

Laboratoire Lasers Plasmas et Procédés Photoniques
UMR 6182 CNRS - Université de la Méditerranée - Campus de Luminy C917 - 13288 Marseille Cedex 09, FRANCE

Laser - Applications & Procédés Innovants

Marc Sentis

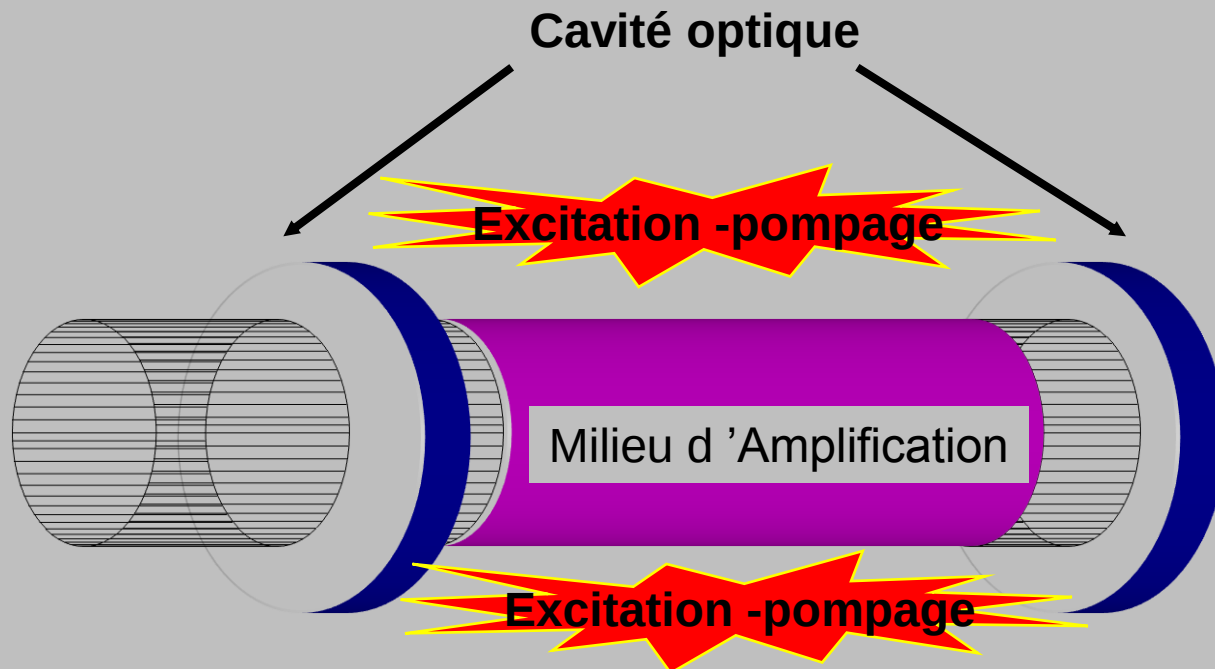
<http://www.LP3.univ-mrs.fr>

50 ans du laser - Marseille 29 Mai 2010

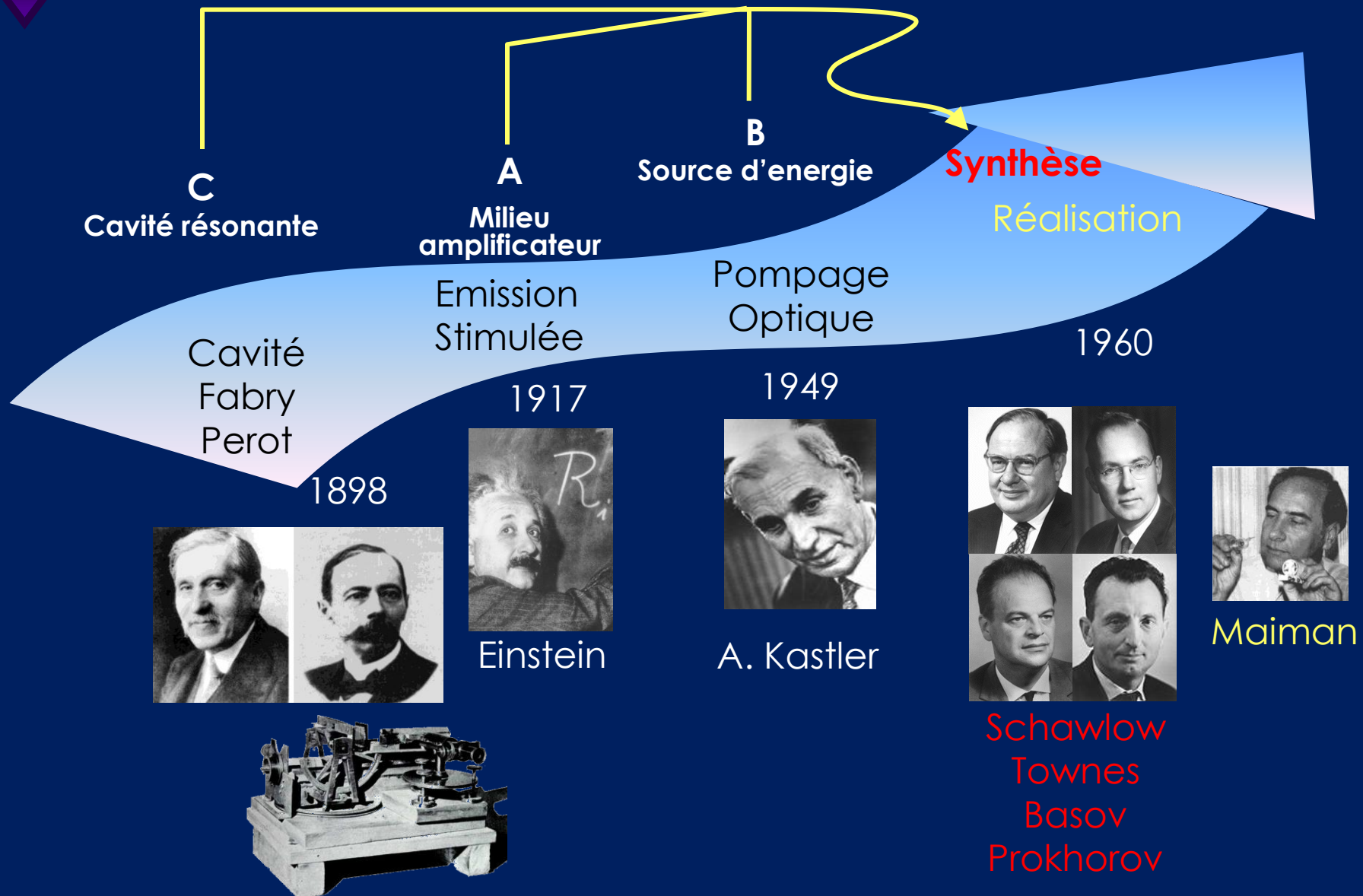


Qu'est ce qu'un Laser ?

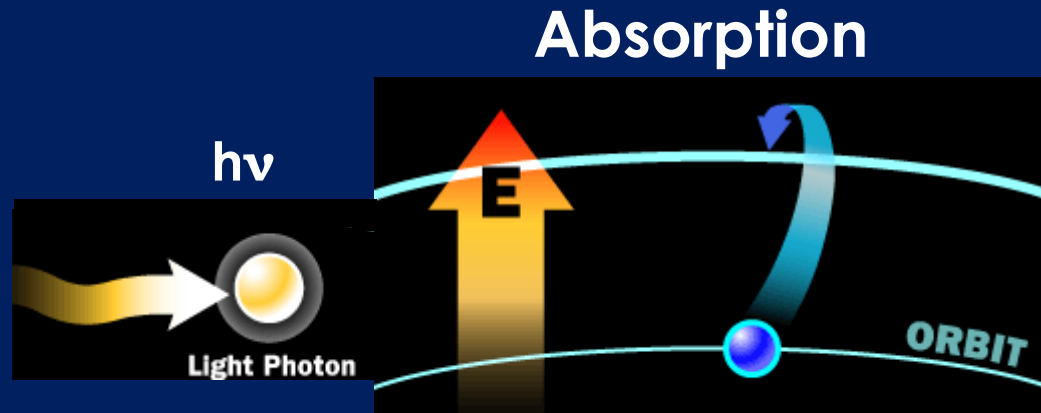
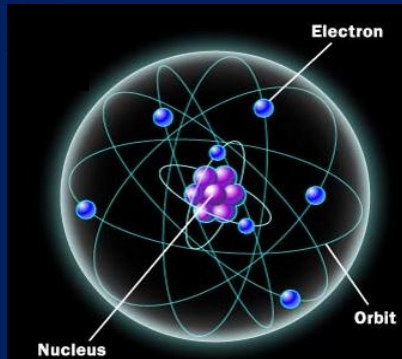
- **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation
- Concentré de **Physique Fondamentale** (Mécanique Quantique) et de **Physique Appliquée** (Ingénierie)



Laser un concentré de découvertes

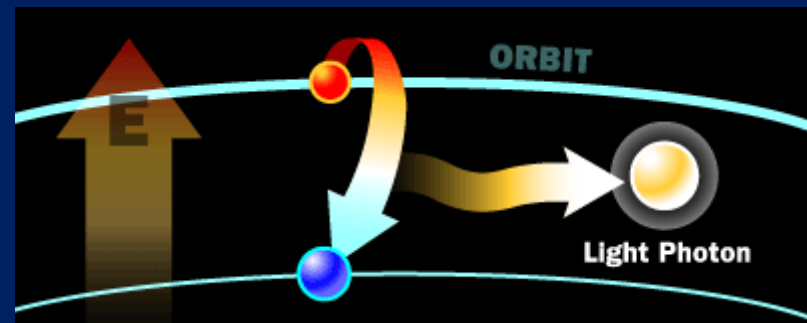


A. Le milieu amplificateur



Mécanismes
“classiques”

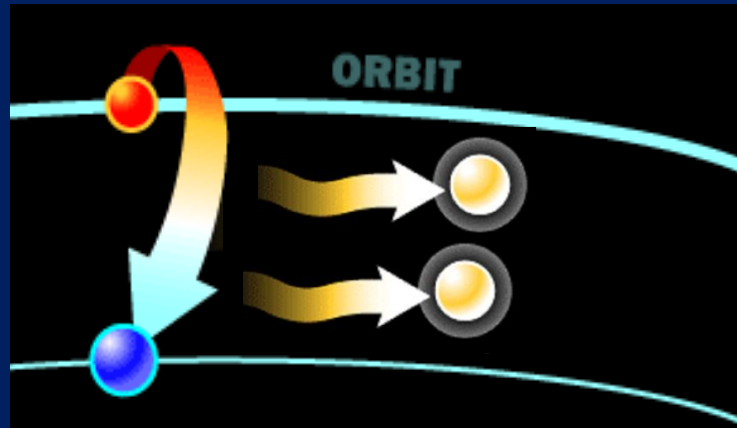
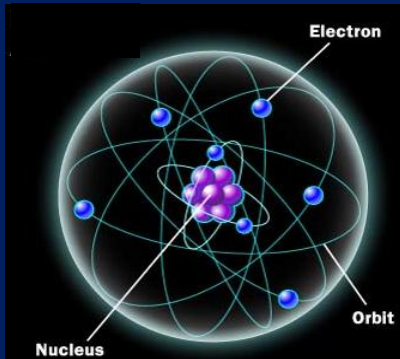
Emission spontanée (temps τ)



L'émission stimulée



Emission stimulée → Amplification



- Même direction de propagation
- 2 ondes en phase
- Même état de polarisation

Conditions :

- Energie du photon incident ($h\nu$) = Energie du niveau haut – énergie du niveau bas (ΔE)
- $N_{\text{atomes excités}} > N_{\text{atomes dans le niveau fondamental}}$

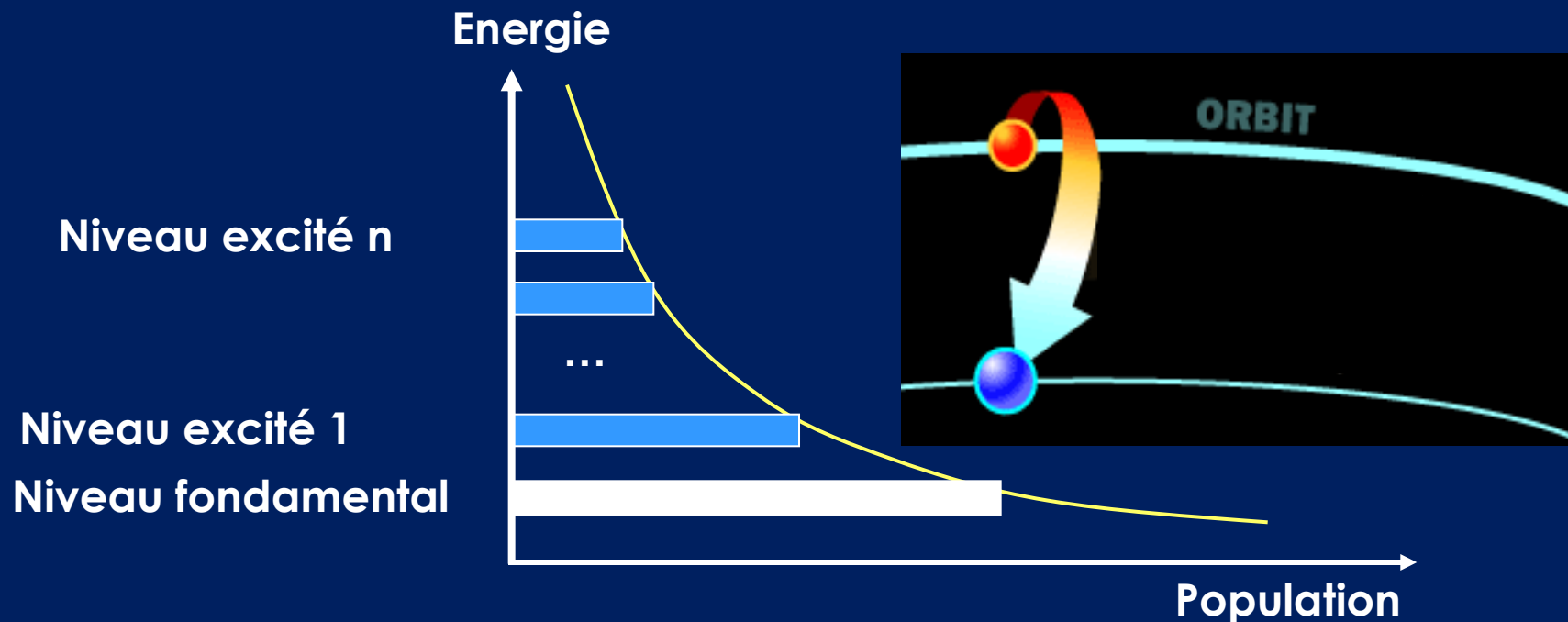


“Inversion de population” indispensable



L'inversion de population

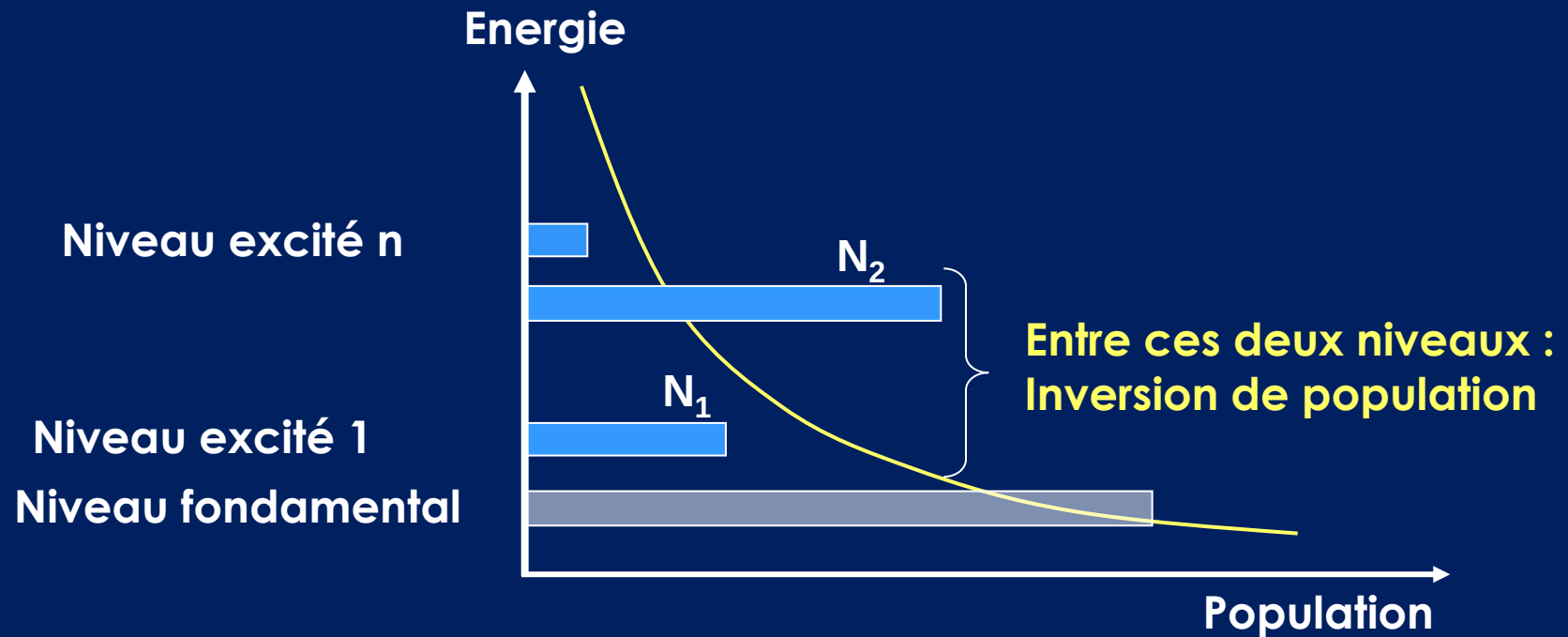
- Etat stable : populations régies par la statistique de Boltzmann



Il faut **FORCER** l'inversion de Population en **POMPANT** le milieu

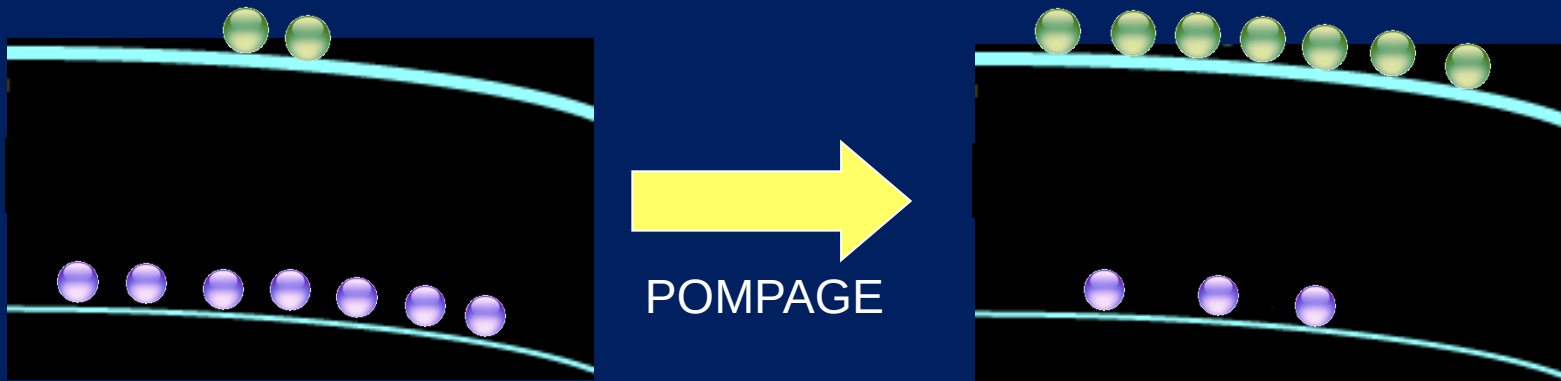


L'inversion de population



B. Le pompage

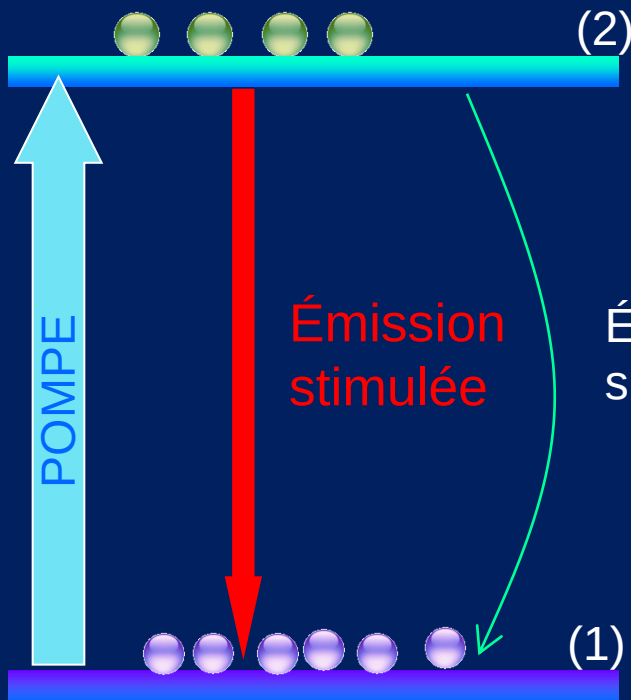
- Le pompage peut être **optique** (absorption de photons) **ou électrique** (états excités créés suite à des collisions dans une décharge électrique par ex)
- Excitation extérieure apporte l'énergie nécessaire au transfert d'une majorité d'atomes dans l'état excité



Emission STIMULEE possible

Le milieu est alors **AMPLIFICATEUR**

Un laser à 2 niveaux ?



Résultat de physique atomique (Einstein 1917):

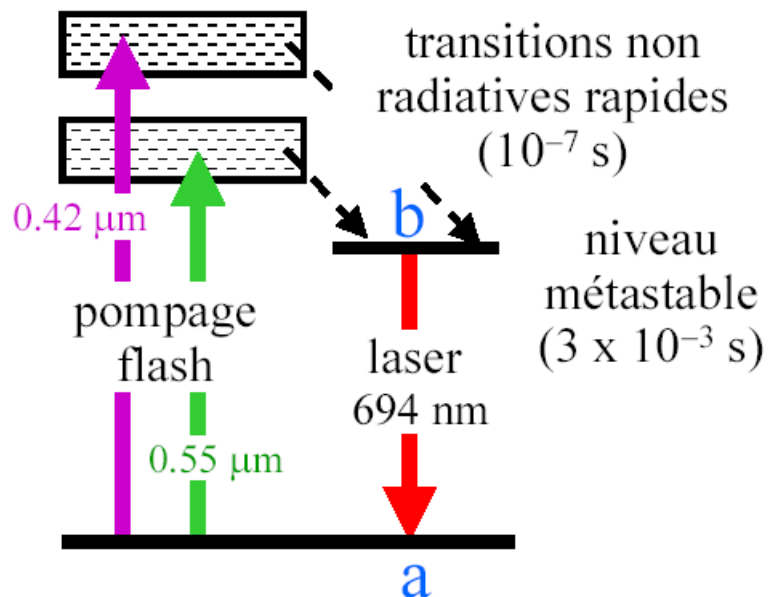
« Pour une transition donnée **la probabilité d'émission stimulée** (pour 1 atome dans l'état excité éclairé par 1 photon) **est égale** à la **probabilité d'absorption** (pour 1 atome dans l'état fondamental éclairé par un photon) »

Donc : il est impossible en pompant une seule transition atomique d'obtenir une inversion de population $N_2 > N_1$

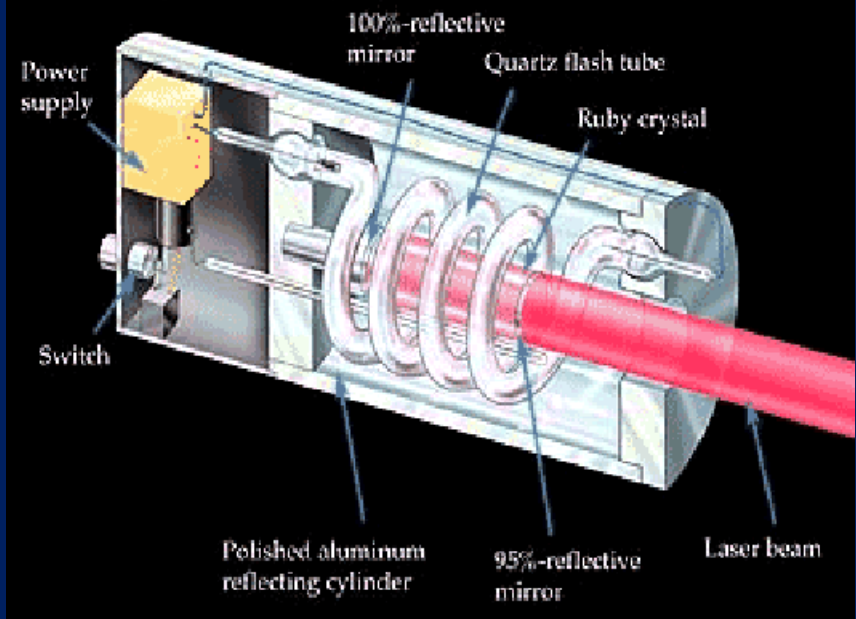
Au maximum (fort pompage) : $N_1 = N_2$

Systeme à 3 niveaux : exemple

Rubis : ion Cr^{3+} en substitution de Al^{3+} dans matrice d'alumine

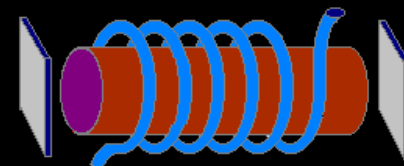


Components of the first ruby laser



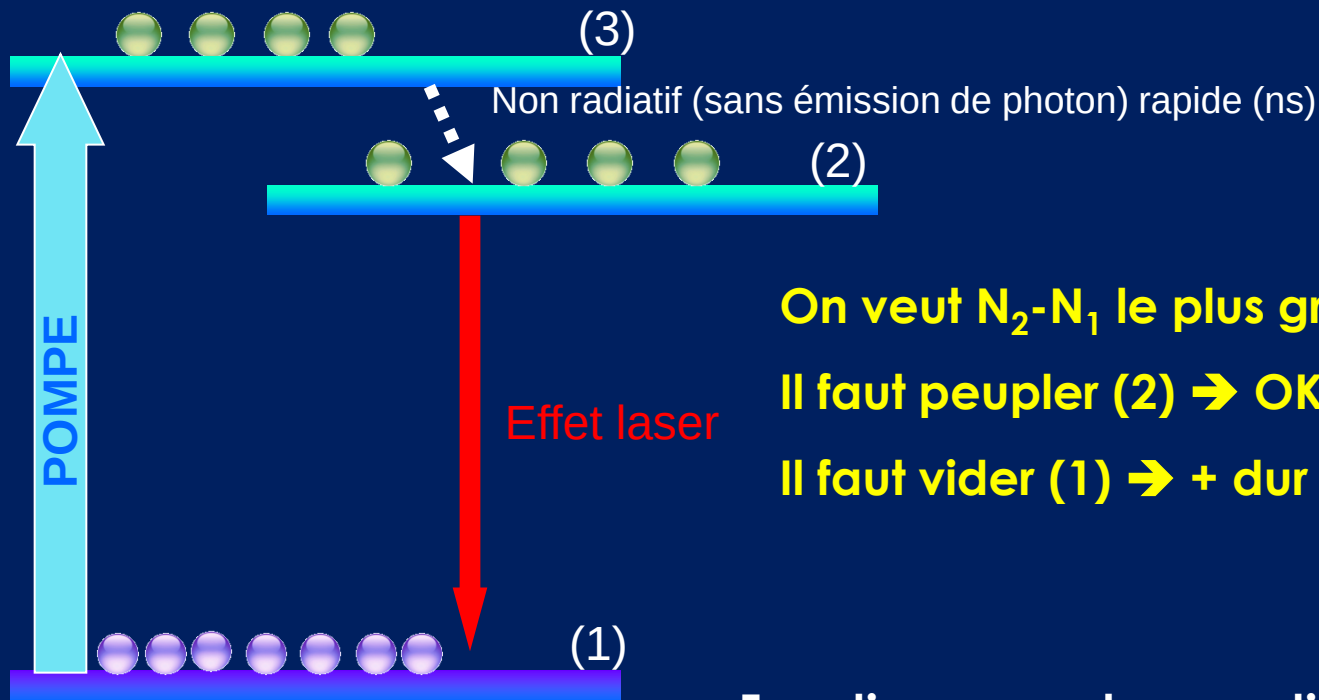
Th. Maiman, 1960

(Impulsionnel μs)



Systeme à 3 niveaux

Inversion de Population difficile !



On veut $N_2 - N_1$ le plus grand possible :

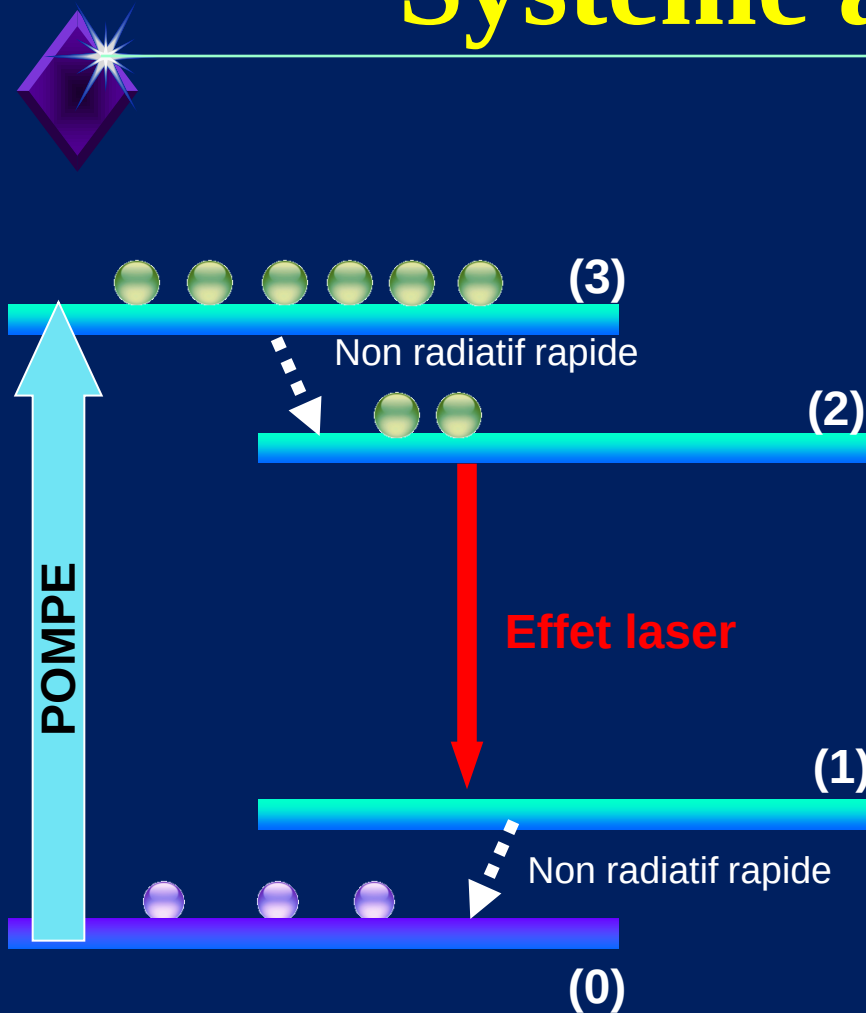
Il faut peupler (2) → OK

Il faut vider (1) → + dur !! (niveau fondamental)

Fonctionnement en continu difficile à atteindre (le niveau (1) se repeuple dès que le laser marche !)

Il existe un seuil de transparence (il faut pomper pour atteindre $\Delta N = 0$)

Systeme à 4 niveaux



Inversion de Population facile !

Il faut peupler (2) → OK

Il faut vider (1) → OK (vite dépeuplé vers (0))

Rq : Dès que le pompage est actif ($N_2 \neq 0$) l'inversion de population est atteinte ($N_1 = 0$)

Fonctionnement en continu possible

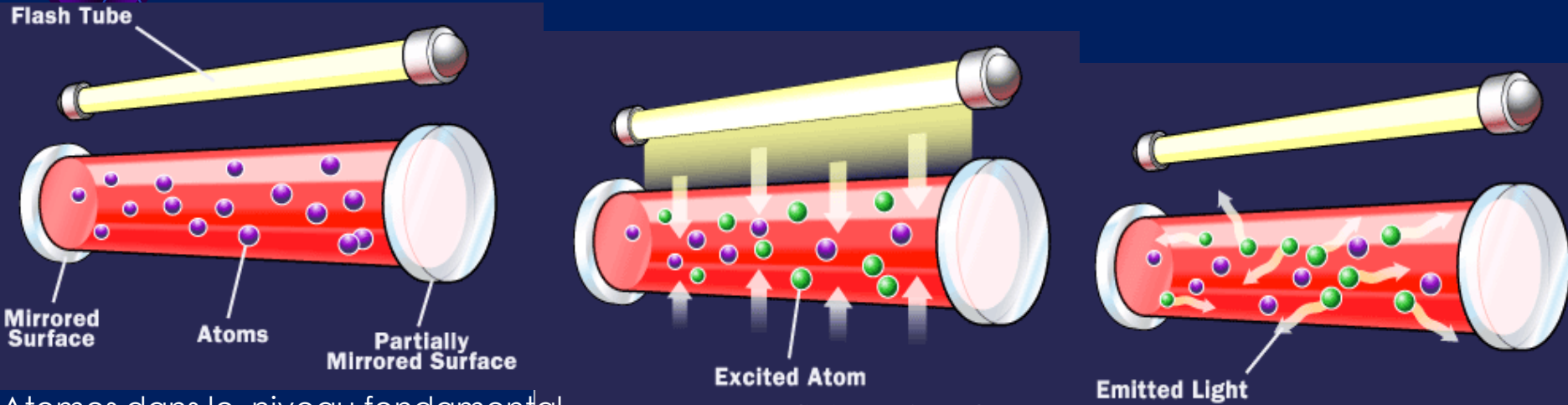
Pas de seuil de transparence

C. La cavité



Milieu amplificateur

Laser : principe de fonctionnement

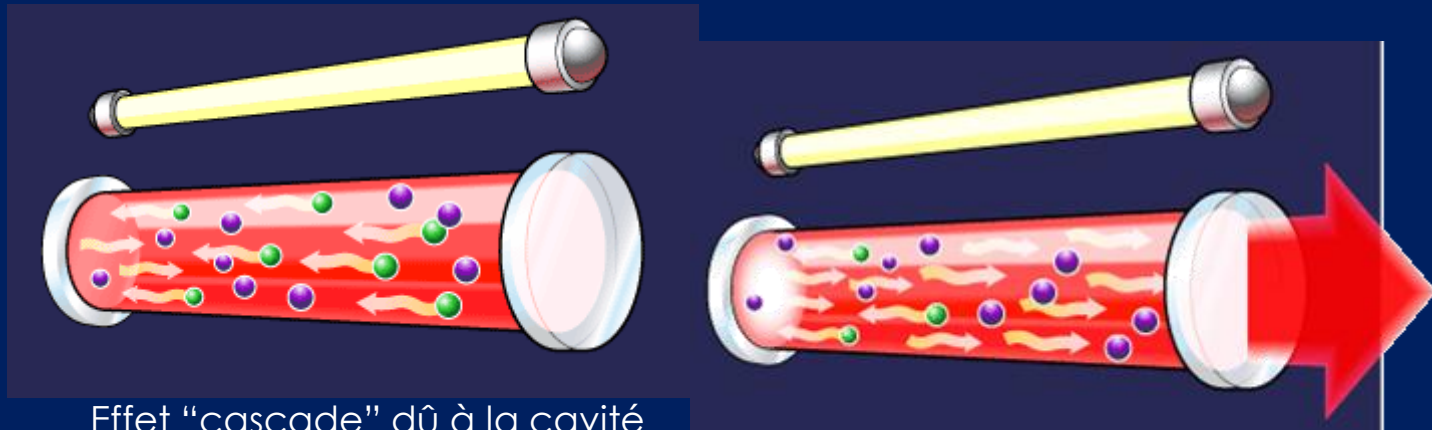


Atomes dans le niveau fondamental

Pompage (ici par flash)

Atomes portés en majorité dans le niveau excité

Emission spontanée/stimulée



Effet "cascade" dû à la cavité

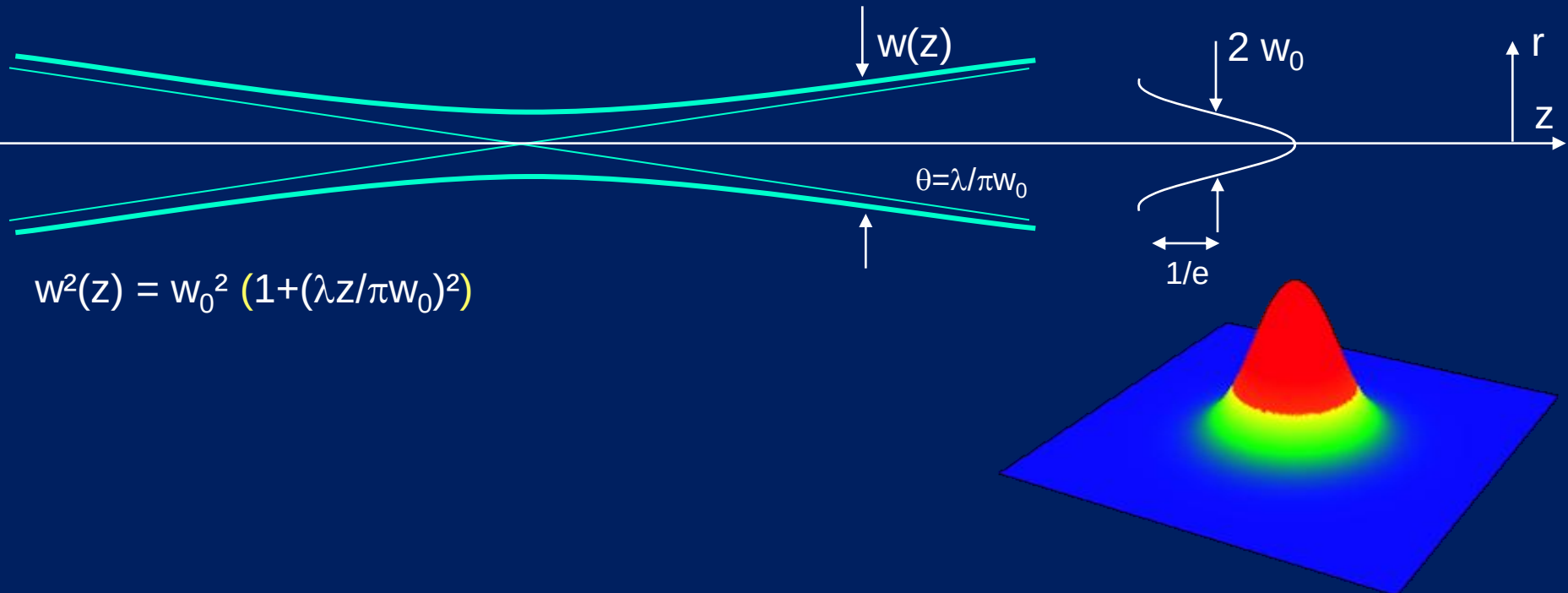
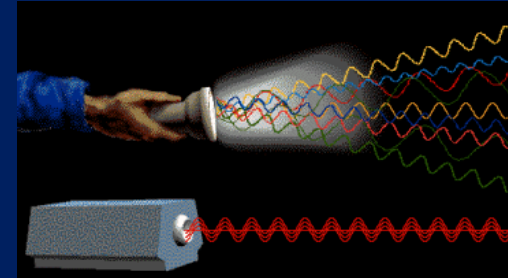
Emission à travers un des miroirs

L'Emission LASER

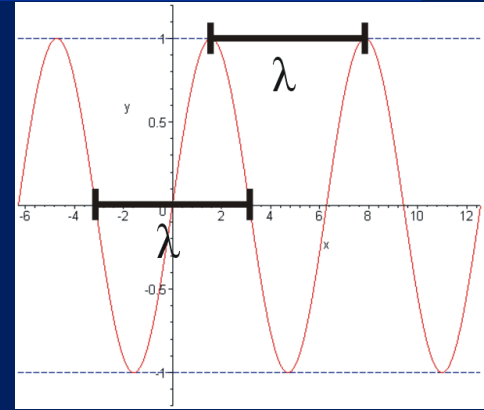
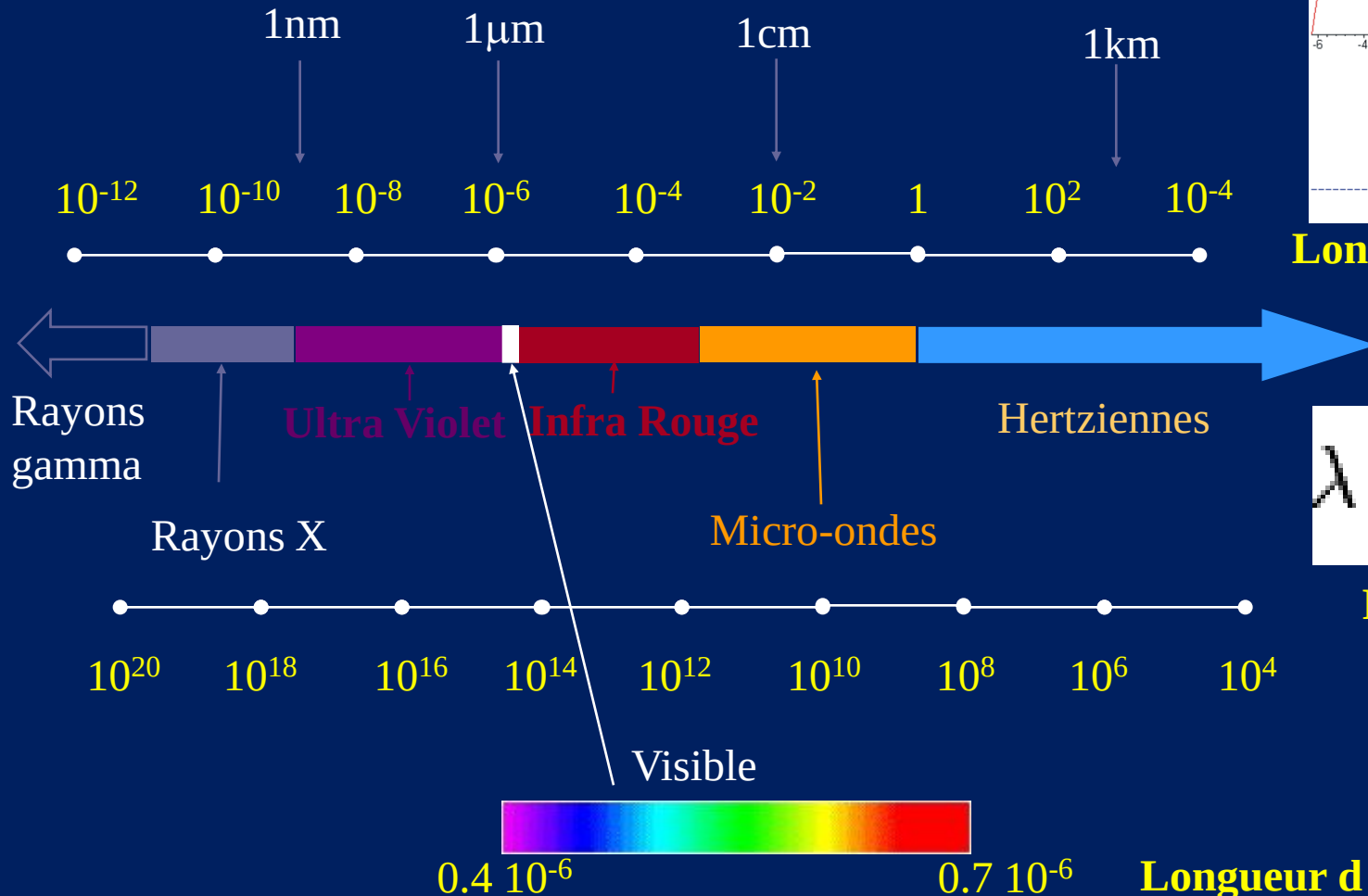


- Propriétés SPATIALES

- Faisceau très directif, collimaté (divergence très faible)
- Profil Gaussien en général



Spectre électromagnétique



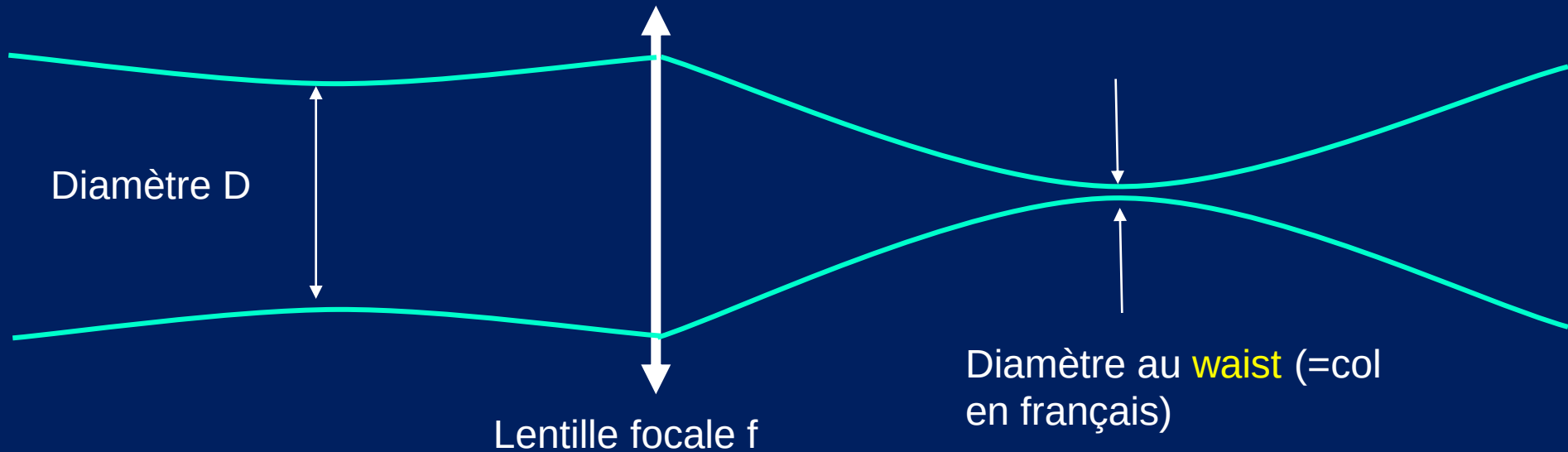
Longueur d'onde λ (m)

$$\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$$

Fréquence ν (Hz)

Longueur d'onde λ (m)

Propriétés de l'émission LASER



Diamètre au **waist** (=col en français)

$$\Phi = 4\lambda f / \pi D$$

Ordre de grandeur : si $f \sim D \rightarrow \Phi \sim \lambda$

Focalisation sur des très petites dimensions (surface min $\sim \lambda^2$)

→ Conséquence de cette concentration dans l'espace :
Densités de Puissance énormes !

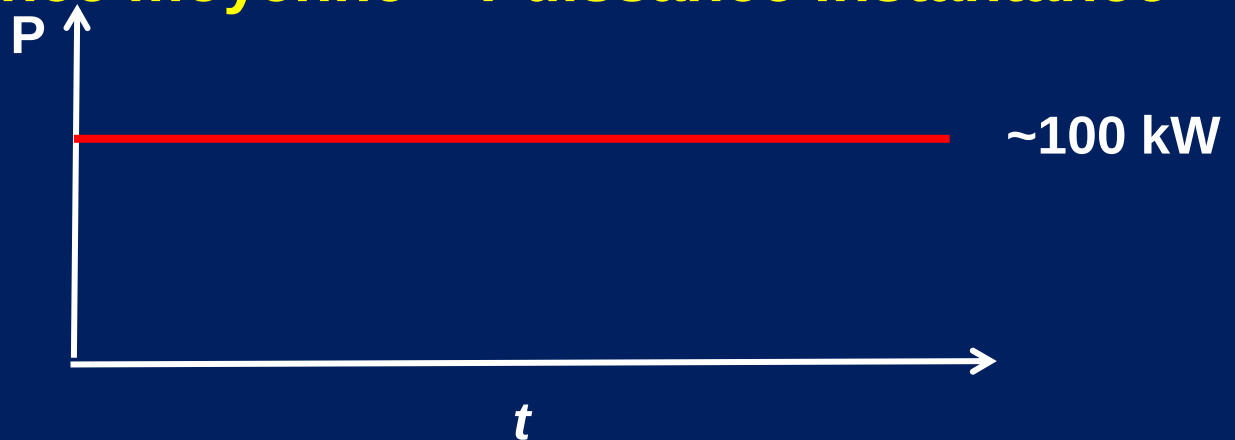
Ordre de grandeur : laser 10 W à $\lambda = 500$ nm (vert) :
densité de puissance max au waist (=Puissance/surface) =
 $10 / (0,5 \cdot 10^{-6})^2 = 4 \text{ GW/cm}^2$

Puissance (s) Laser

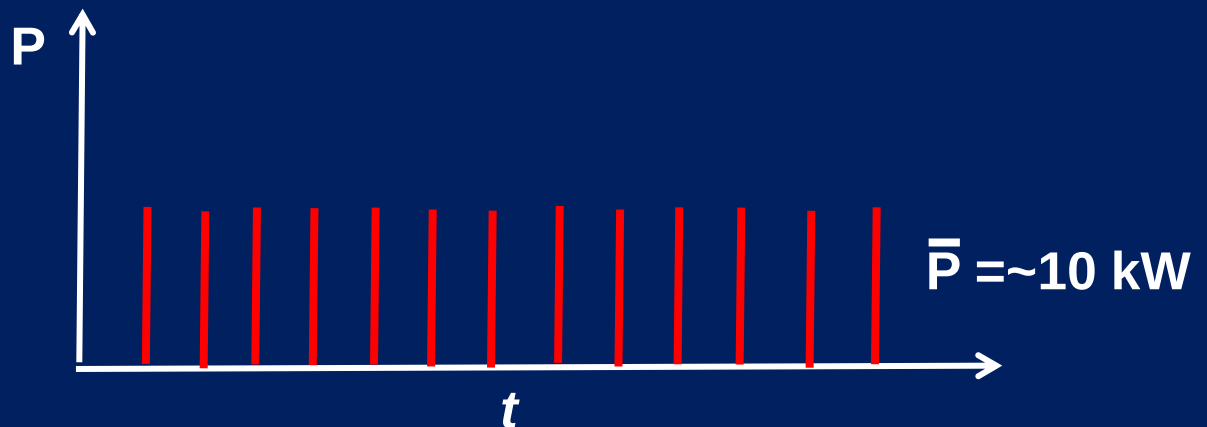
Puissance moyenne – Puissance instantanée



Laser
continu



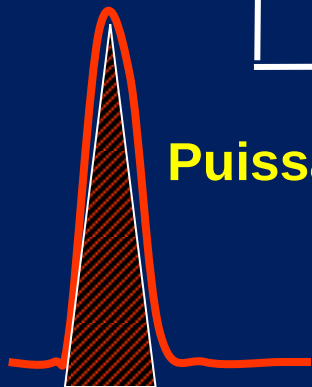
Laser
impulsionnel

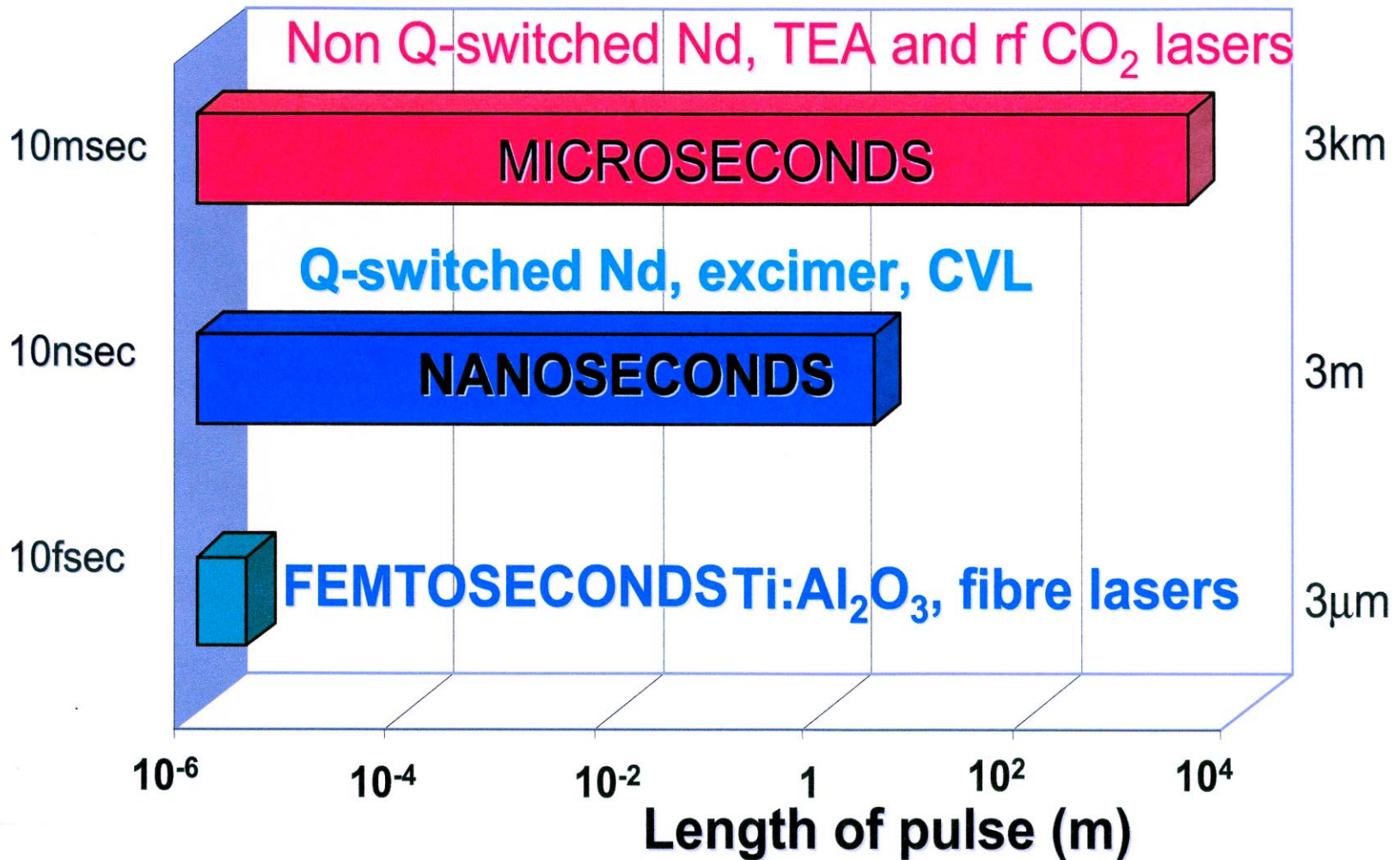


Puissance instantanée = E/τ 10^{15} W (100 J - 10 fs)

E = énergie

τ = durée de l'impulsion





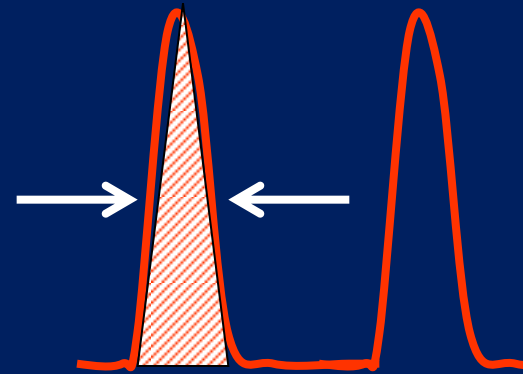
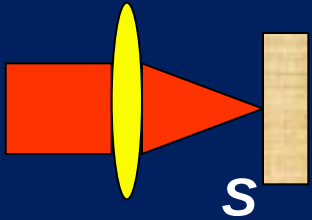
Les régimes d'interaction laser-matière

$$I = E / (S \times \tau)$$

E = énergie

τ = durée de l'impulsion

S = tache focale

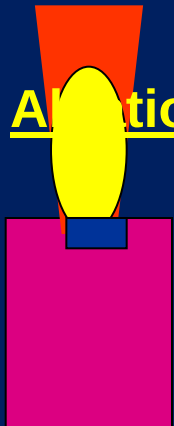


Diffusion

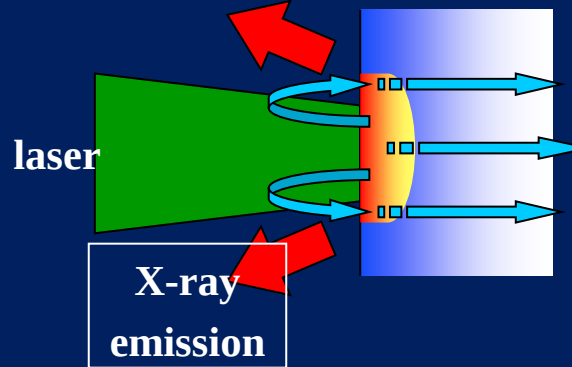


10^3 W/cm^2

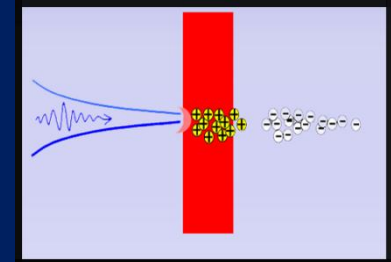
Ablation



Production X



Production de proton



10^{22} W/cm^2

1 fs = 10^{-15} s - 1 ps = 10^{-12} s

Stroboscopie

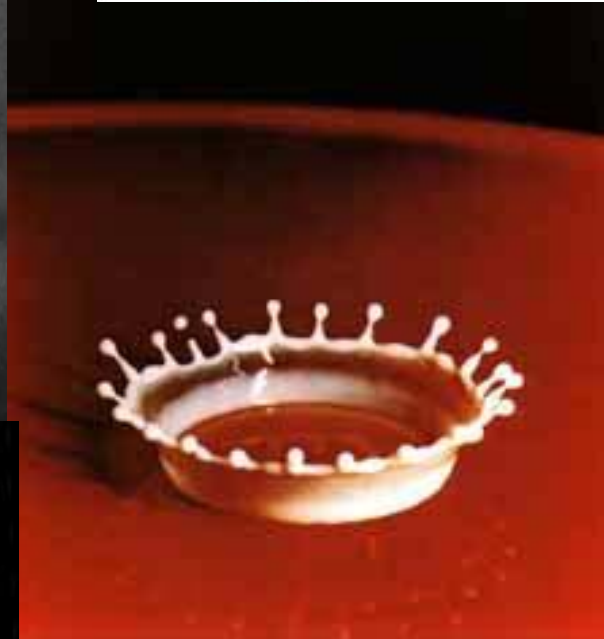
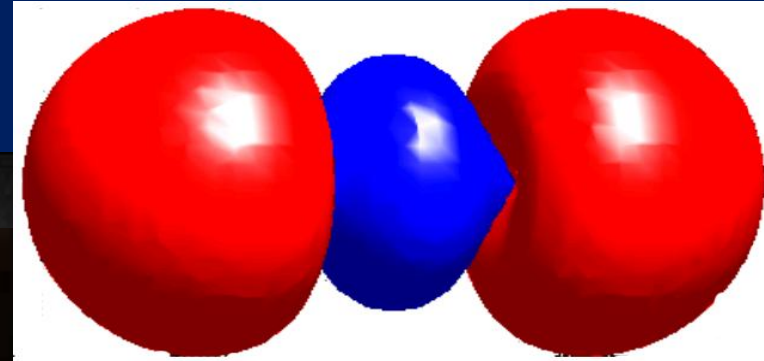
2004



1960



1880





Les Lasers une course vers les très hautes intensités

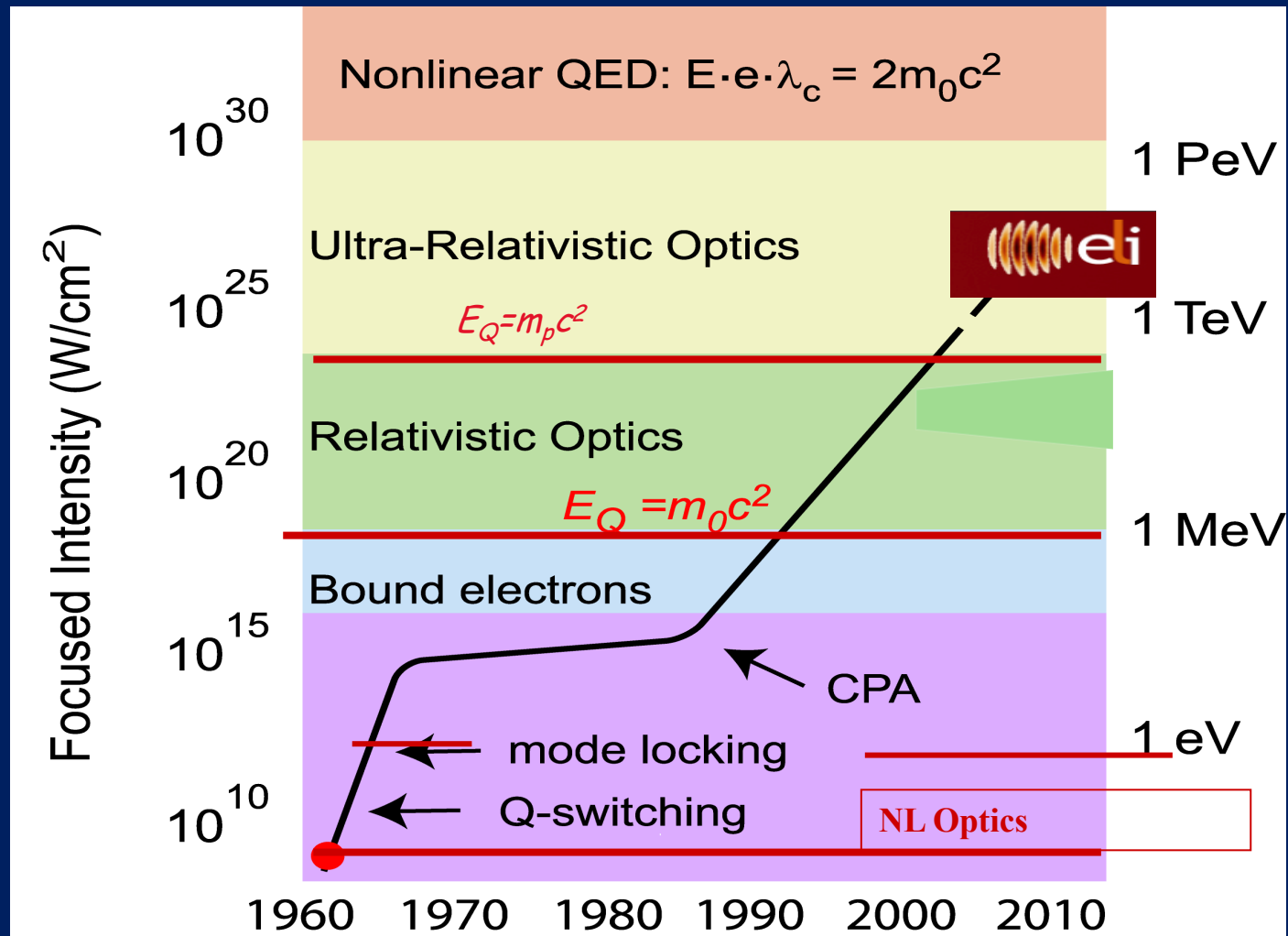
Zetta : 10^{21}

Exa : 10^{18}

Peta : 10^{15}

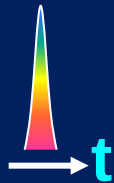
Tera: 10^{12}

Giga : 10^9



1985 Le concept

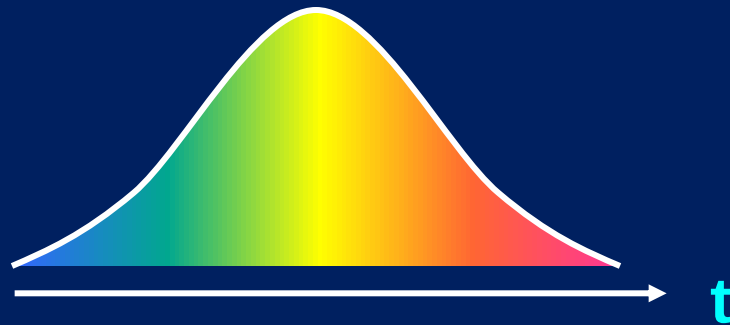
fs oscillateur



étireur



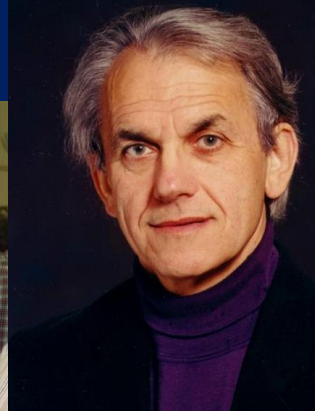
amplificateur



compresseur



Strickland & Mourou, *Opt. Comm.* 56, 219, (1985)

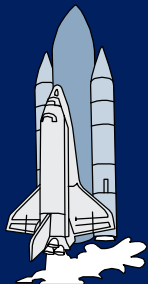


Aujourd'hui les lasers sont les systèmes les plus puissants sur terre



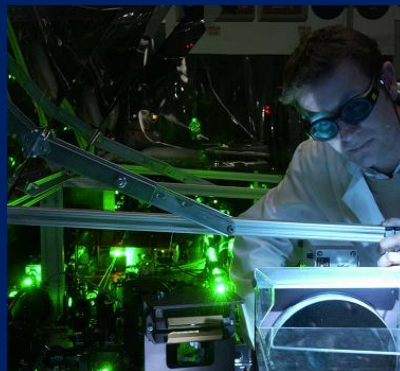
10 000 000 000 W

10^{10} W



x 100 =

10^{12} W



UHI10 / CEA

x 1000 =

10^{15} W



1 million power stations



NOVA PW
LLNL

200 000 W



1 000 W



400 W



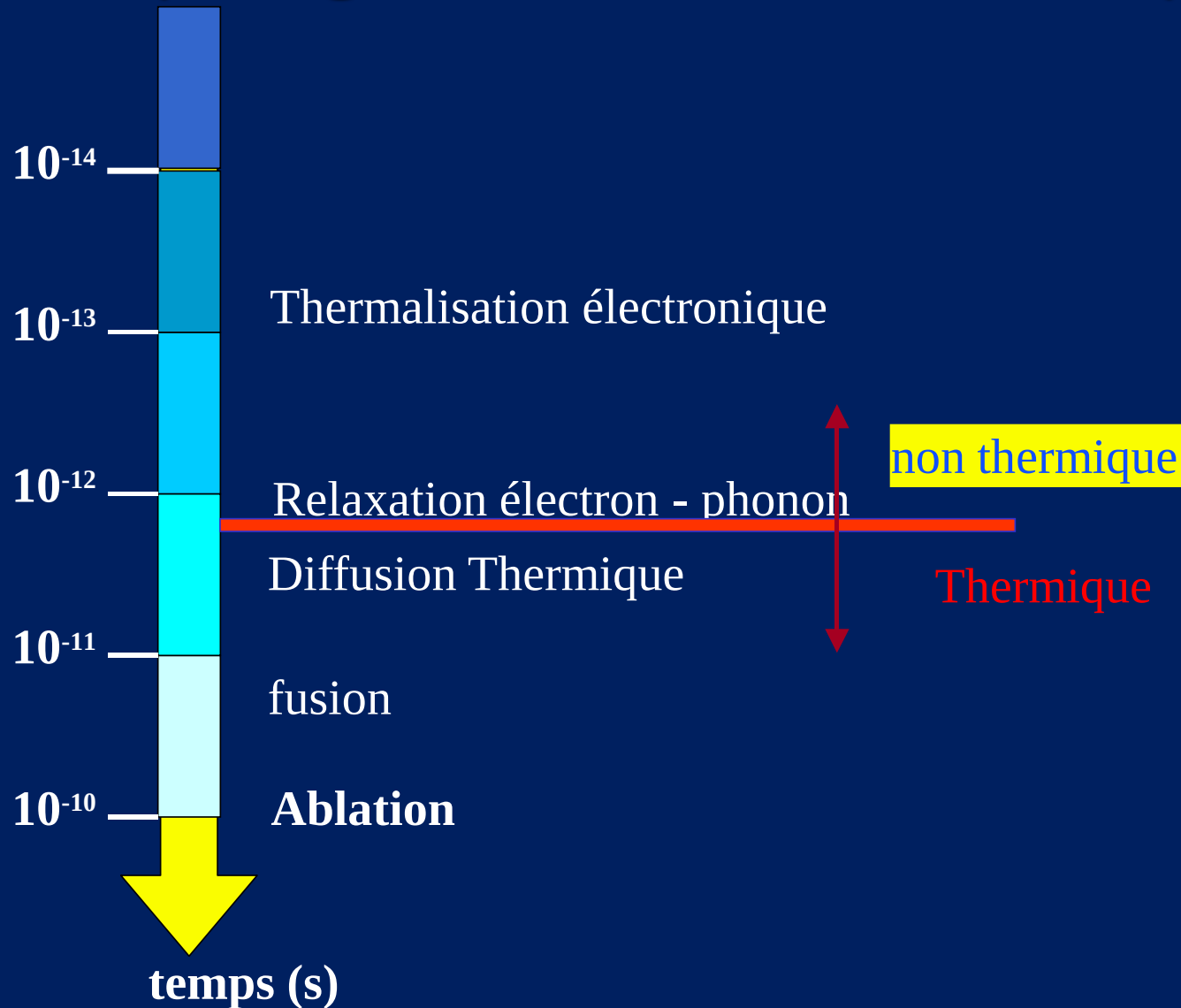
150 W



60 W



Quelques grandeurs caractéristiques



Zepto : 10⁻²¹

Atto : 10⁻¹⁸

Femto : 10⁻¹⁵

Pico : 10⁻¹²

Nano : 10⁻⁹

Sources laser : cw, impulsionnels (ms, μ s), courts (ns), ultra-courts (ps, fs, as)



Mécanismes d'ablation laser

👉 laser

- *** longueur d'onde λ_{las}
- *** Energie F_{las}
- *** durée d'impulsion τ_{las}
- ** qualité de faisceau
- * fluctuations spatio-temp

laser

longueur de pénétration optique

$$\delta_{opt} = \alpha^{-1}$$

👉 matériau

réflectivité R
coefficient d'absorption, α
conductivité thermique, K_{th}
capacité calorifique, C_p
températures T_{fus} , T_{vap}
chaleurs latentes H_{fus} , H_{vap}

👉 environnement

air, gaz inerte, vide, liquide



mique

Les Applications Laser :



entre fantasmes et réalité économique



ell labs);

CO_2

re -

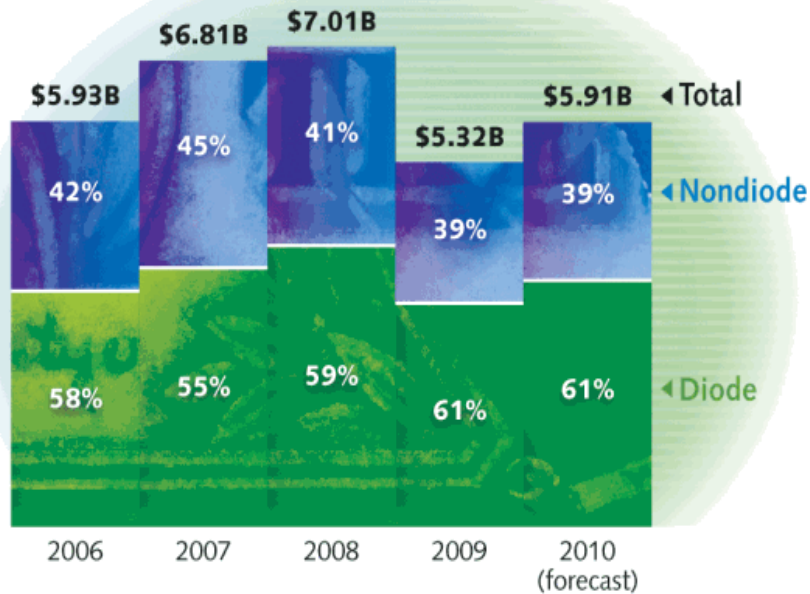


384 403 km +/- 2cm (au 1^{er} siècle avant JC : 384 000 km par Hipparque de Nicée)

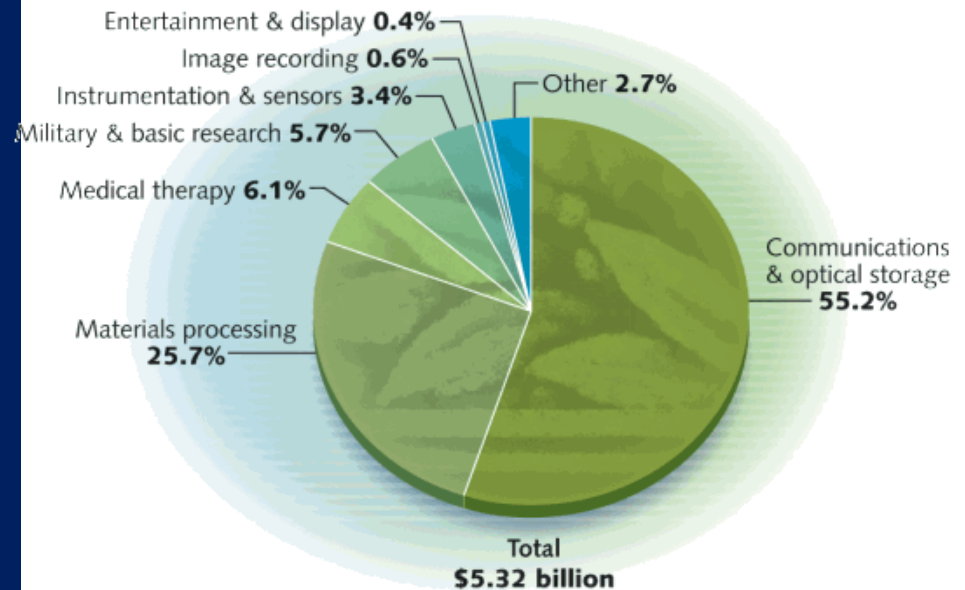


Le marché mondial du laser

Worldwide commercial laser revenues

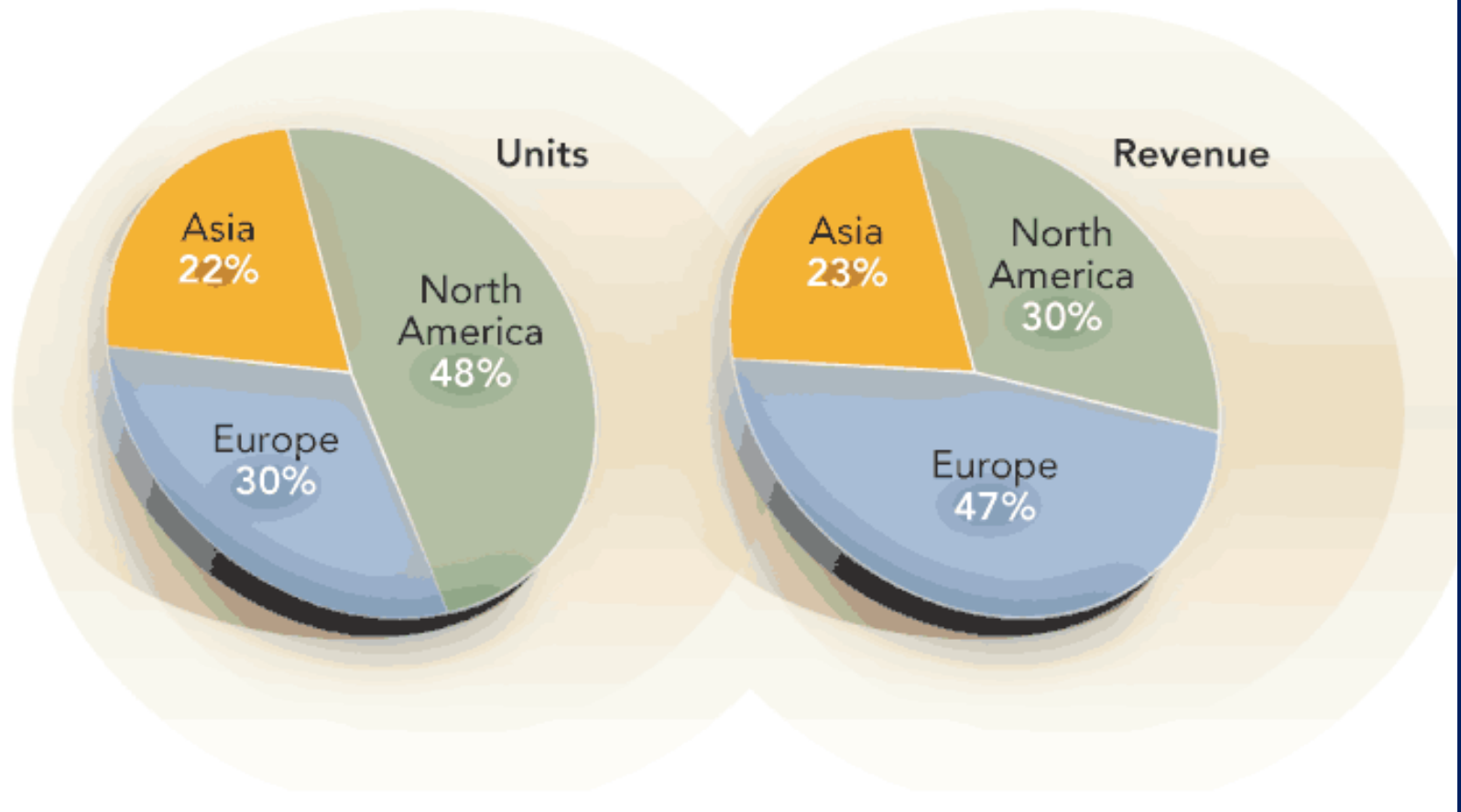


Laser revenues by application 2009

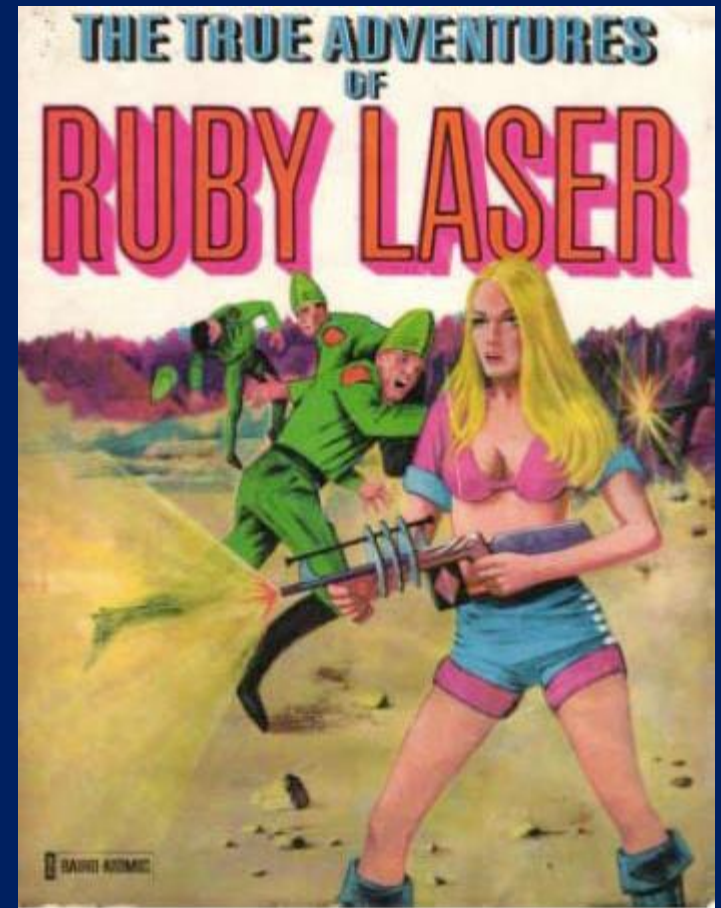


~ 6 Billiards \$ /an

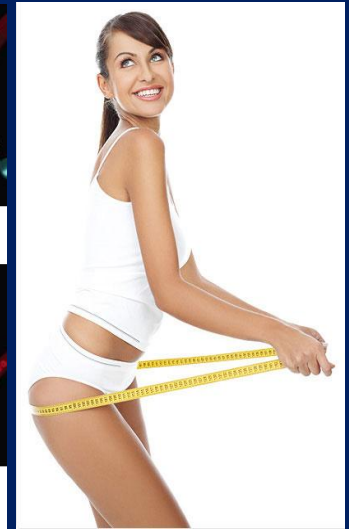
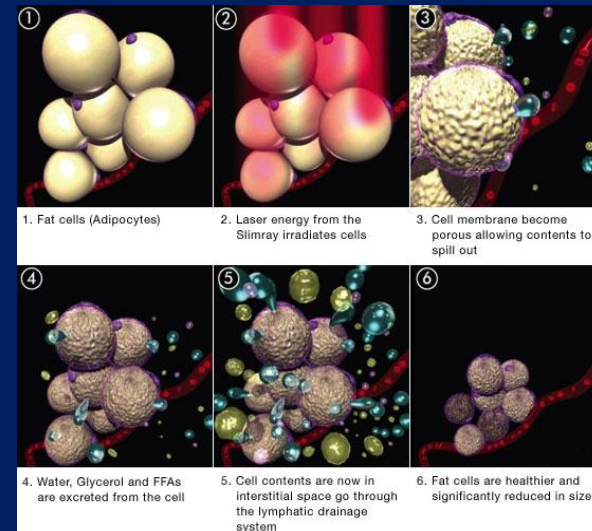
Répartition du marché mondial du laser



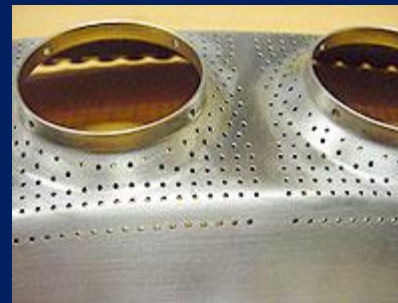
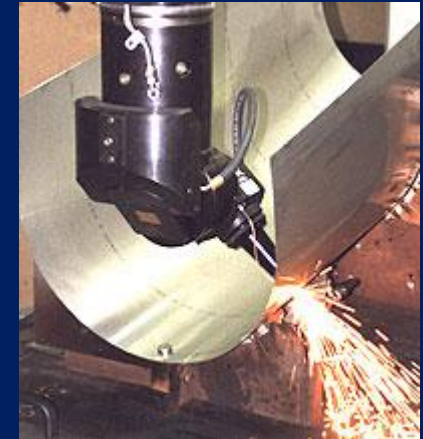
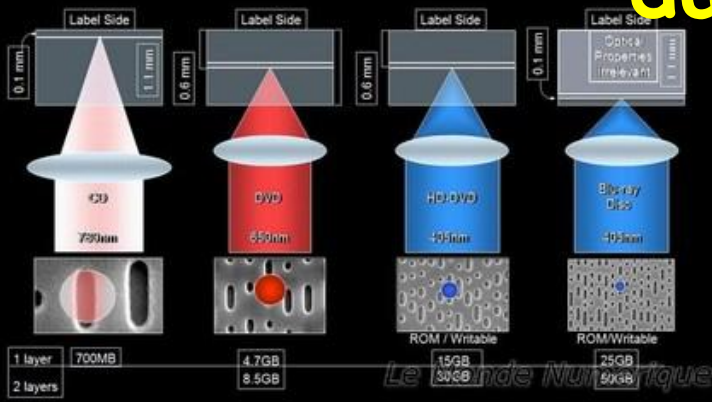
entre fantasmes et magie



Des applications très disparates !

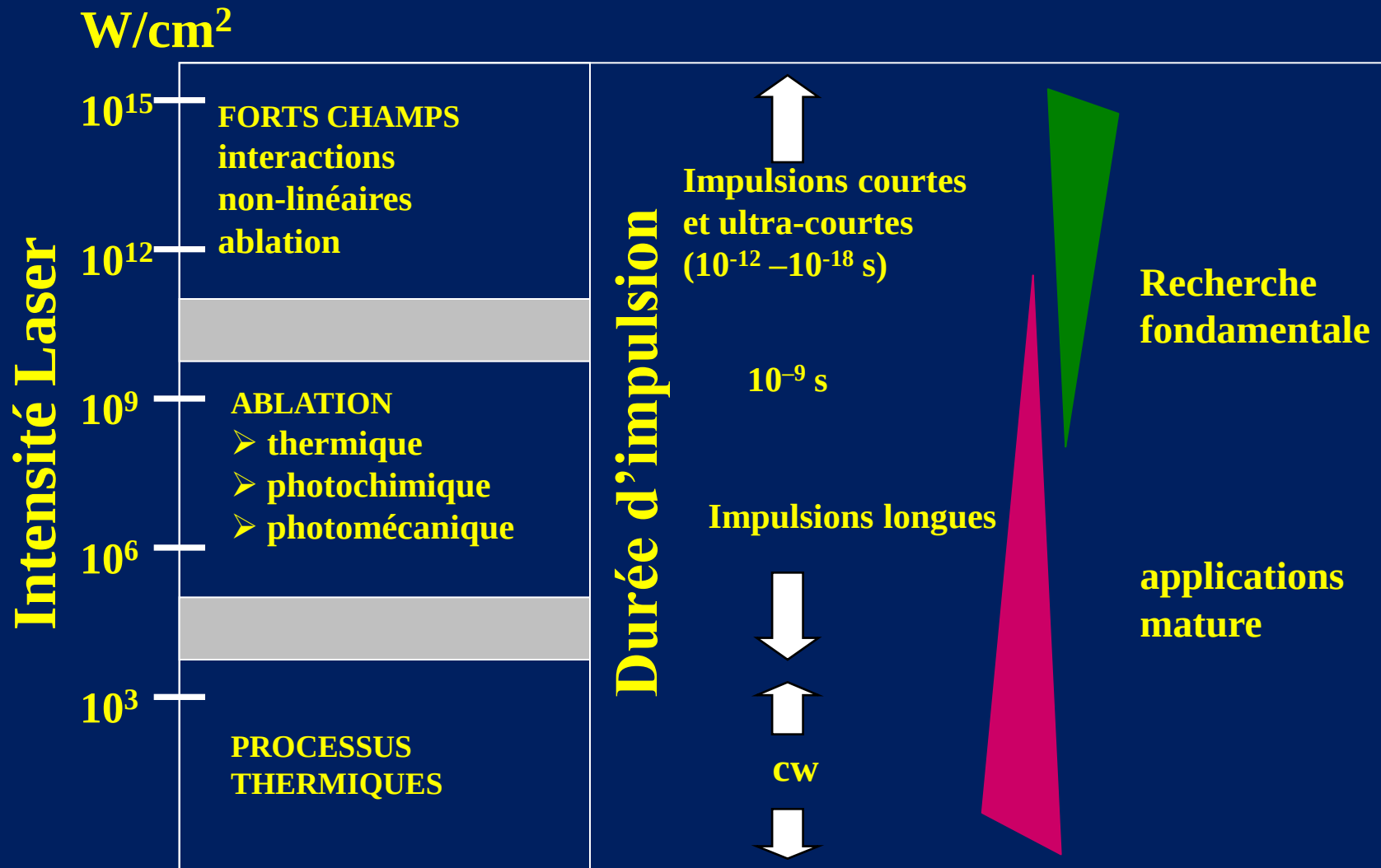


Des applications très présentes dans notre quotidien





Domaines d'applications des lasers de puissance



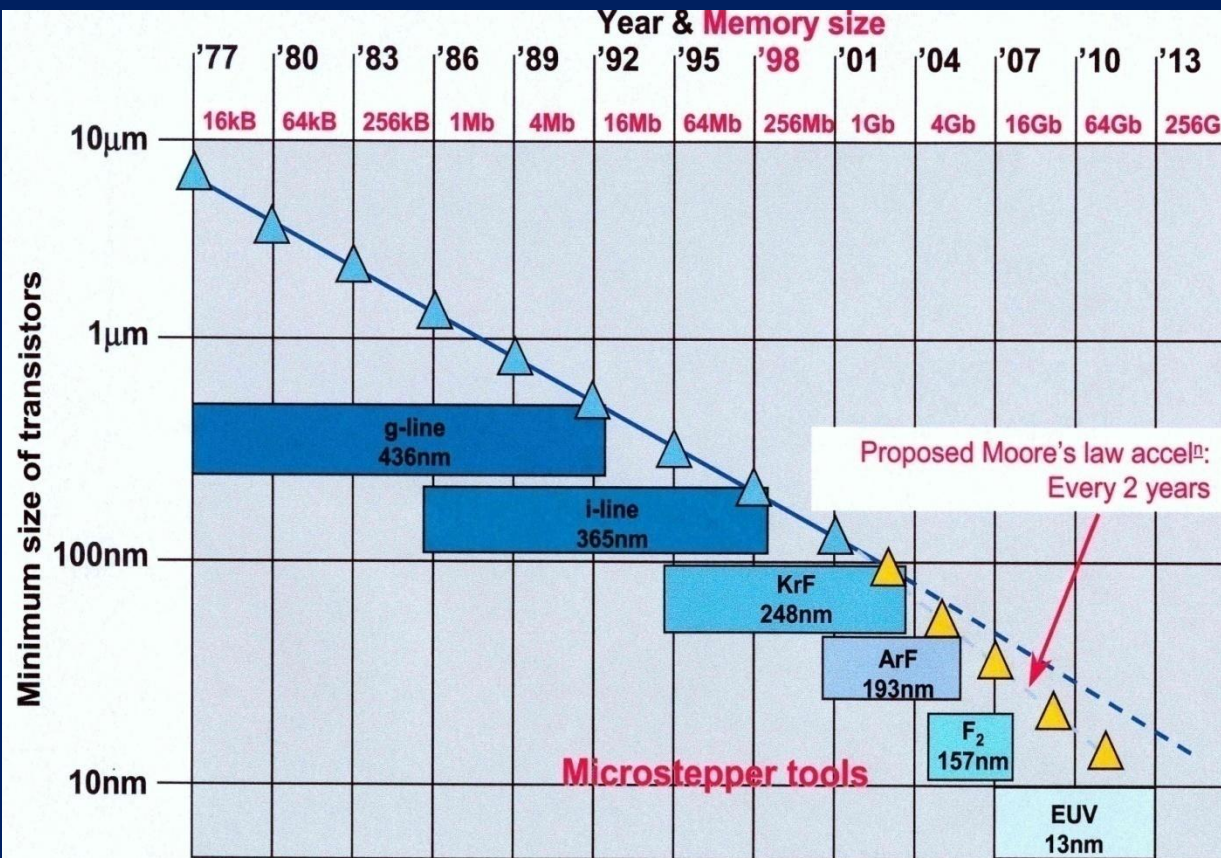


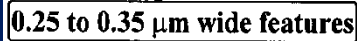
Procédés laser pour la microélectronique

- Photolithographie
- LIFT : Laser Induced Forward Transfert

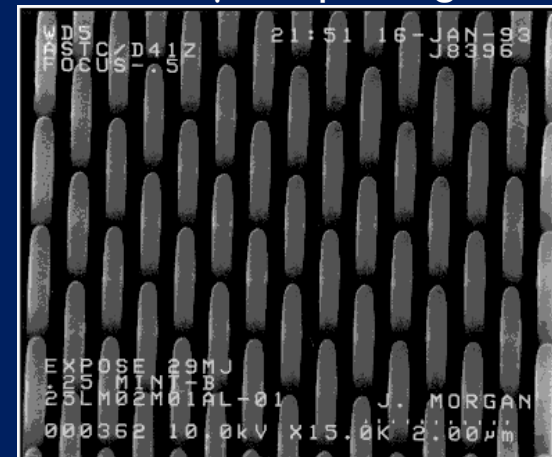


Microlithographie par laser excimère

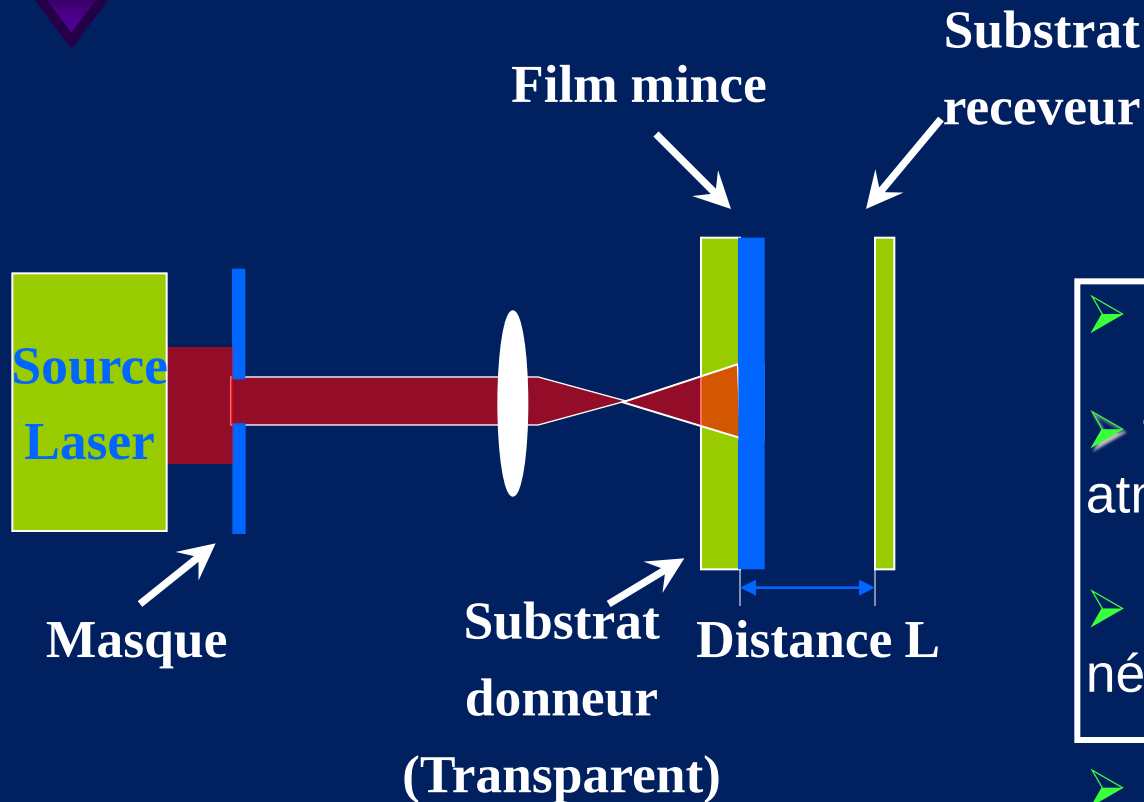




- ## Resist pattern on Silicon, 0.25 μ m spacing



Laser-Induced Forward Transfer (LIFT)



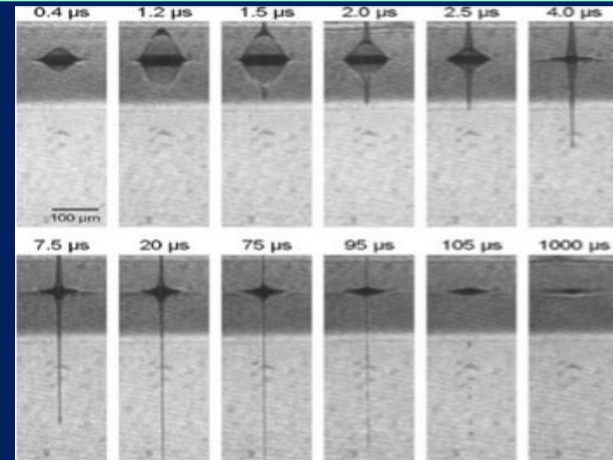
- « *one step* » process
- travail à la pression atmosphérique
- peu d'énergie laser nécessaire
- Distance L : 0 à qq 100 μm

Possibilité de déposer tous types de matériaux sur n'importe quel support

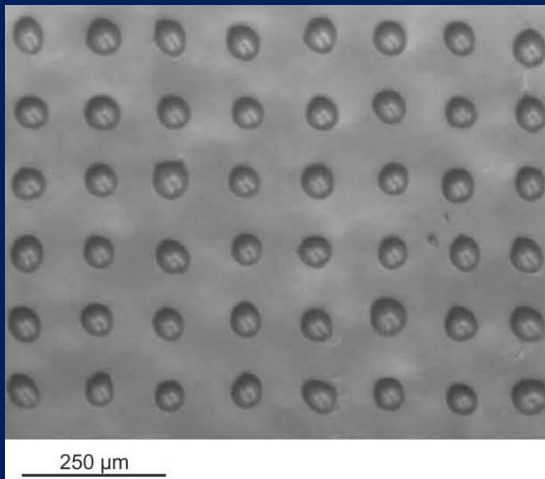
Exemples d'application du procédé LIFT



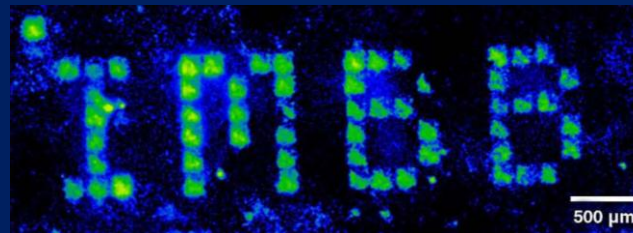
OLED, Pixel in operation, R. Fardel et al, *Appl. Phys. Lett.* 91 (2007) 061103



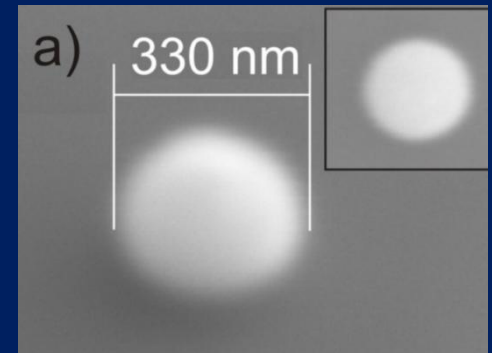
Liquid printing, M. Duocastella et al. *Appl. Phys. A.*, (2008)



Droplets containing DNA, J.M. Fernandez et al, *Thin Solid Films* 453-454 (2004) 27-30



Active enzyme, I. Zergoti et al, *Appl. Surf. Sci.* 247 (2005) p.584



D. Banks, *Appl. Phys. Lett.* **89**, 193107, (2006)

Réalisation de transistor à base de matériaux organiques



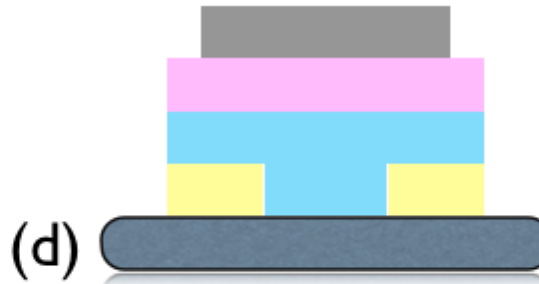
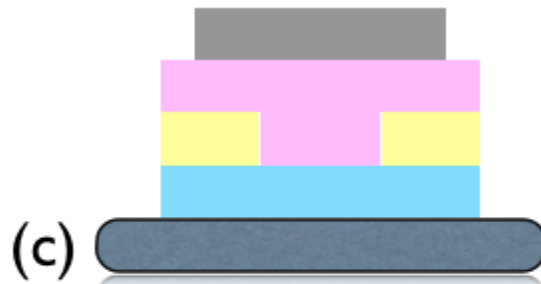
Top contact

Bottom contact

Bottom gate



Top gate



Légende:

 Substrat

 Semi-conducteur

 Contact S/D

 Diélectrique

 Grille



Application : Ecran sur support souple





Procédés laser pour la santé

- Greffe de cornée assistée par laser
- Imagerie X par contraste de phase
- Protonthérapie

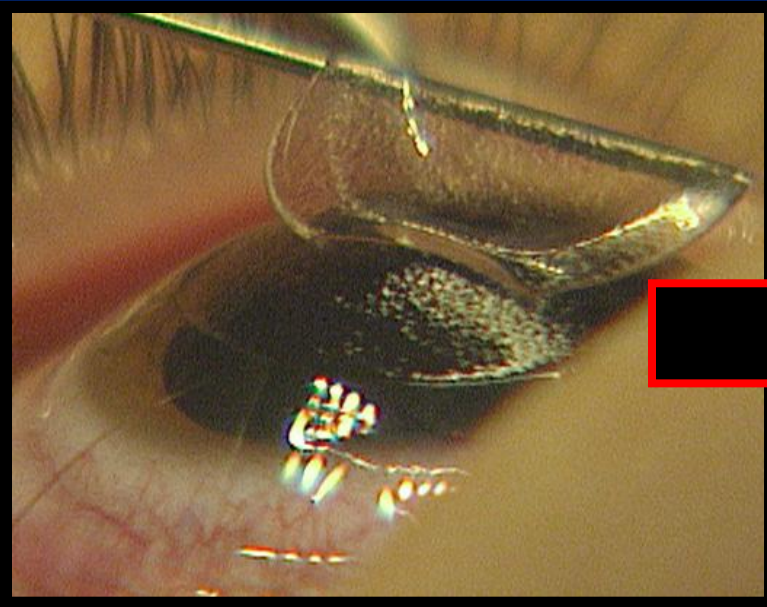
Kératotomie laser



Principe du LASIK : 1992

Technique de référence

Découpe Lamellaire
superficielle



Capot de 150 μm

Kératomileusis par
Laser Excimer



Photo-ablation

Greffe de cornée assistée par laser fs



Ablation laser : ~
 10^{12} à 10^{13} W/cm²



Kératoplastie
lamellaire
antérieure

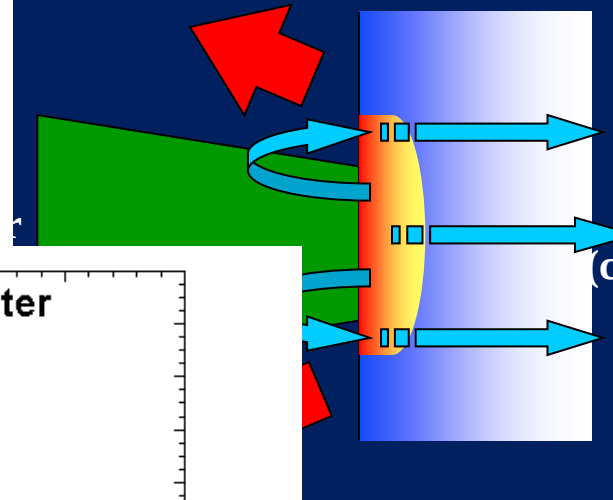
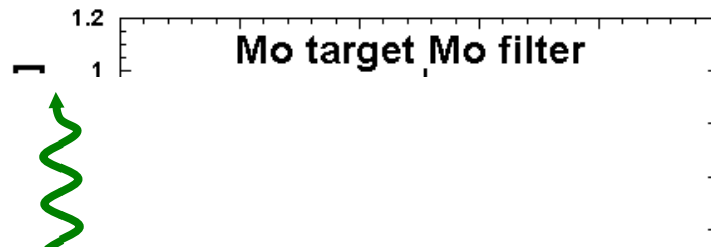
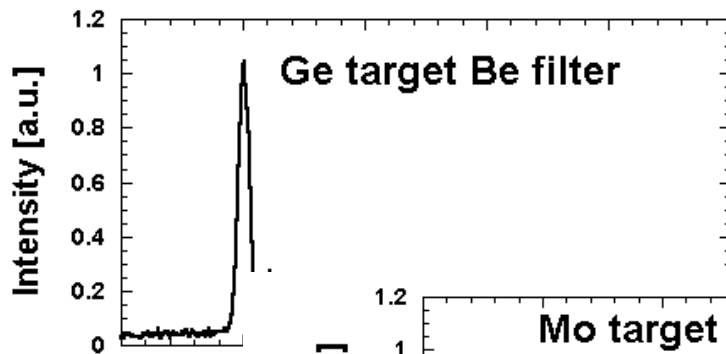
Femtec 20/10 Perfect Vision

Hopital de la Timone
Marseille

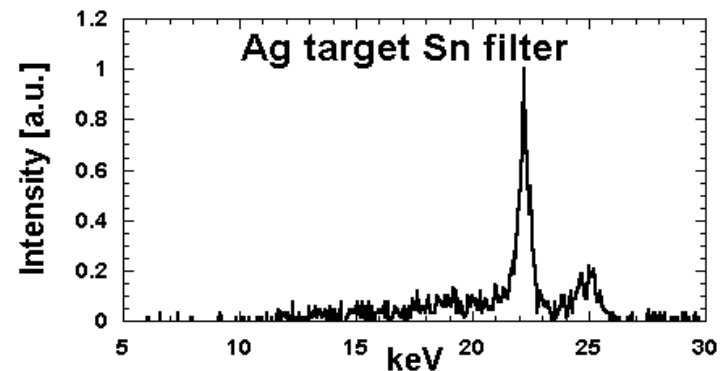
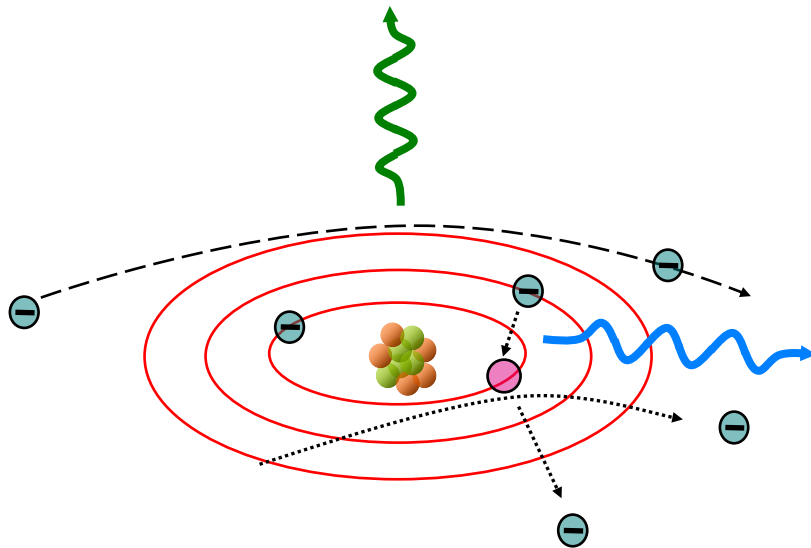
Sources X ultra-rapides avec plasmas laser

$I = \sim 10^{18} \text{ à } 10^{19} \text{ W/cm}^2$

Émission caractéristique (multi-keV)

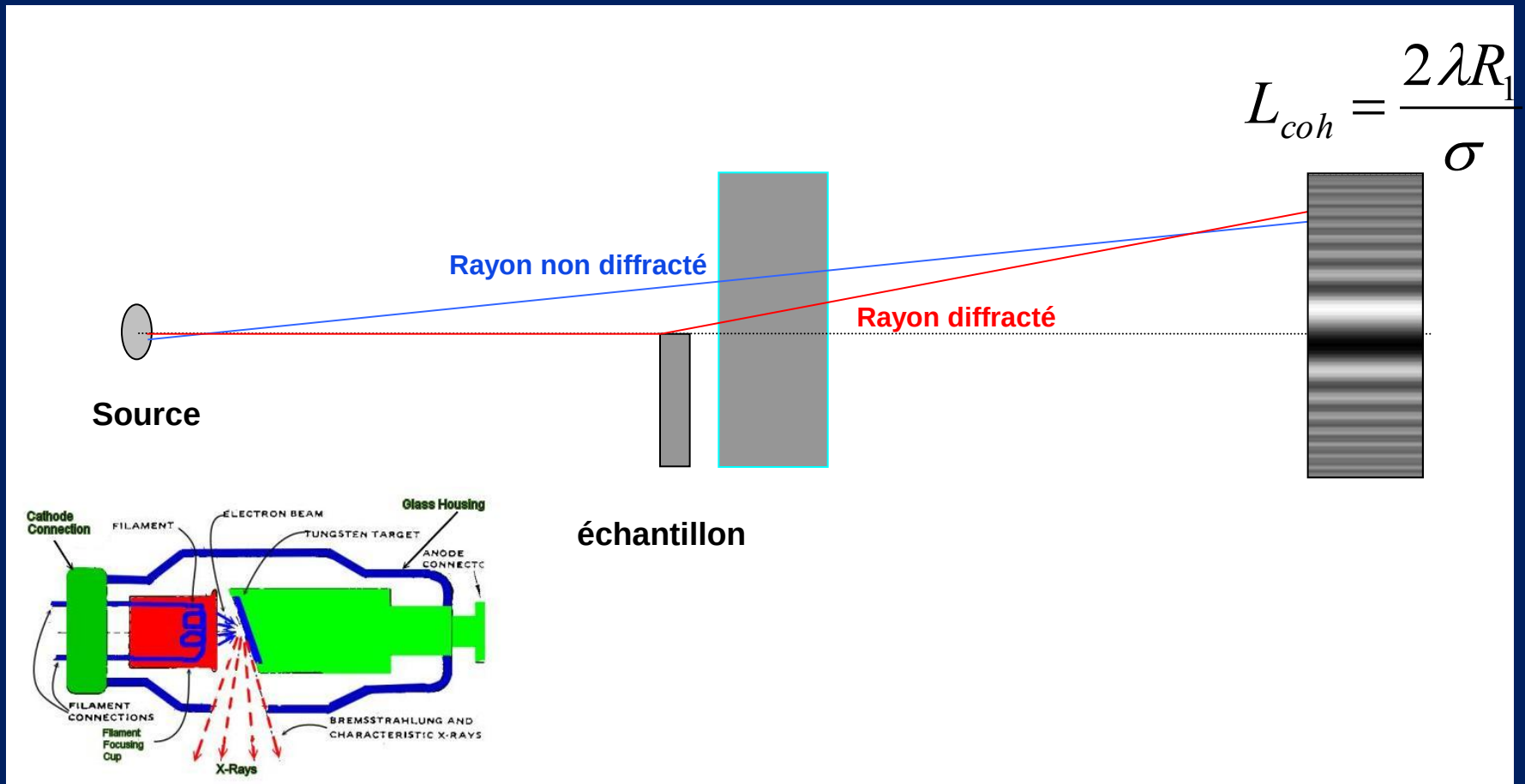


Hot electrons
(characteristic lines)





2004: première démonstration d'imagerie avec contraste de phase avec une source X créée par laser





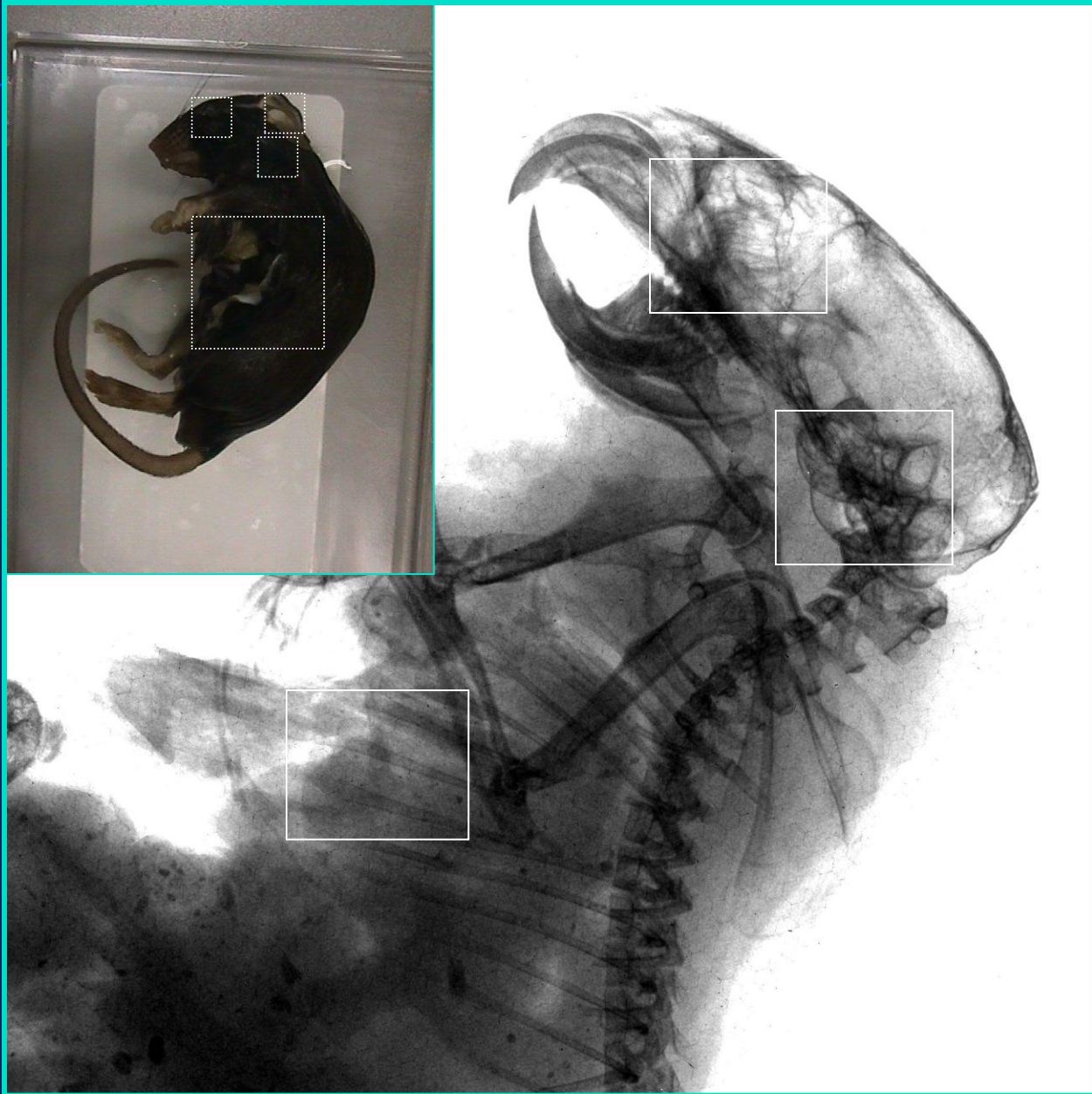
Imagerie par contraste de phase



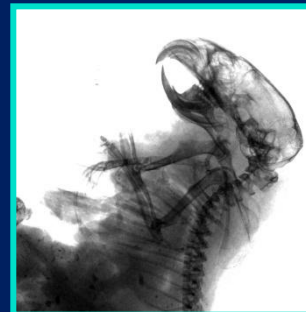
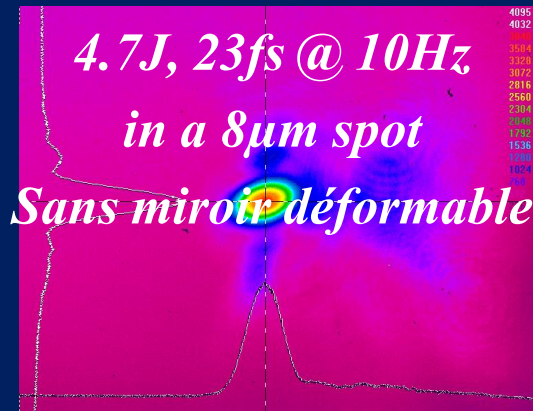
© INRS

R. Toth et al., Rev. Sci. Instrum.
76, 083701 (2005)

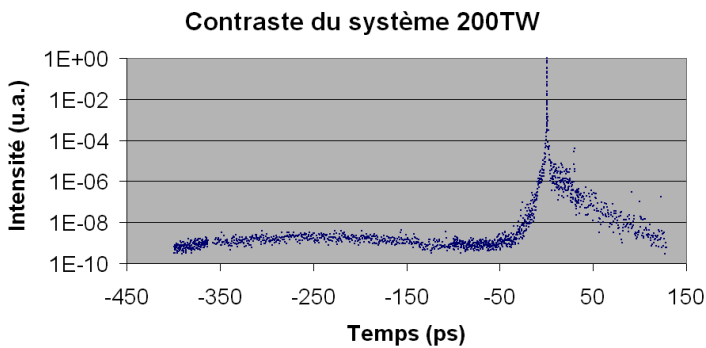
- *Meilleure résolution ($5\mu\text{m}$)*
- *dose plus faible*
- *meilleur contraste (phase)*
- *l'énergie X peut être ajustée aux besoins de l'imagerie*



La référence mondiale : ALLS (INRS- Montréal) 200TW + Puissance moyenne 50W



μ CT
Scan duration avec
50W@10Hz (360 images)
2 min (mouse scan)

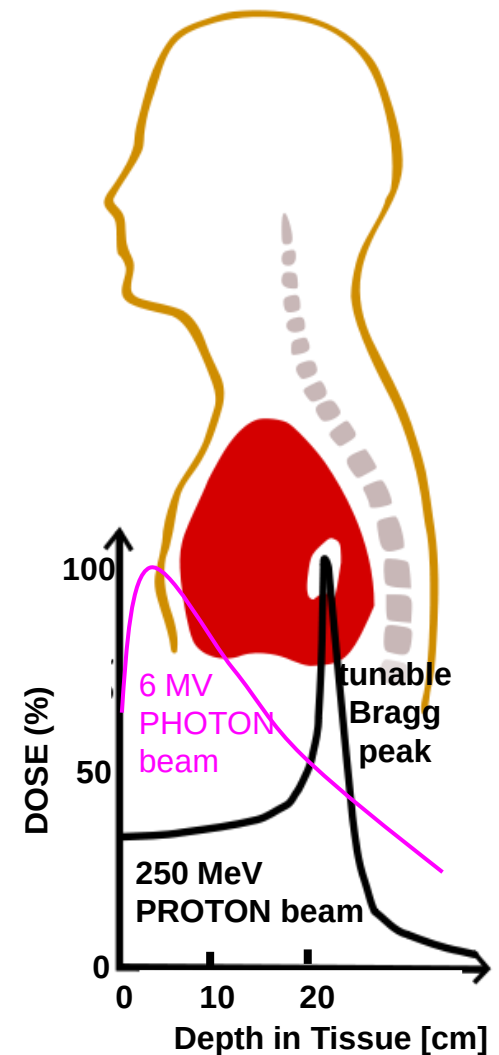
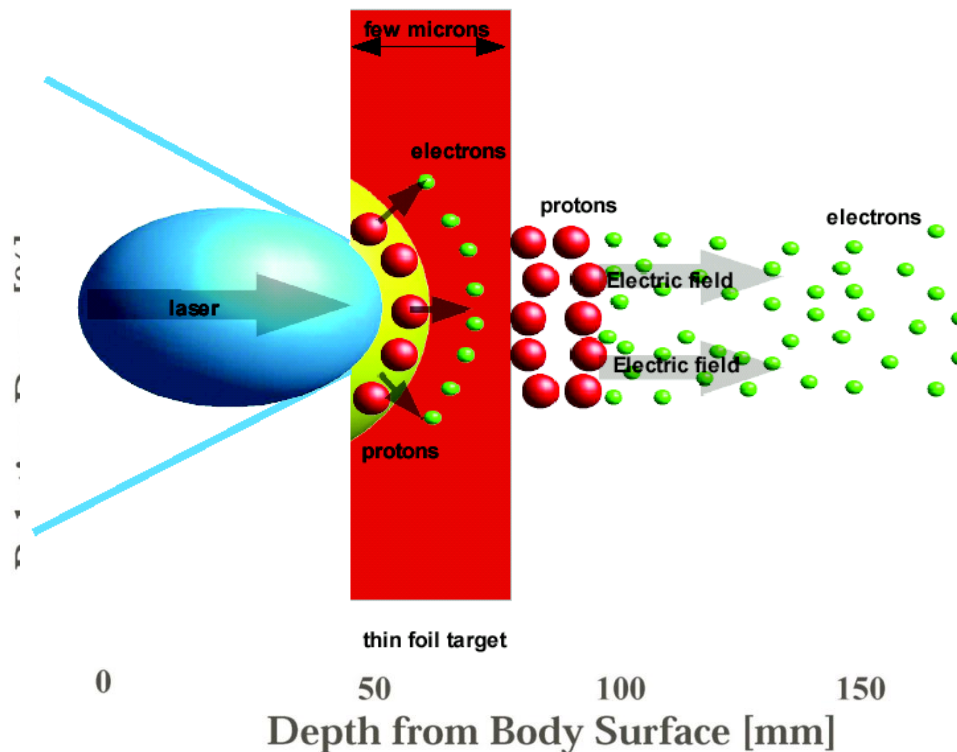


Protonthérapie par laser (projet SAPHIR)

Avantages des particules chargées ou hadrons (protons, ions) / Rayons X de la Radio-Thérapie

Le pic de Bragg!

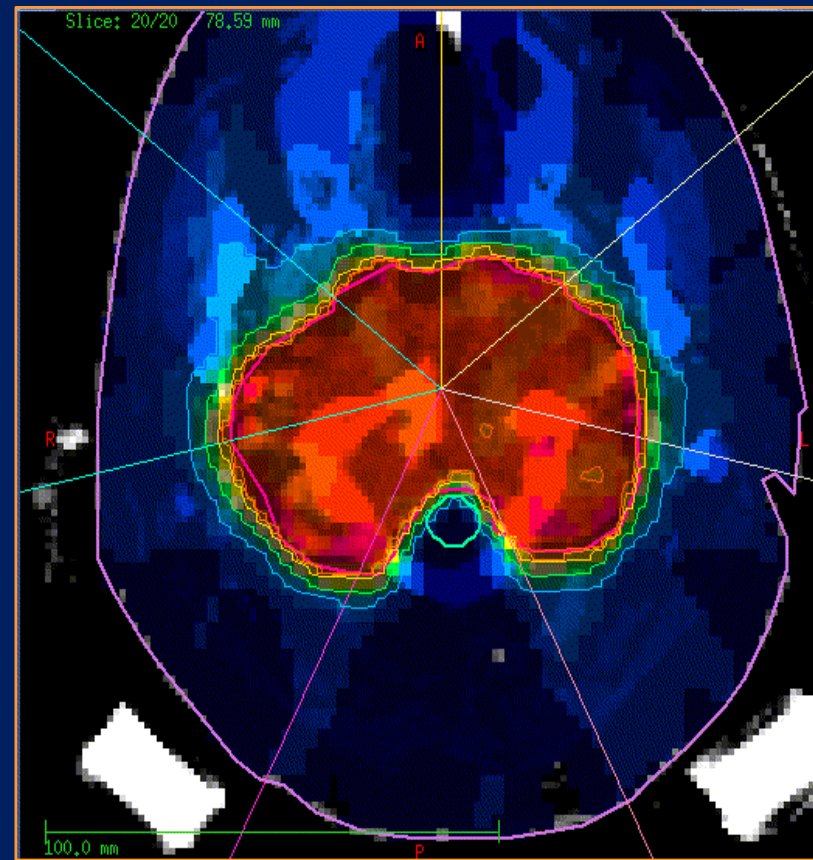
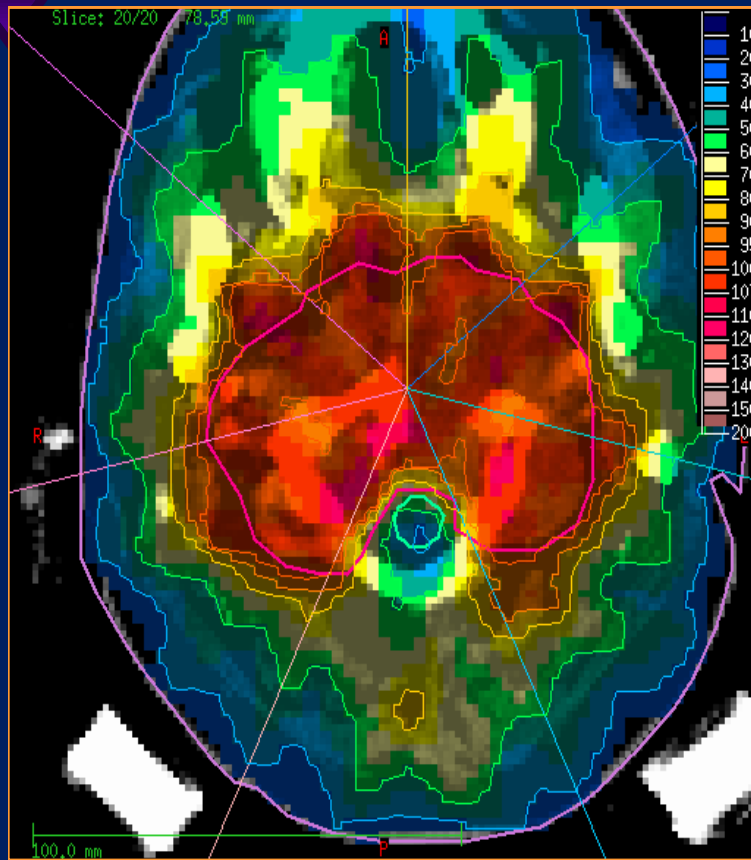
Hadron (Proton and Carbon) Therapy: Effect of the Bragg Peak



La profondeur de pénétration dépend de l'énergie incidente des protons

la tumeur la plus superficielle = l'œil 70 MeV
la plus profonde = la prostate 200 - 250 MeV

Les irradiations colatérales en radiothérapie et en protonthérapie



Comparaison de l'épargne de dose dans les tissus sains en protons (image de droite) par rapport aux photons (IMRT: *Intensity Modulated Radio-Therapy*, image de gauche)

Avantage considérable : pour le traitement de tumeurs localisées près d'organes sensibles (œil, cerveau)



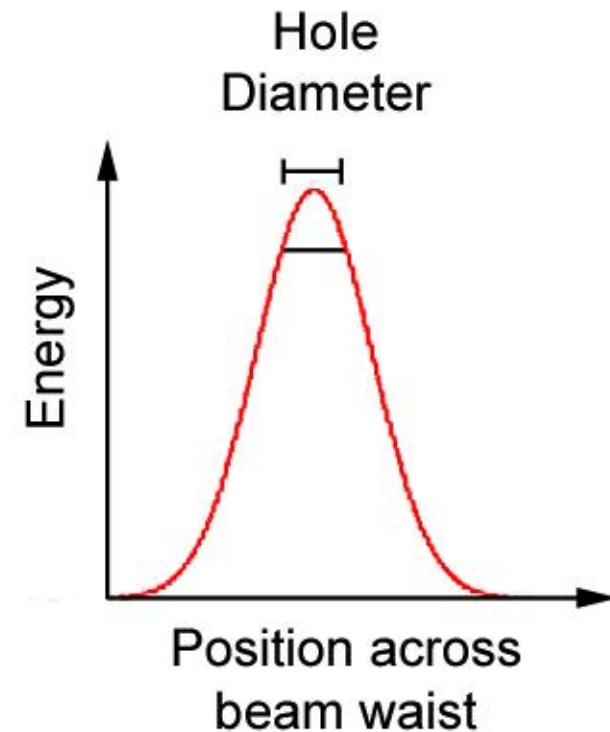
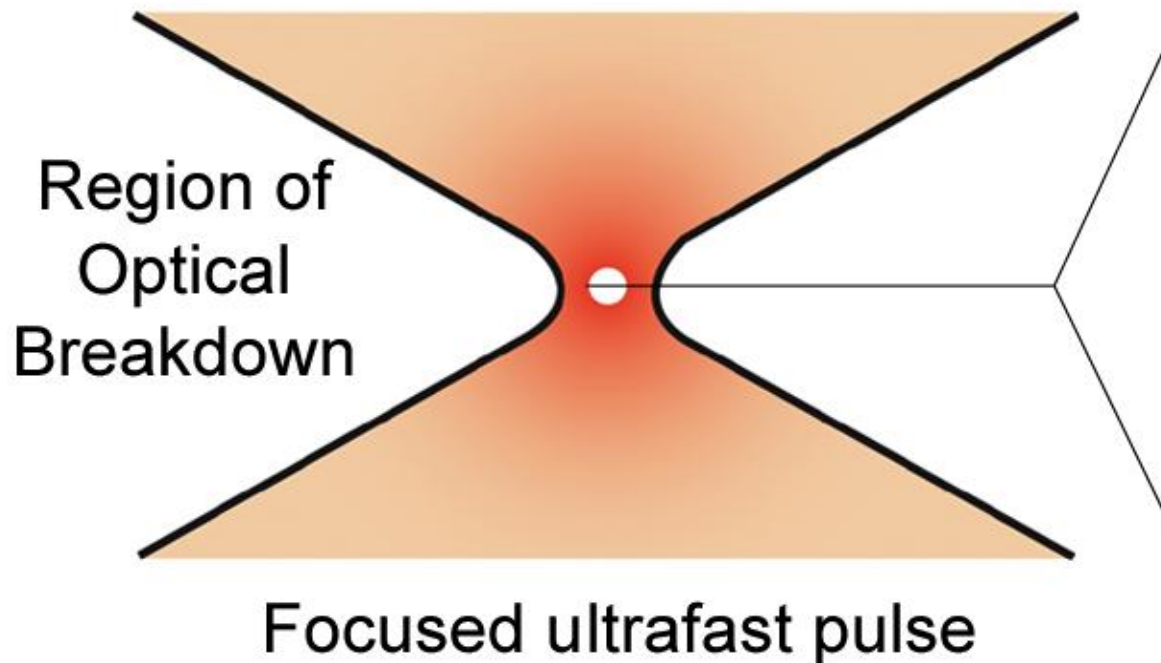
Procédés laser pour les micro et nanotechnologies

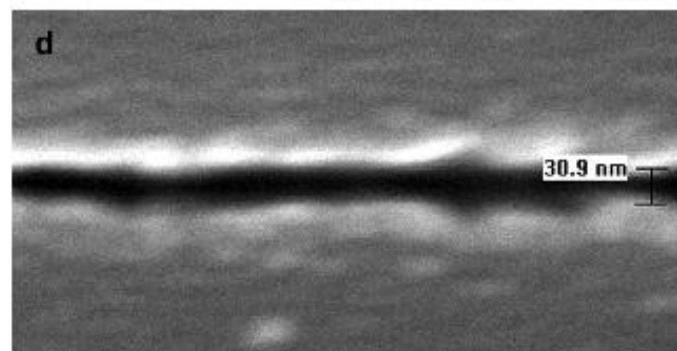
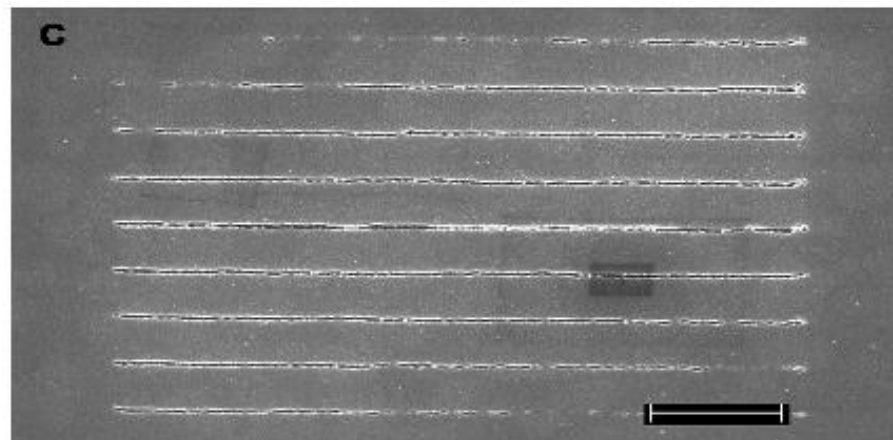
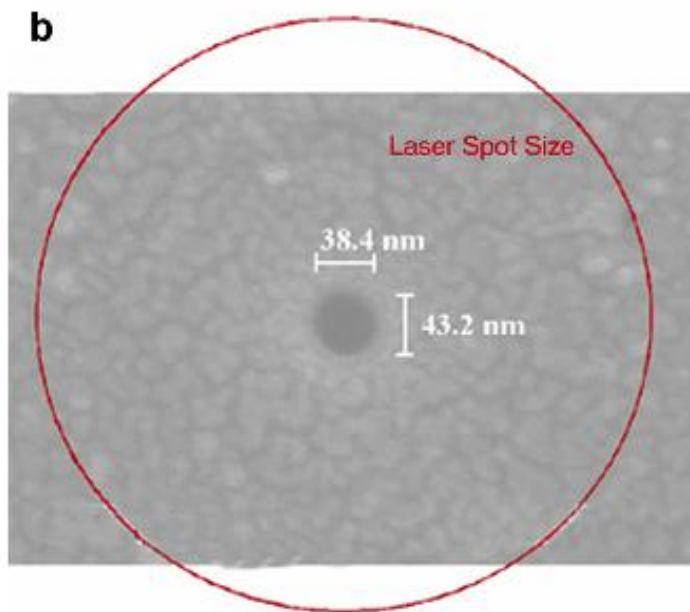
- Usinage laser en dessous de la limite de diffraction
- micro et nanostructuration de surfaces
- nanoparticules pour les sciences du vivant
- polymérisation à 2 photons



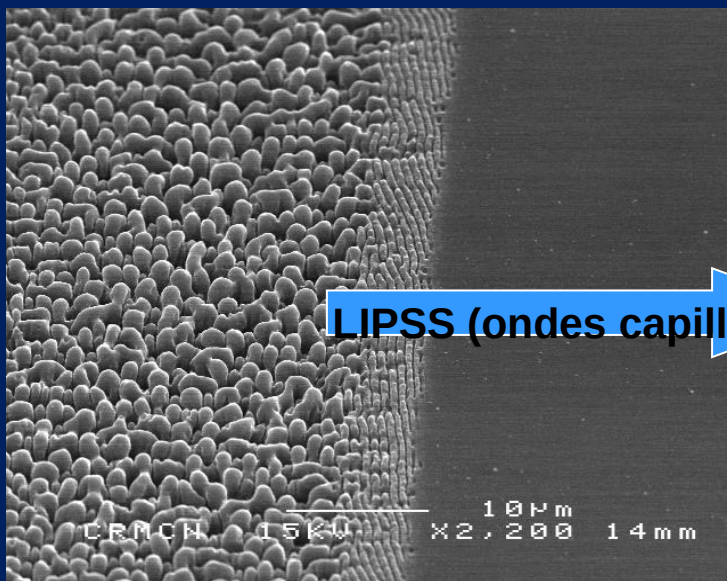
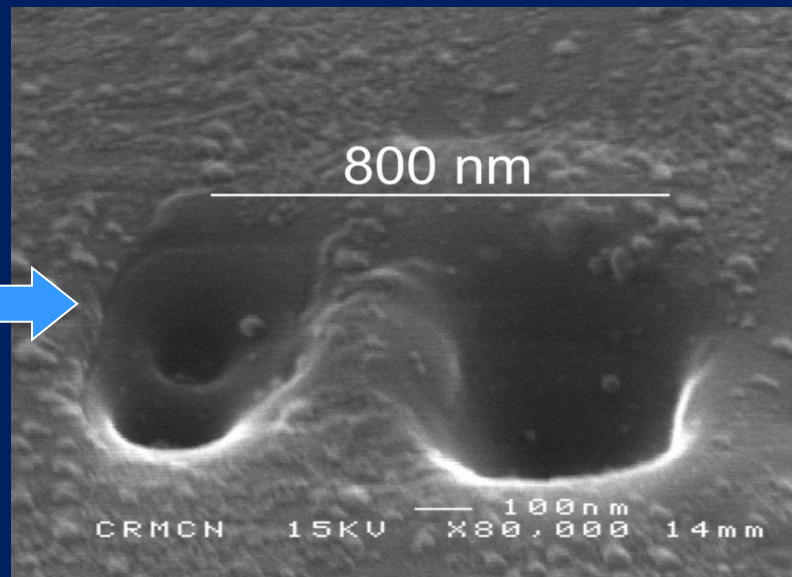
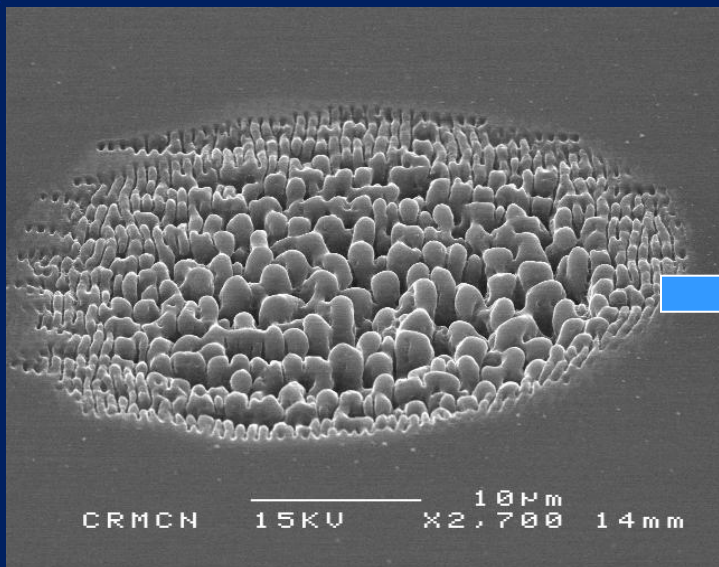
Nano-usinage laser femtoseconde par effet non-linéaire

a

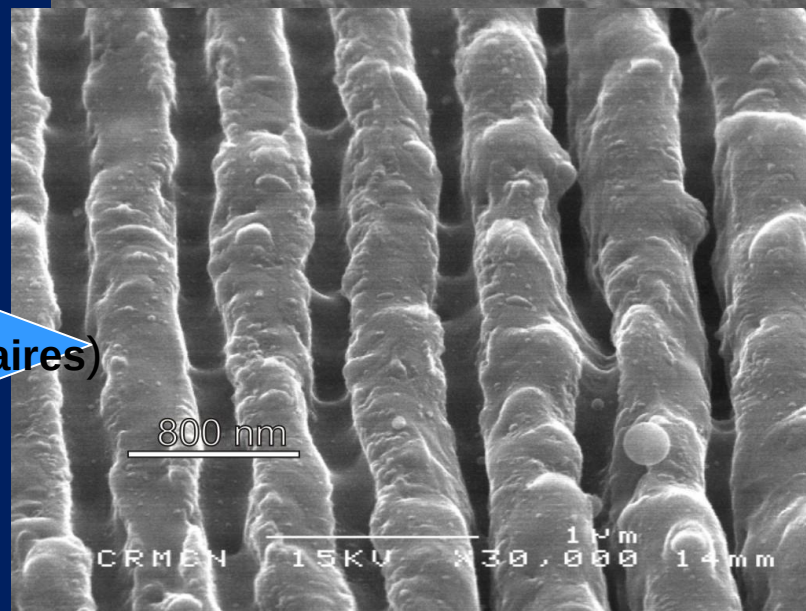


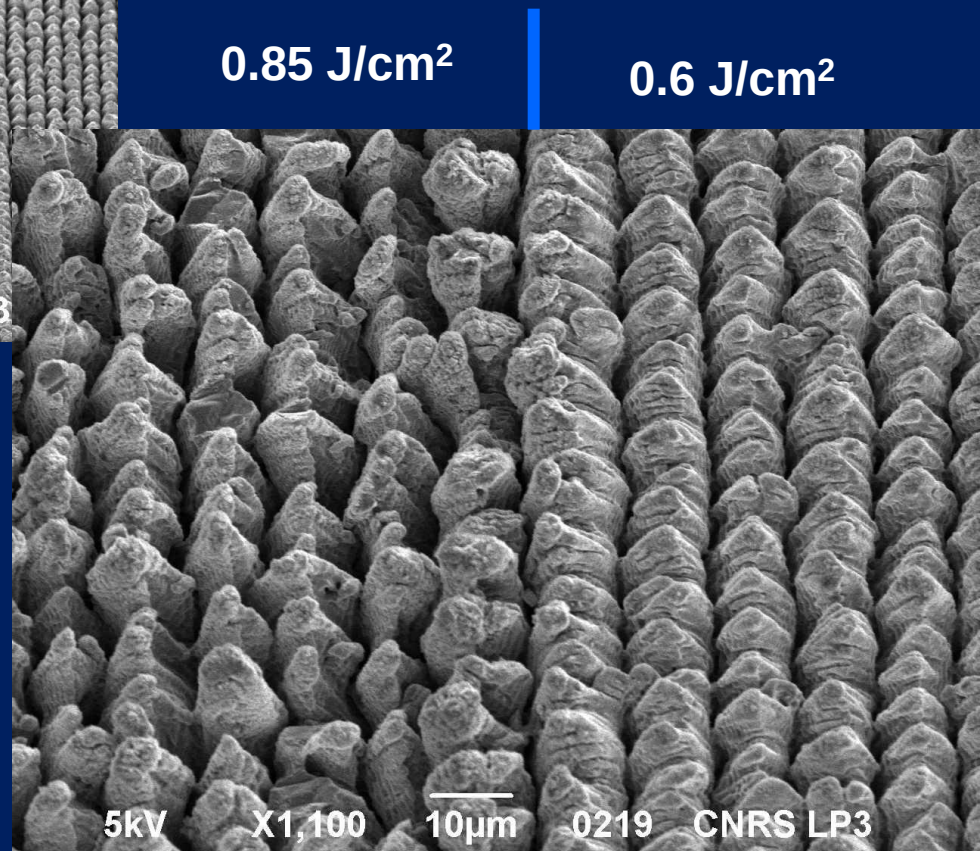
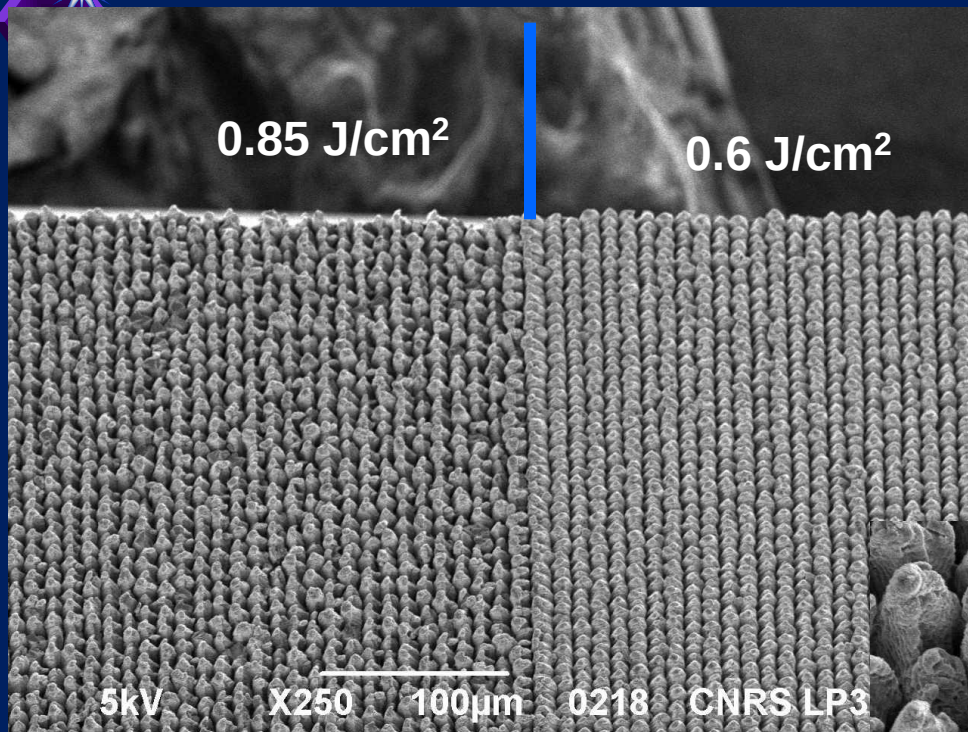


Auto-structuration de surfaces par irradiation laser fs



LIPSS (ondes capillaires)





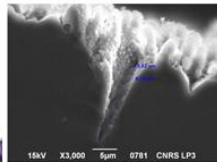
Application au photovoltaic



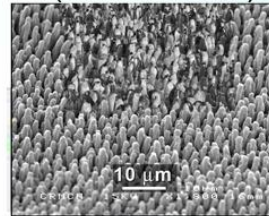
FP7 - SOLASYS

Laser Applications for Solar Cell and Solar Module Production

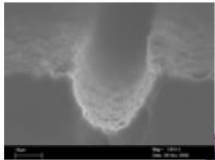
Laser isolation



Laser texturization
(black silicon)



High speed Laser
micro ablation



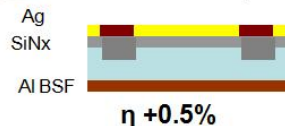
High speed laser
drilling for back-
side contact cells



Laser joining for
cell interconnection



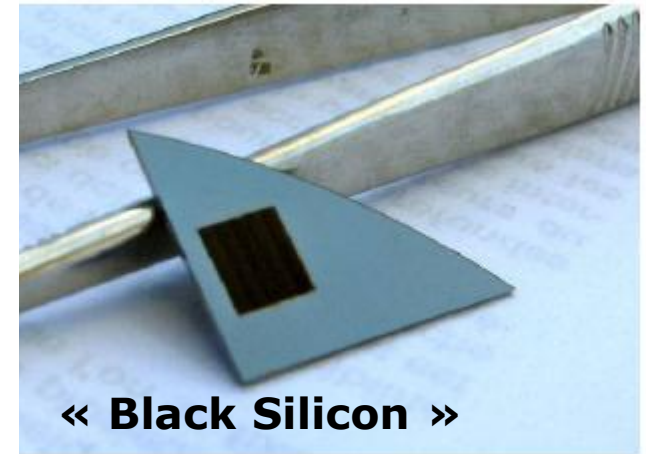
Laser selective
emitter doping



texturation par laser
 μ^2

- Aeff% (1-R-T) ref.
- Amoy400 (1-R-T)
- Aeff% ref. Malek
- sun AM0 max

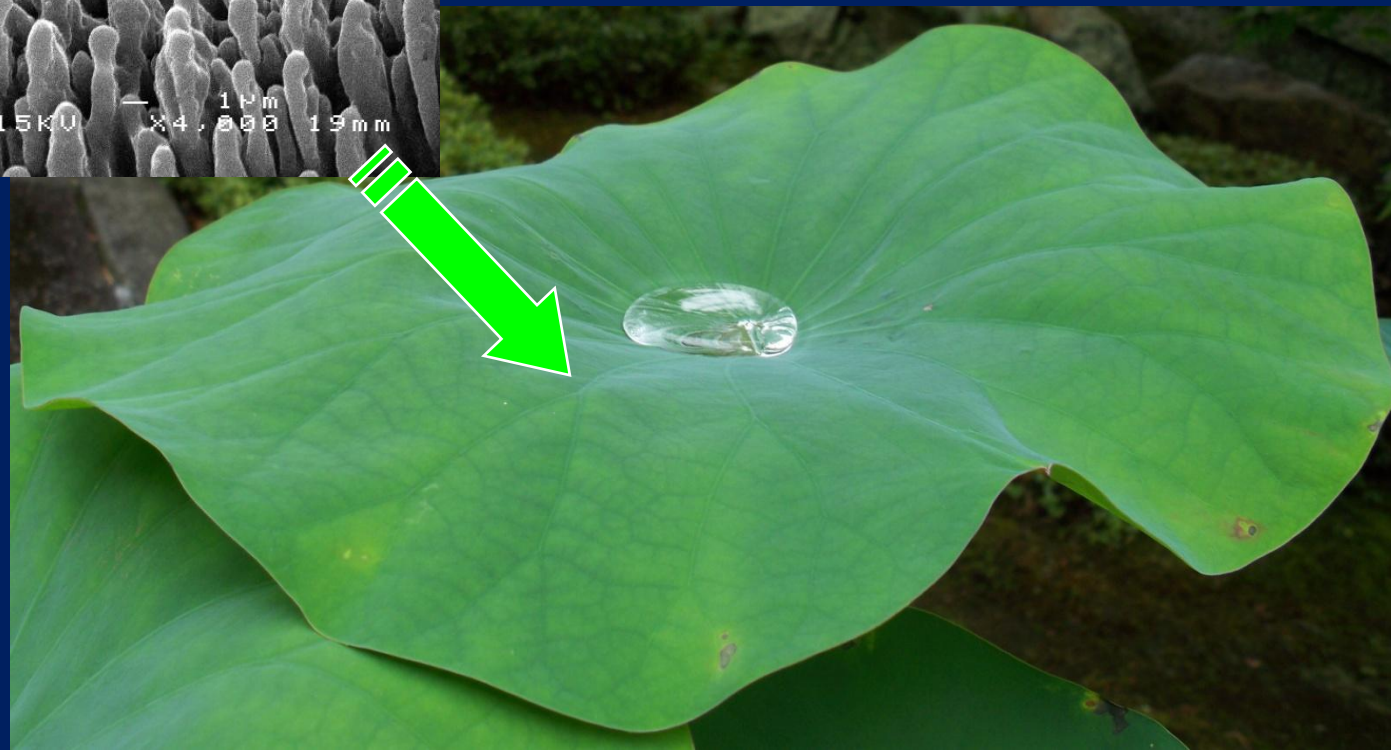
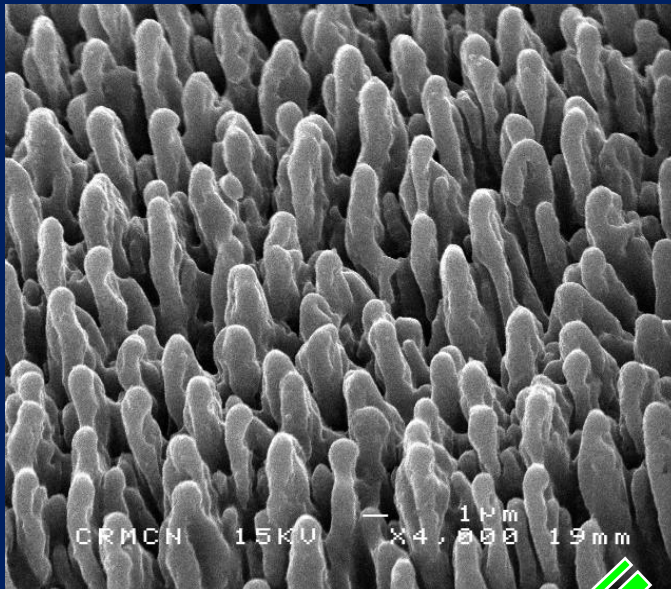
solaire



Une tres large augmentation de l'absorption du silicium !



Création de surfaces hydrophobes par “texturisation” laser





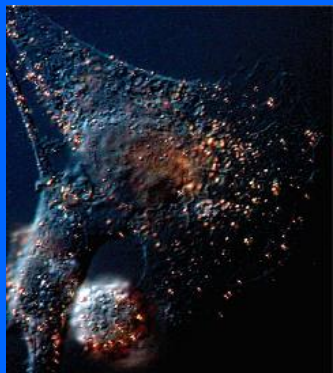
Applications potentielles de nanomatériaux

Bio-imaging

L'Imagerie optique concerne la visualisation d'objets biologiques ou tissus dans le but de détecter des pathogènes ou de suivre la délivrance de médicaments, etc. :

Les nanoparticules sont utilisées comme agent de contraste.

In vitro:
Cellular
imaging



In vivo: Cancer
detection, drug delivery
etc.



Light-induced therapies

Traitement du cancer: **les nanoparticules sont utilisées comme photosensibilisateurs pour produire une destruction locale des cellules cancéreuses.**

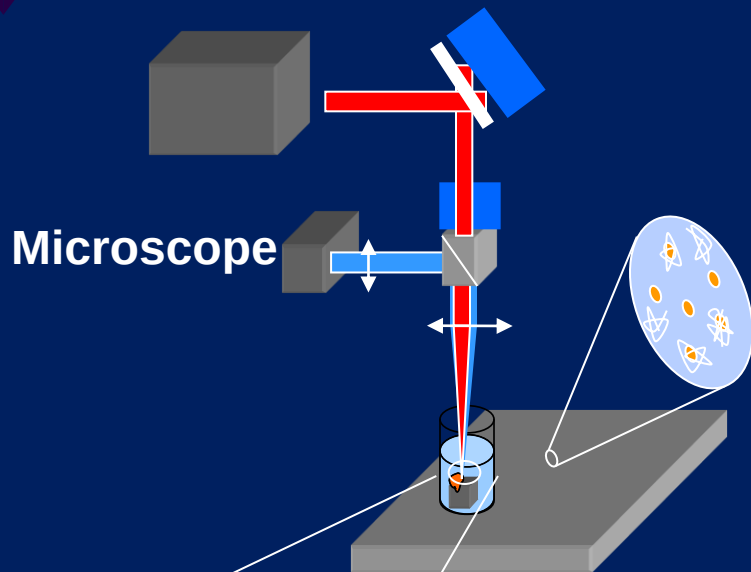
Photodynamic
therapy

Light-induced
hyperthermia





Fabrication de nano-particules ultra-pures par ablation laser dans un liquide



Femtosecond laser:

110 fs FWHM, 800 nm, 1 kHz

Cibles:

Au, Ag, Pt, Si

Solution:

1. Pure

2. Polys
CD, β -C

3. Biopo
Polyeth

4. Mole
groups:
(3-Merc

dextrins (α -

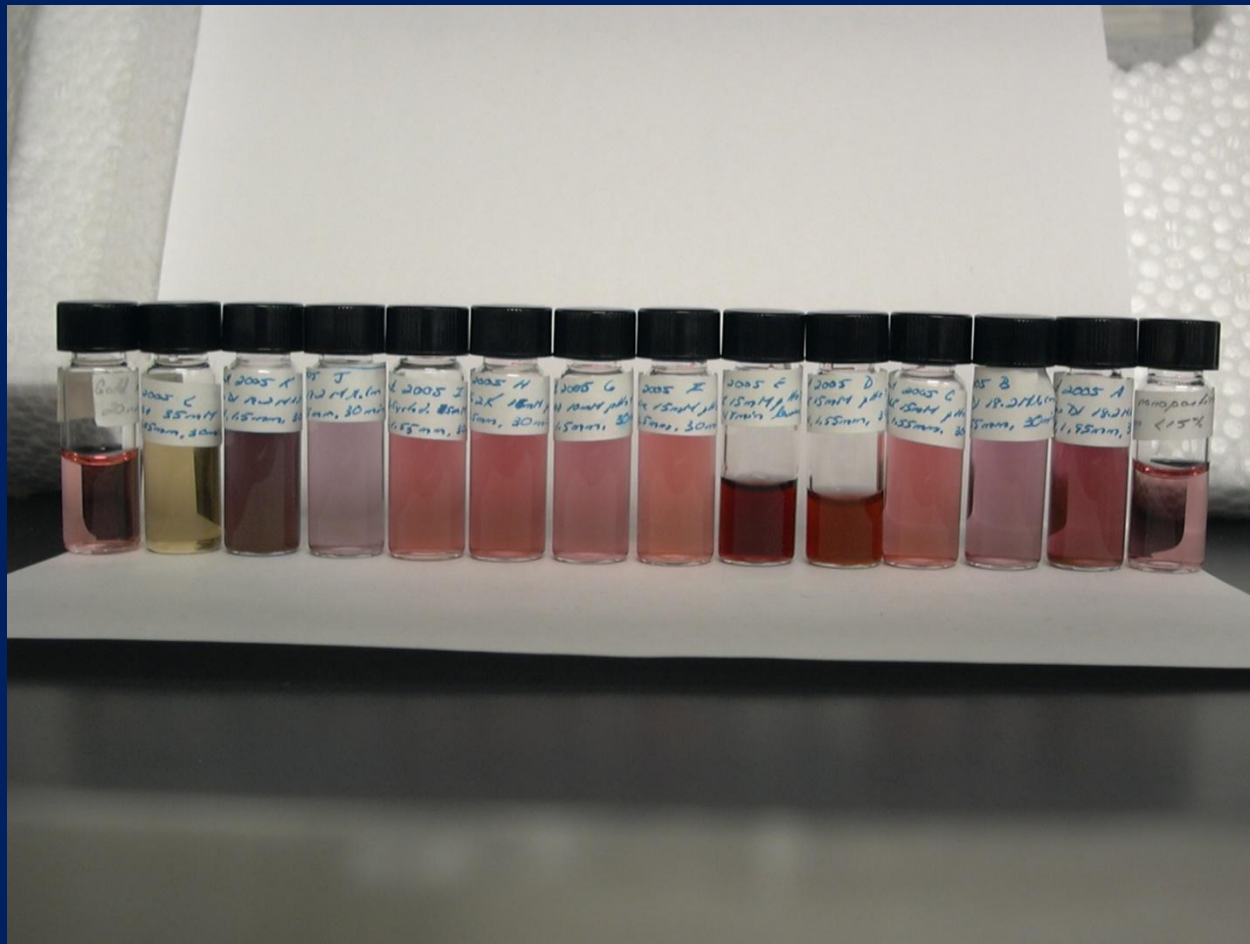
) etc.)

fferent
NH₂), thiols
) etc.





Ablation d'une cible d'or dans un liquide : solutions colloïdales

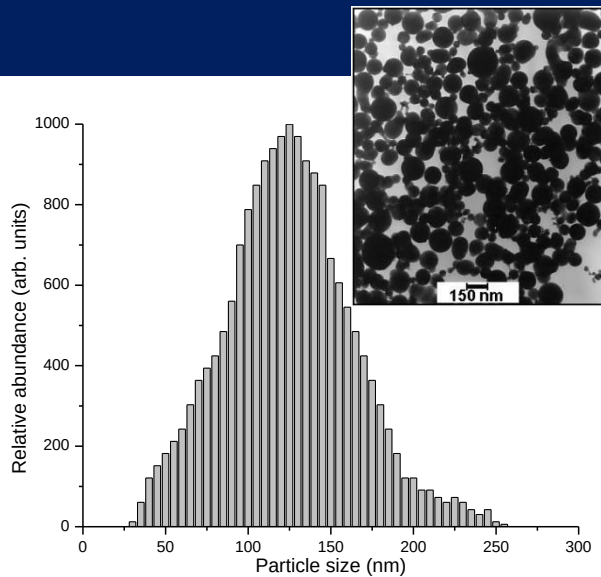


- la couleur de la solution varie en fonction de la taille des particules

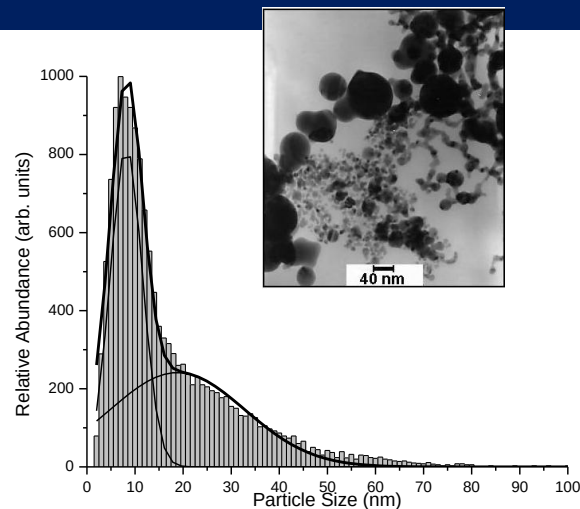


Distribution en taille de nanoparticules d'or préparées par ablation laser dans de l'eau distillée

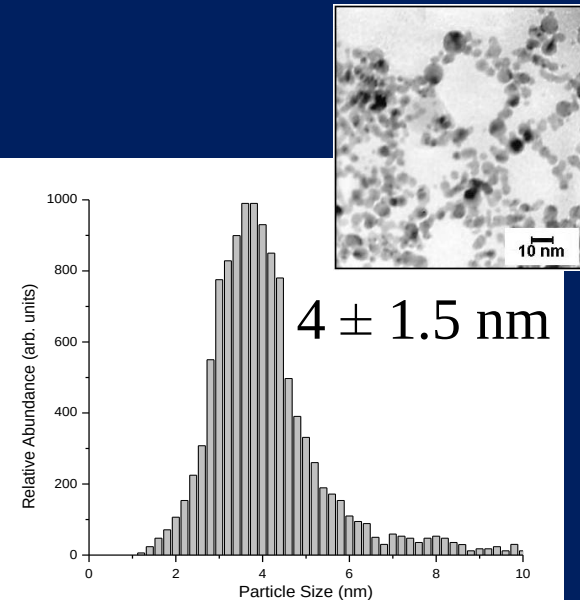
$$F = 20F_0 \text{ J/cm}^2$$



$$F = 5F_0 \text{ J/cm}^2$$



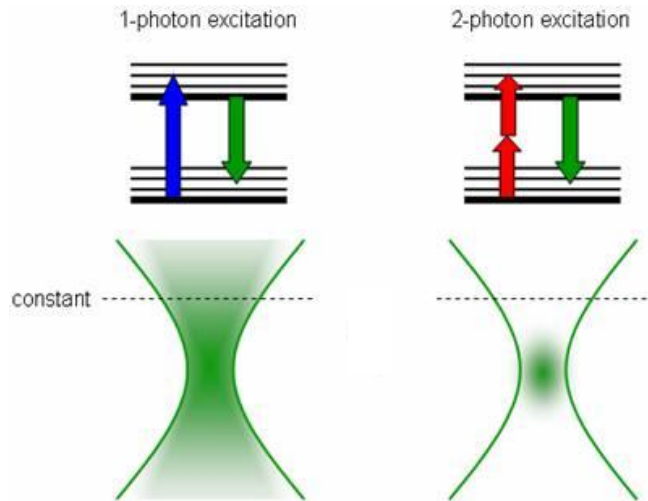
$$F = F_0 \text{ J/cm}^2$$



la taille des nanoparticules peut être contrôlée par l'énergie du laser

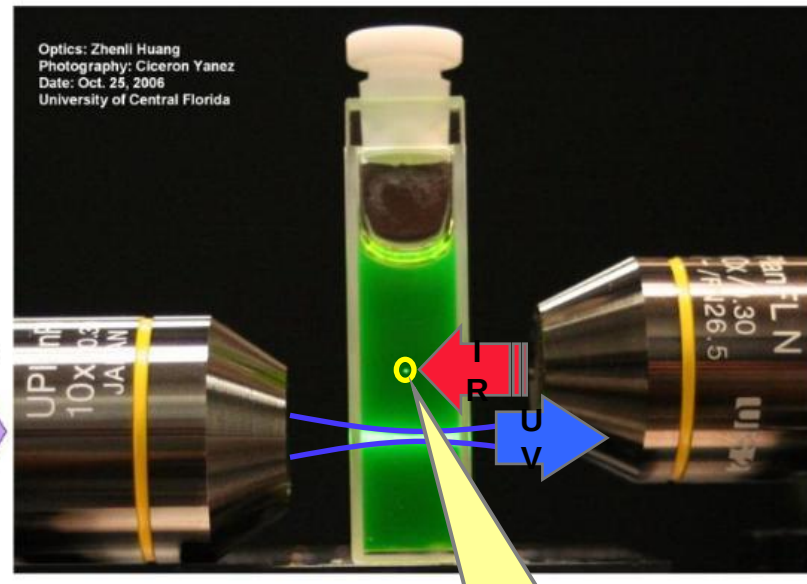
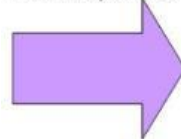
Procédé de polymérisation à 2 photons (2PP)

1-photon vs 2-photon



W Denk, JH Strickler, and WW Webb Two-photon laser scanning fluorescence microscopy, *Science* 4951, 73 (1990)

380nm, 200fs



760nm, 200fs

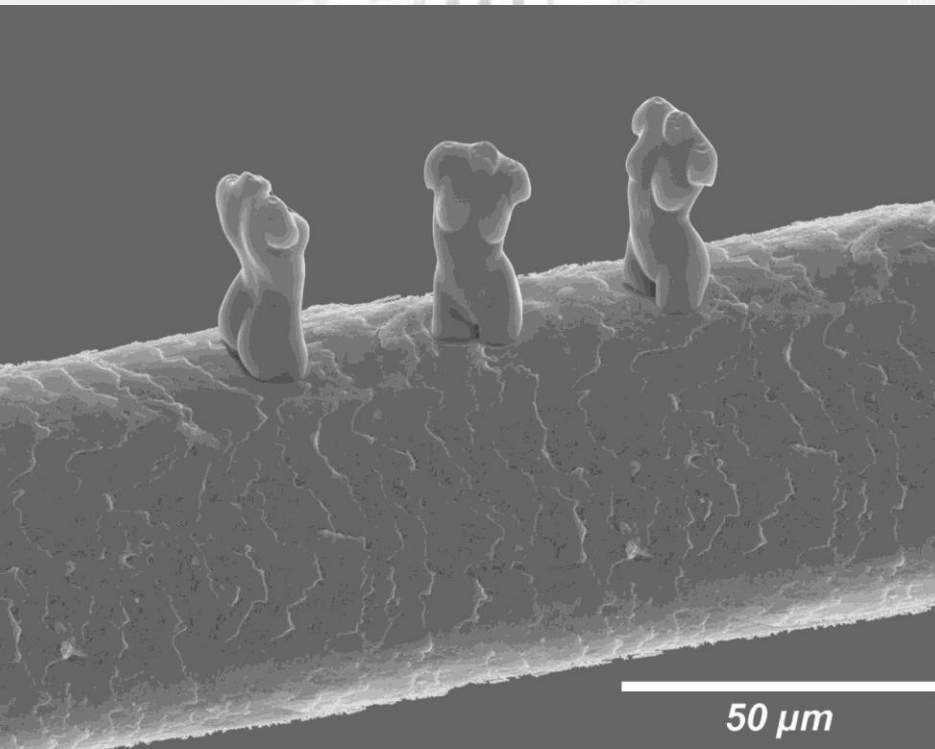


Two-photon polymerization
Kawata et al, *Nature*, 412, 697 (2001).

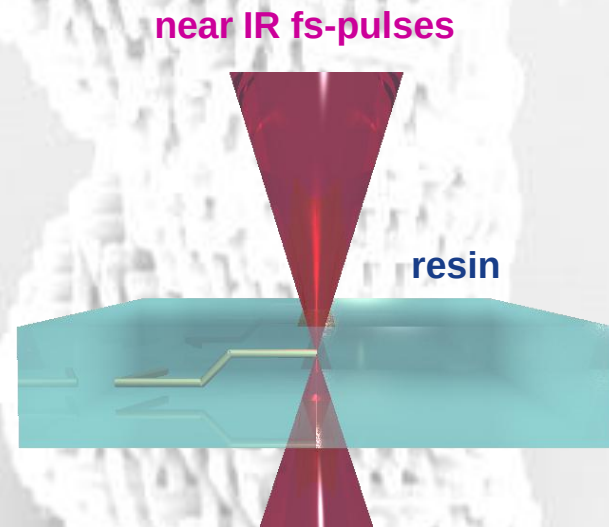
les impulsions laser Fs permettent
le dépôt d'énergie dans un volume restreint !

3D Nano Ingénierie

Nanostructuration 3D par polymérisation à 2 Photons



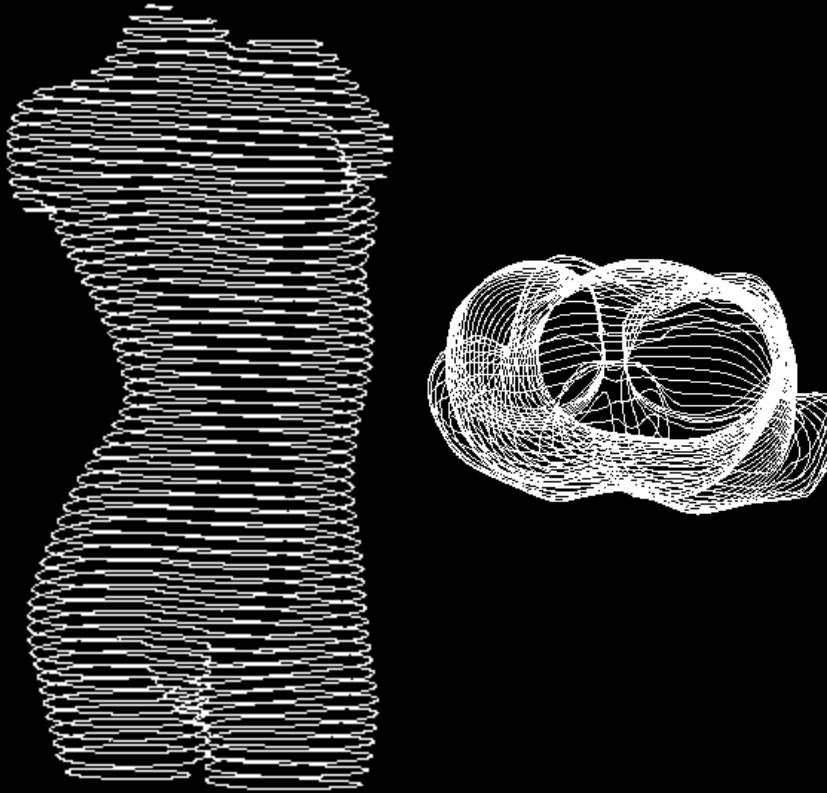
Ormocer



Opt. Lett. **28**, 301, (2003)
Adv. Eng. Mat. **5**, 551, (2003)

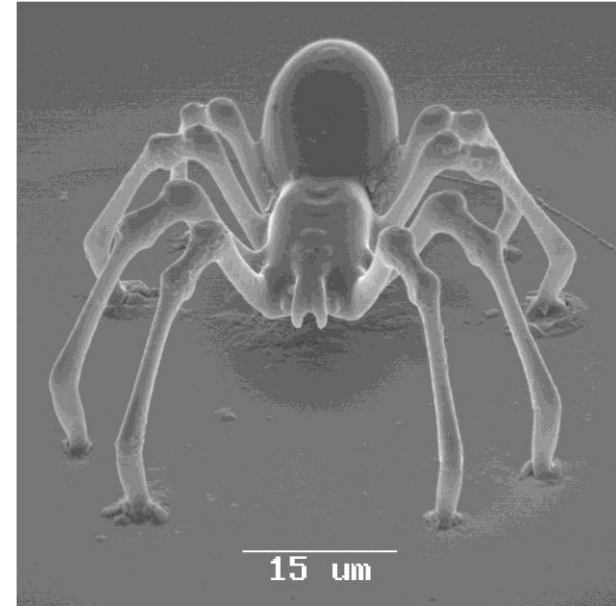
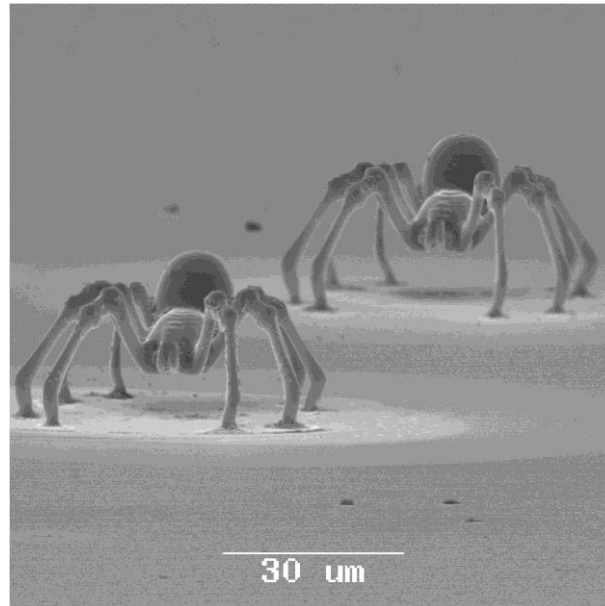
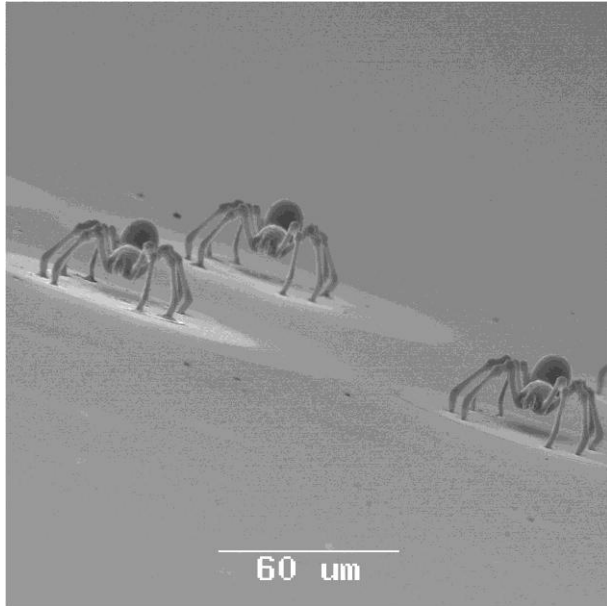
Deutsches Patent 101 52 878.7-43

Online observation

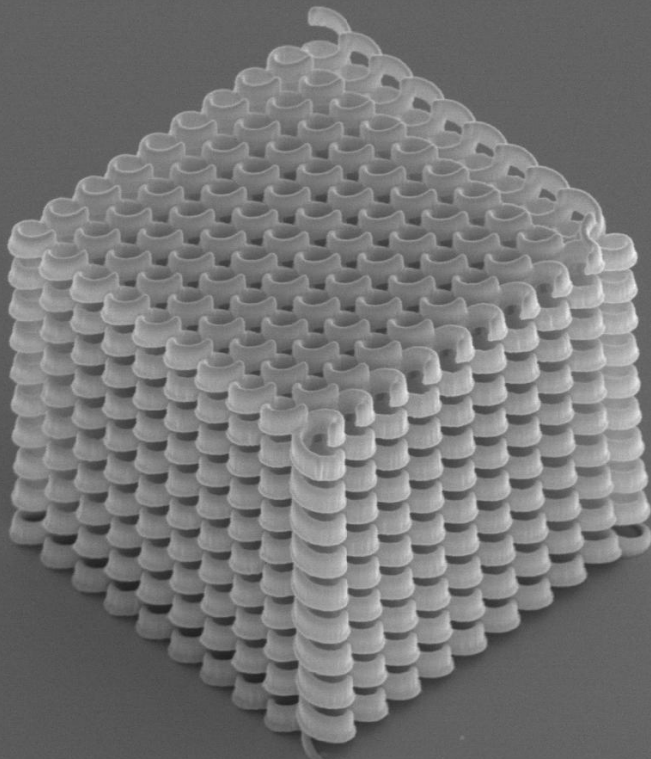


Opt. Exp. **12**, 5221 (2004)

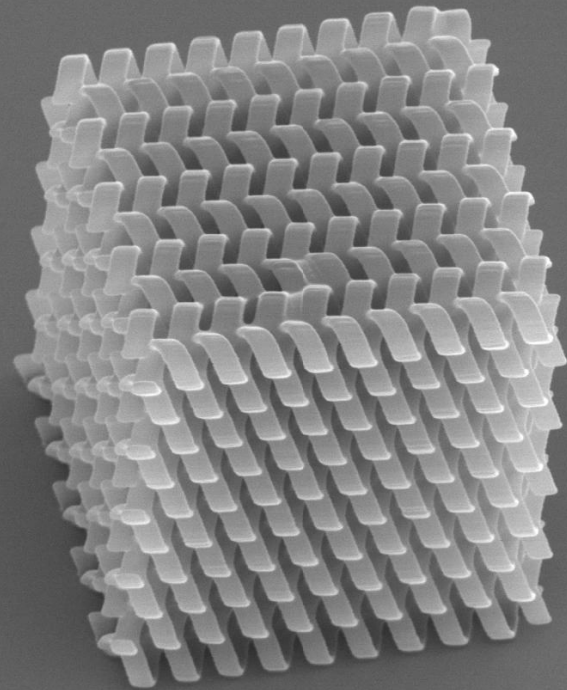
3D μ -Models (SU-8)



PhCs fabricated in novel Zr hybrid polymers



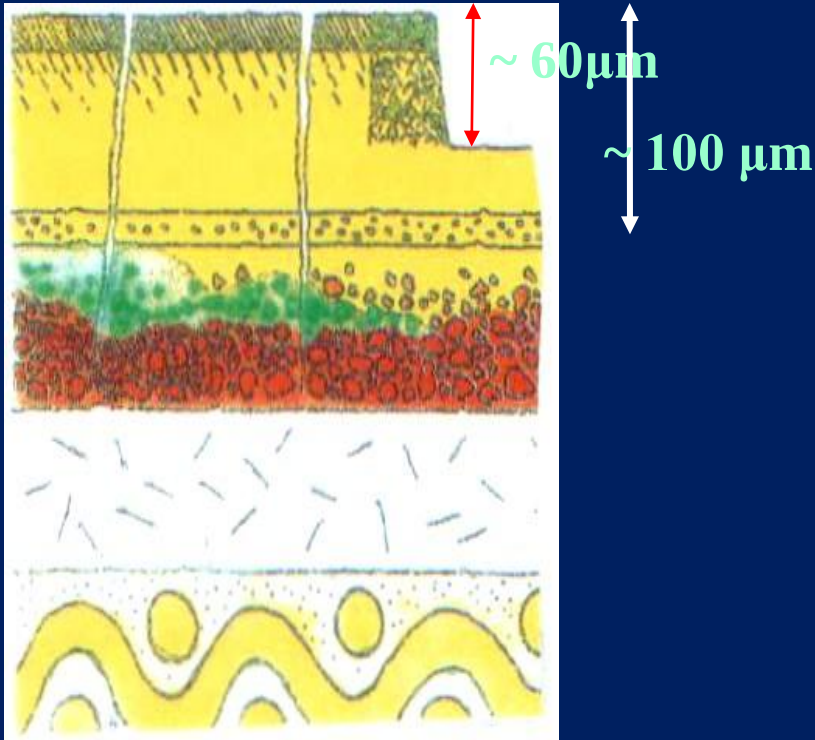
16 μm



16 μm

Nature Photonics, v. 3, 450 (2009)

Restauration d'œuvre d'art



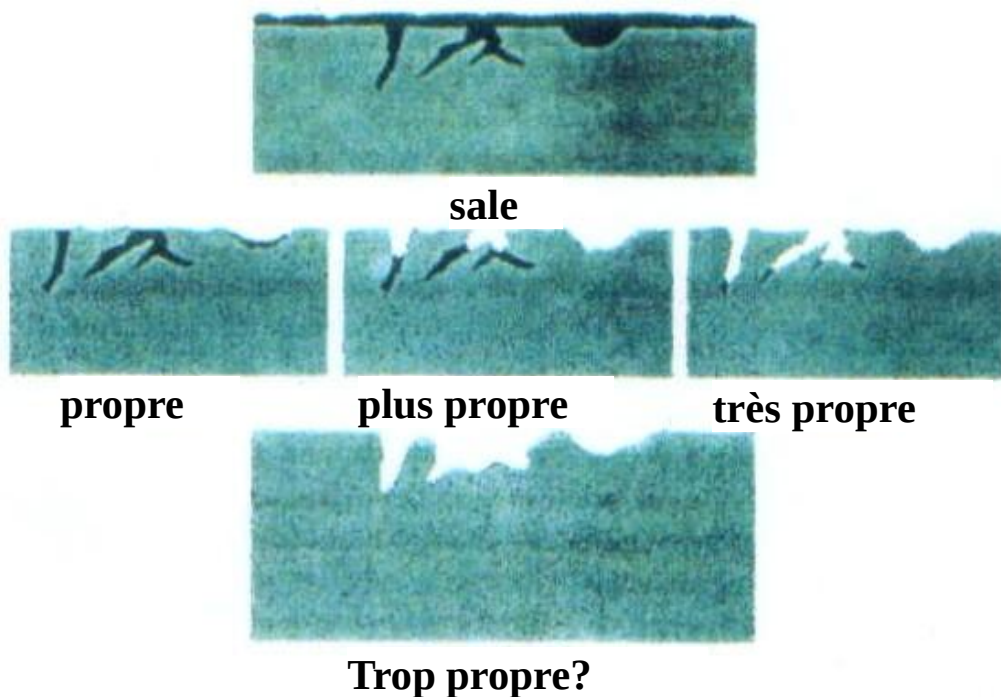
- Les procédés chimiques ne permettent pas un contrôle suffisamment précis de l'épaisseur des couches enlevées ni une sélectivité suffisamment grande.

- Les colorants utilisés sont fortement absorbants $\Rightarrow$ contrôle précis de l'épaisseur ablatée (0,1 - 1 μm par tir)

- Les sous-couches ne sont pas affectées



restauration d'œuvre d'art



Effets à long terme

- Photochimique :
endommagement de la
couche de protection
 - Photomécanique :
fragilisation des couches
superficielles
- ⇒ optimisation des
paramètres de traitement

Restauration d'œuvre d'art

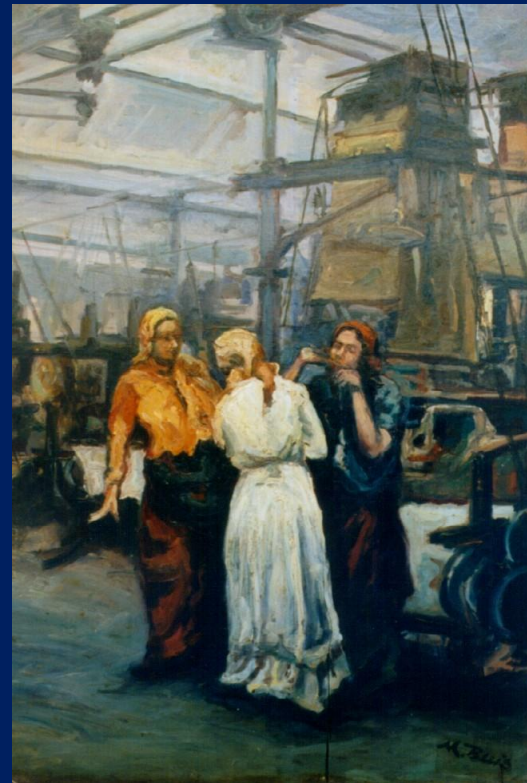


**Jan van Vuuren, “Image d’un
village” (1925),
(endommagé dans un incendie)**

**Owners: A.L. Verheij, De
Manenstegell (Bathmen, The
Netherlands)**

**Restauration par laser par
Art Innovation b.v.**

Restauration d'œuvre d'art



Excimer Laser Restoration of Painted Artworks



Restauration d 'œuvre d 'art



Nettoyage de la pierre :

Hôtel de ville de Bruxelles

Quantel; Laser Blast



Le laser et ses applications n'ont pas finis de fasciner l'homme et de révolutionner la science et notre société!

Des extrêmes inégalées:

- température : de qq 10^{-9} °K à 111 Millions °K
- temps : du continu (infini) à 10^{-18} s
- dimension : de la molécule à l'univers
- pression : des pinces optiques au Giga Pascal
- longueur d'onde : de l'X au THz
- des champs électriques gigantesques (100 GV)
- etc..

