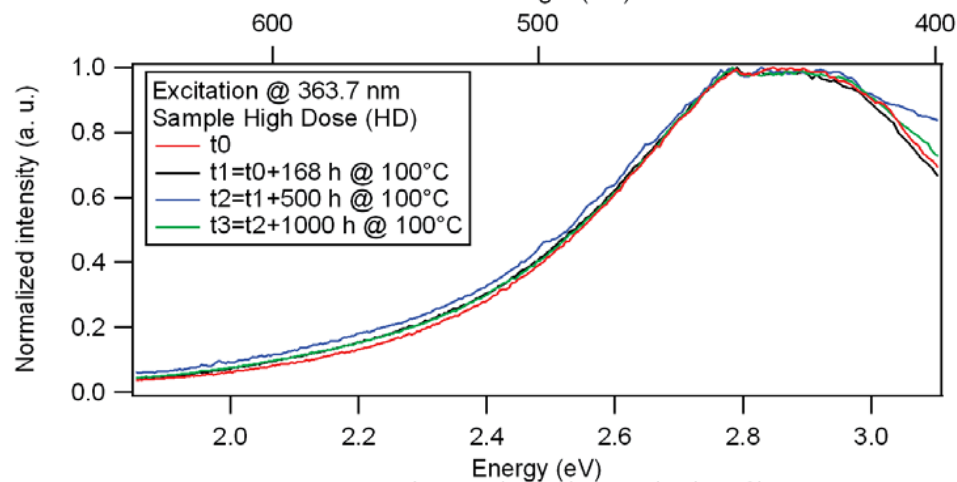
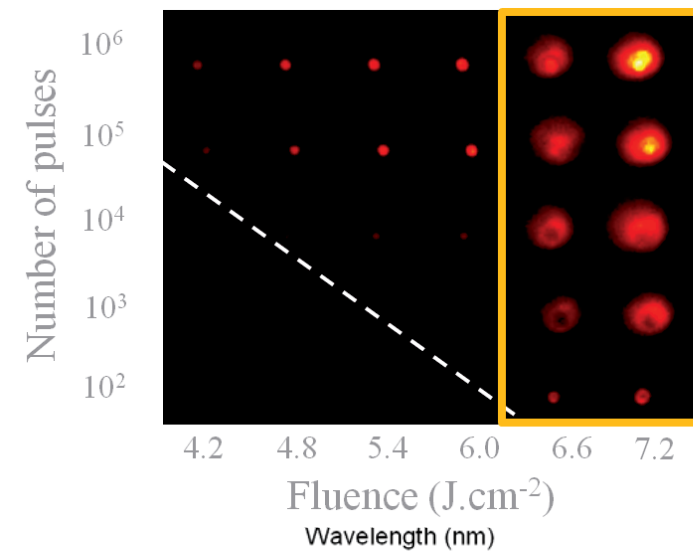
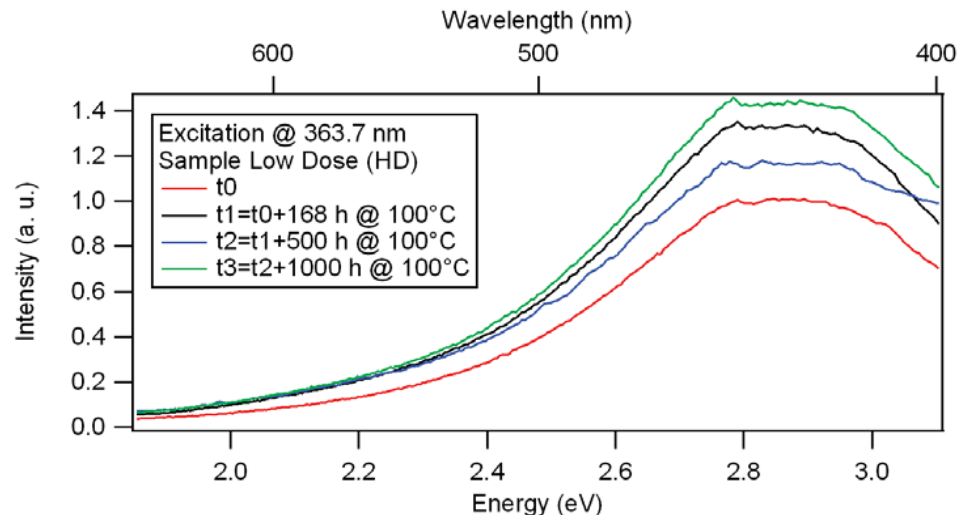
- Echantillon de référence
= verre coloré FGL400 (Thorlabs).



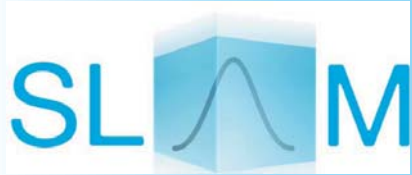
- Erreur de répétabilité = $\pm 15\%$.
- Nécessité d'avoir un **échantillon de référence homogène et stable**.



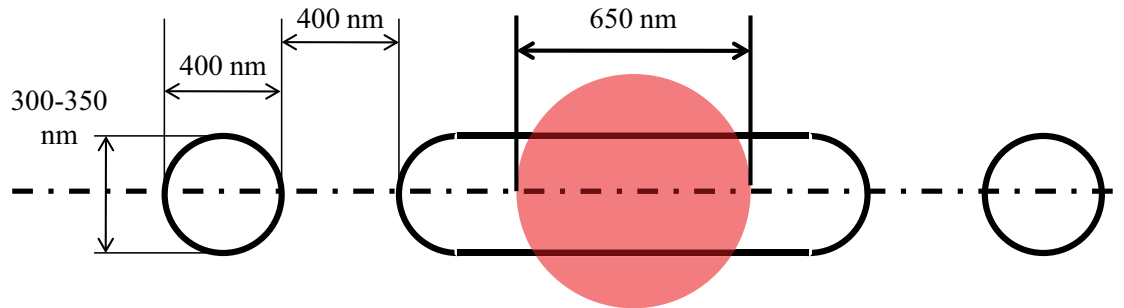
- Aux incertitudes de mesures près, le spectre n'a pas changé.
- Aucune tendance de dégradation ne peut être dégagée.



- A t_2 , augmentation du signal de fluorescence aux faibles et hautes énergies.
- Cette caractéristique n'est pas observée à t_3 .
- Aucune tendance de dégradation ne peut être dégagée.



Inscription de motifs au format DVD



DVD :

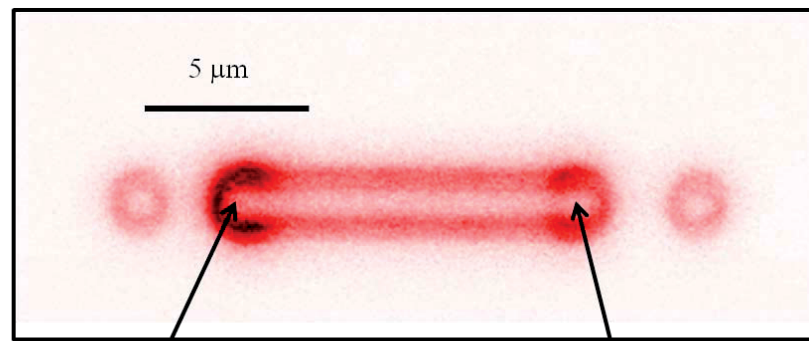
Largeur micro-cuvette ~ 350 nm.

Longueur min micro-cuvette ~ 400 nm.

Laser :

Diamètre d'un anneau $\sim 1.5-2$ μm .

Longueur min ligne ~ 2 μm .

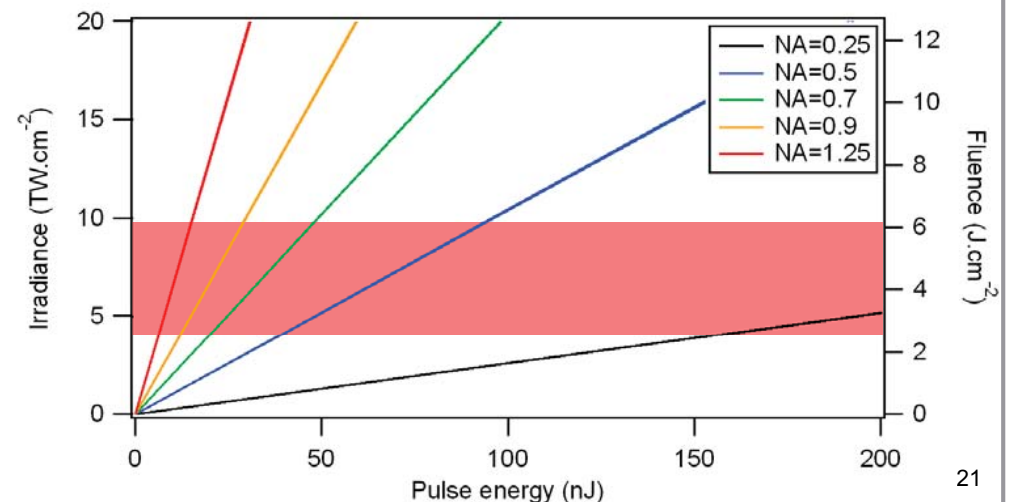


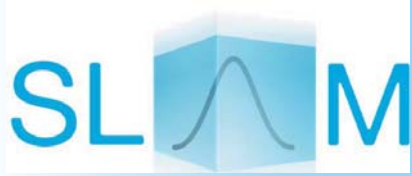
Accélération platine

Décélération platine

Pourquoi de plus grandes ouvertures numériques ne permettent pas de diminuer la taille des motifs ?

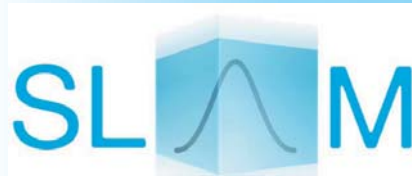
- Rétrécissement de la zone de travail en énergie.
- Gradient thermique plus important.





Conclusions

- **Fiabilité et vieillissement :**
 - ▶ Après 4 mois dans une étuve à 100°C, la fluorescence des agrégats d'Ag n'a quasiment pas varié, aux incertitudes de mesures près.
 - ▶ Difficulté d'effectuer des mesures quantitatives sur des structures micrométriques et sur une si longue période. Nécessité d'avoir :
 - Une expérience dédiée à cette mesure particulière.
 - Un dispositif de vieillissement incorporé au banc expérimental pour ne pas avoir à bouger l'échantillon.
 - Un échantillon de référence homogène et qui ne vieillit pas pour mesurer la dérive des instruments.
- **Ecriture de motifs au format DVD :**
 - ▶ Motifs inscrits par laser plus grands que ceux au format DVD.
 - ▶ Prochaine étape pour améliorer la résolution de l'écriture laser → Mise en forme spatiale du faisceau.



Remerciements



PICS Grant 3179



Grant ANR-05-BLAN-0212-01



GIS AMA

