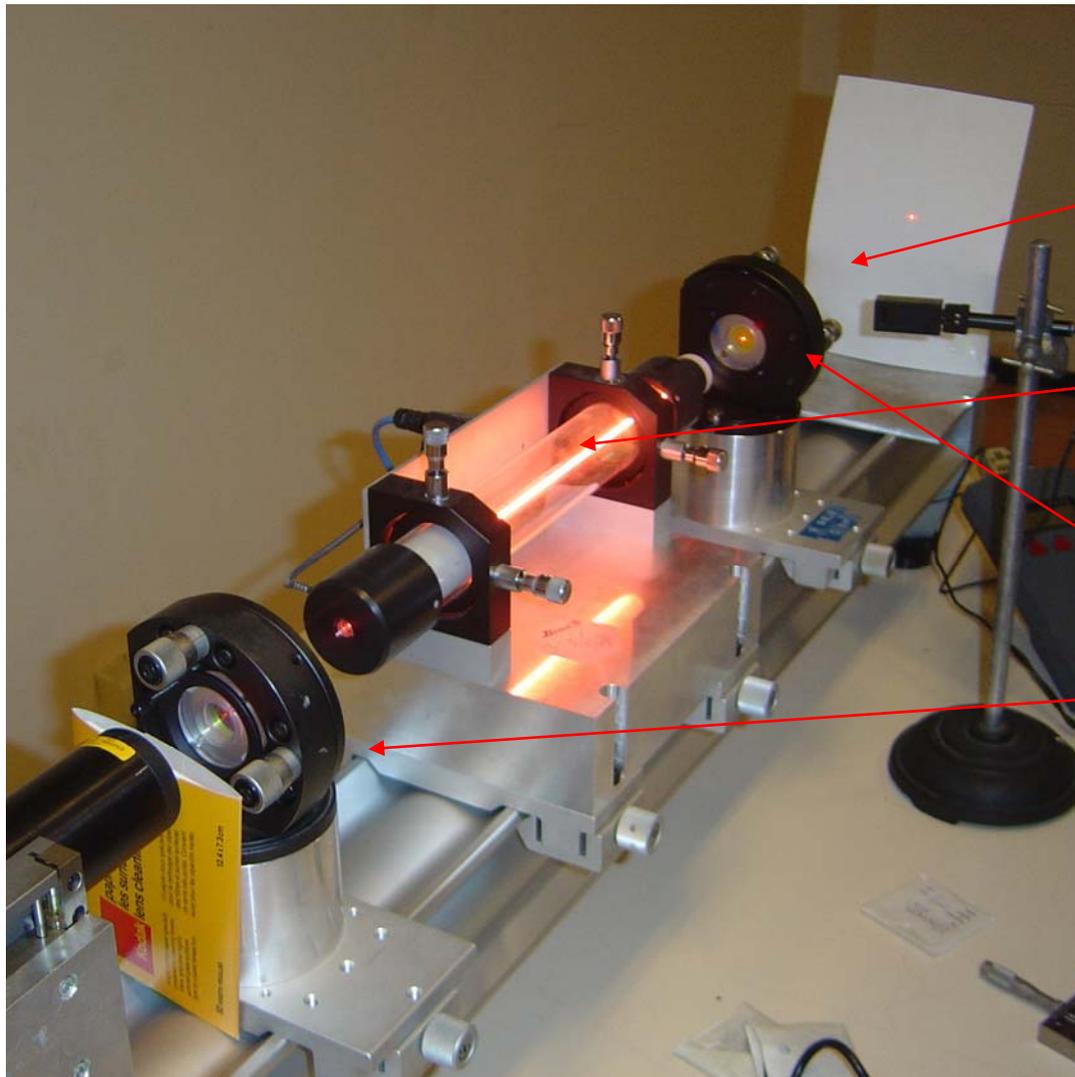


Photonique **M**étrologie **O**ptique

Sources lumineuses,
spectrométrie, lasers
Partie 2

Exemple pratique



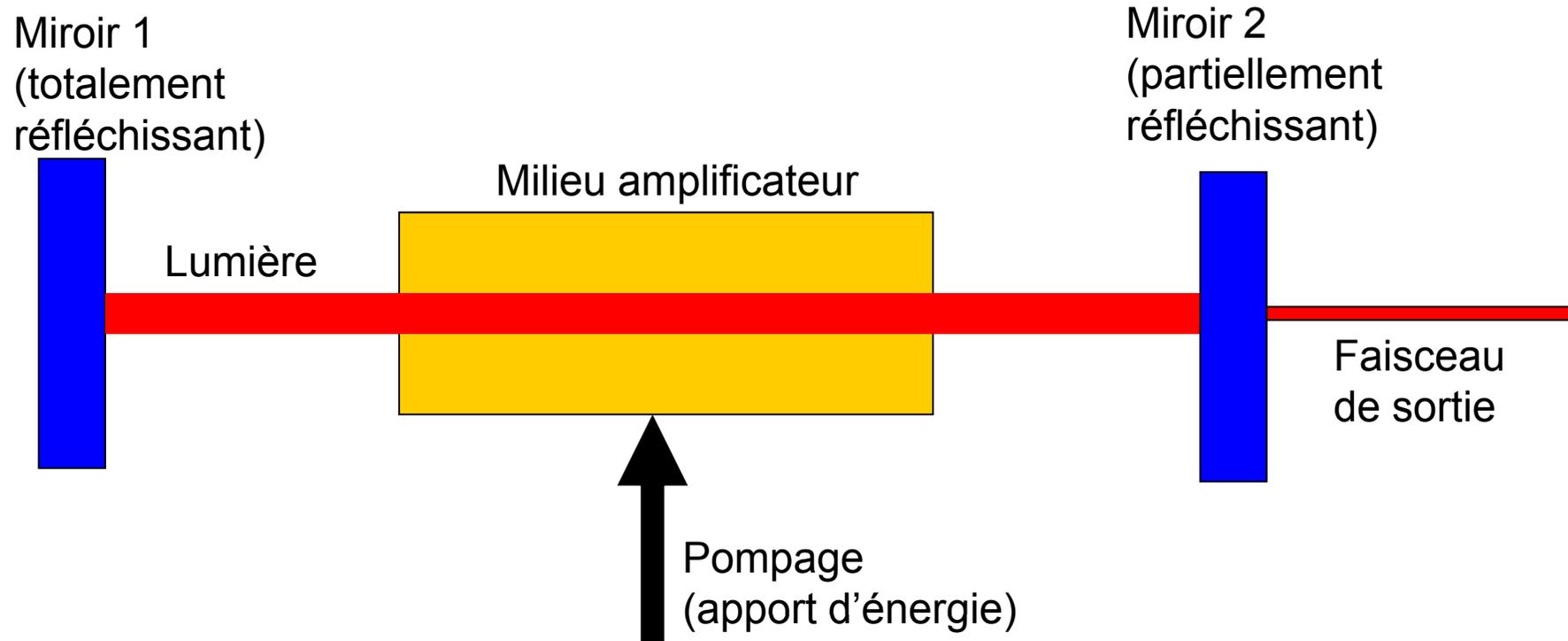
Faisceau
de sortie

Milieu
amplificateur

Miroirs

Laser Hélium-Néon, (LKB, Paris)

Composants d'un laser



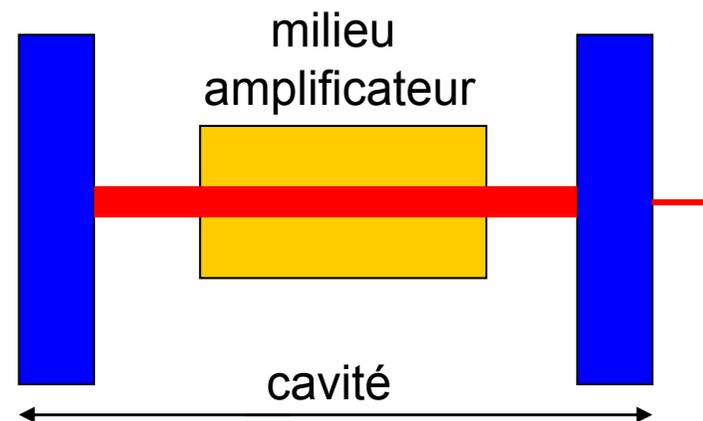
Un laser se compose de:

- 1) Un milieu amplificateur
- 2) Une cavité optique dont l'un des miroirs présente une transmission non nulle ($\approx 1\%$)

Condition sur le gain lors du passage dans le milieu amplificateur

Le laser ne peut fonctionner que si l'énergie gagnée lors du passage dans le milieu amplificateur dépasse l'énergie perdue dans la cavité.

Condition: « gain > pertes »

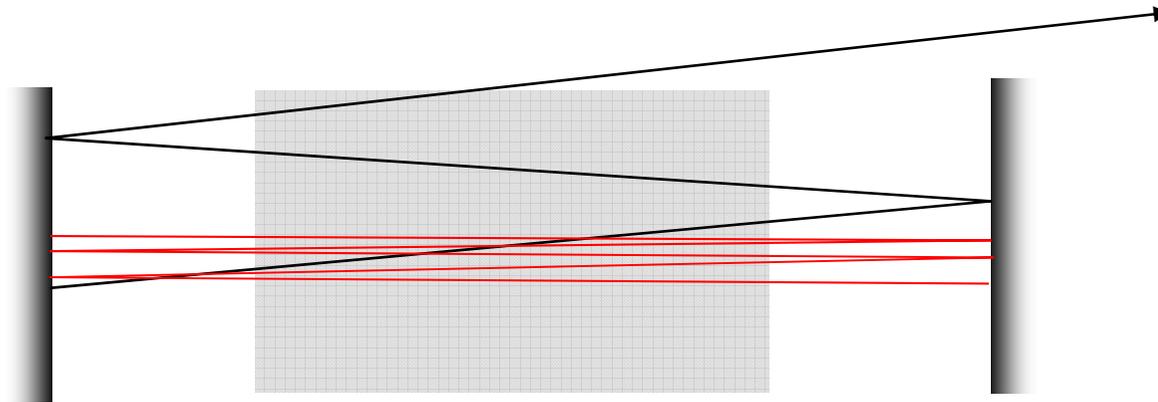


Le **gain** dépend de la nature du milieu amplificateur et est donc très fortement dépendant de la **longueur d'onde** (valeur élevée pour la gamme de longueurs d'onde permettant l'émission stimulée).

Les **pertes** ont deux origines:

- Transmission sur le deuxième miroir (« utiles »)
- Pertes lors de la propagation dans la cavité (« inutiles »)

Construction du faisceau parallèle

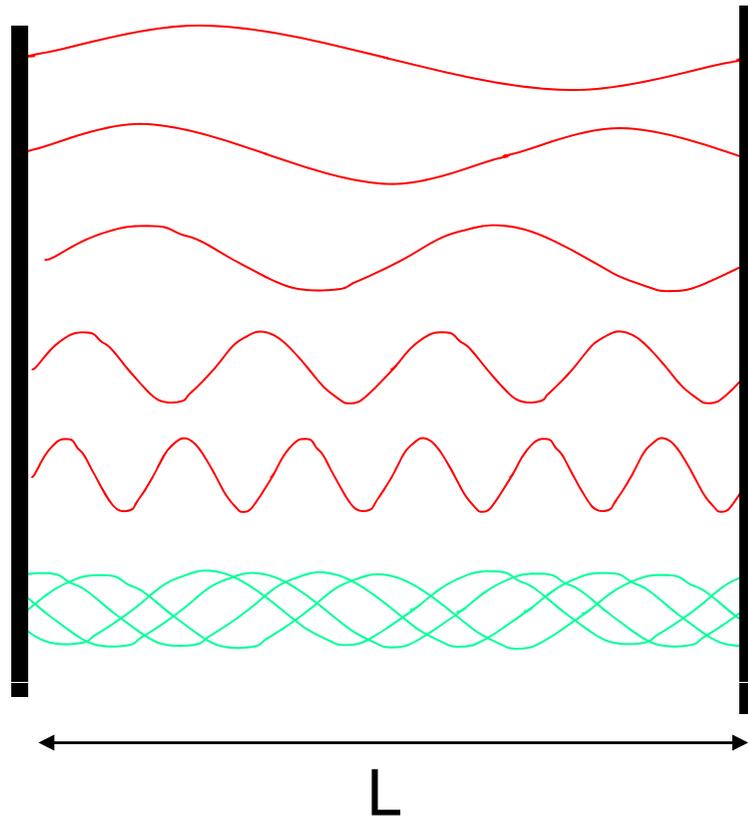


Peu d'Aller-Retour avant de quitter la cavité : pas d'amplification

Beaucoup d'AR avant de quitter la cavité : Amplification possible

Résonateur type "Fabry-Perot"

Les modes d'une cavité



Modes
propres

$$2L = n \cdot \lambda$$



$$\nu_n = n \cdot c / 2L$$

Condition de
"Rebouclage
en phase" sur
un aller-retour

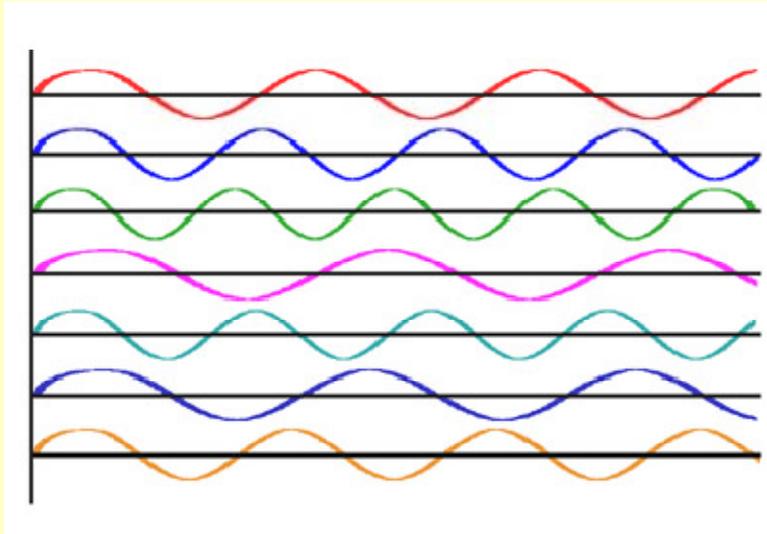
Au bout de quelques
AR tout mode *non*
résonnant a une
intensité nulle

Dans l'espace des fréquences :



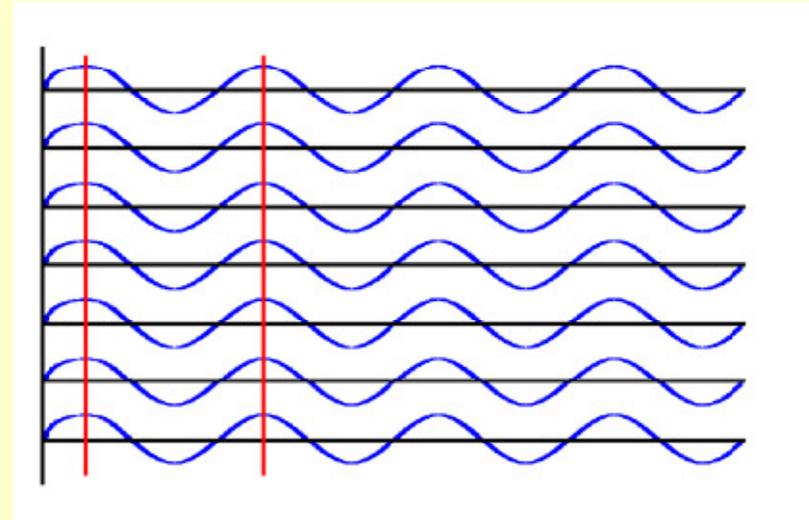
La lumière laser est cohérente

Lumière blanche



Ensemble de photons ayant des fréquences et des phases indépendantes.

Lumière laser

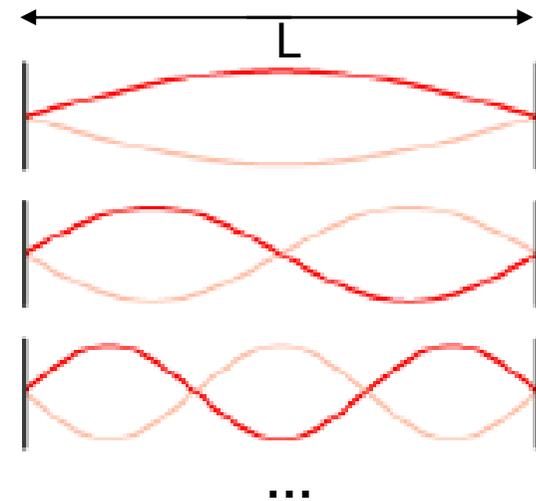


Tous les photons émis sont de même fréquence et en phase.
Lumière « **cohérente** »

Conditions nécessaires au fonctionnement

1) Modes de cavité

Une cavité de longueur L ne permet que certains modes: $2L$ doit être un **multiple de la longueur d'onde** du mode (de manière à obtenir une onde stationnaire).



Fréquences autorisées:

$$\lambda = \frac{2L}{n} = \frac{c}{f} \Rightarrow f = n \frac{c}{2L}$$

Les fréquences autorisées sont donc des multiples de $c/2L$.

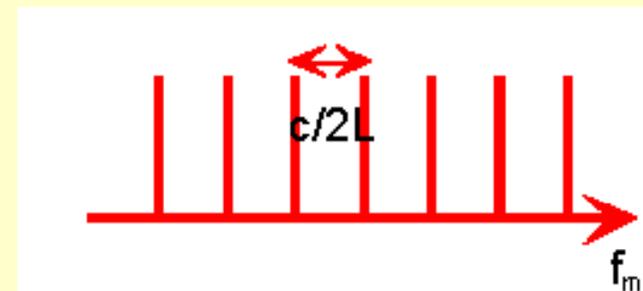
λ : longueur d'onde

n : entier

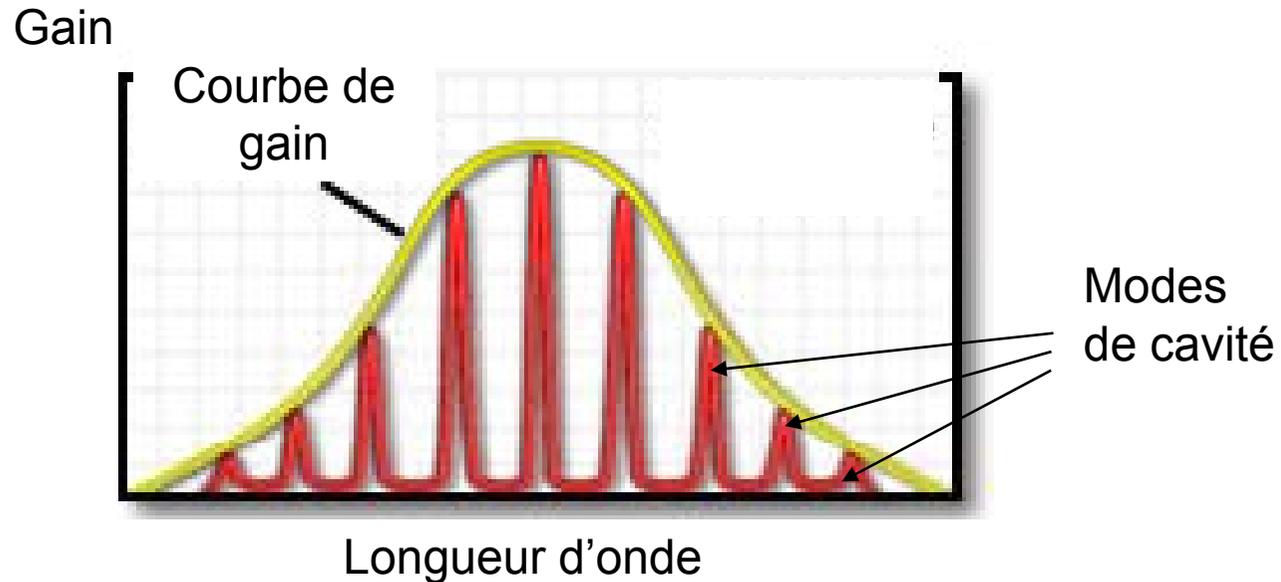
$2L$: longueur de la cavité (aller-retour)

c : vitesse de la lumière

F : fréquence de la lumière



Modes émis par un laser



Les longueurs d'onde qu'un laser peut émettre (ses « modes »):

- modes de cavités ($2L = n \lambda$)
- longueurs d'onde dans la gamme (étroite) correspondant à un gain élevé.

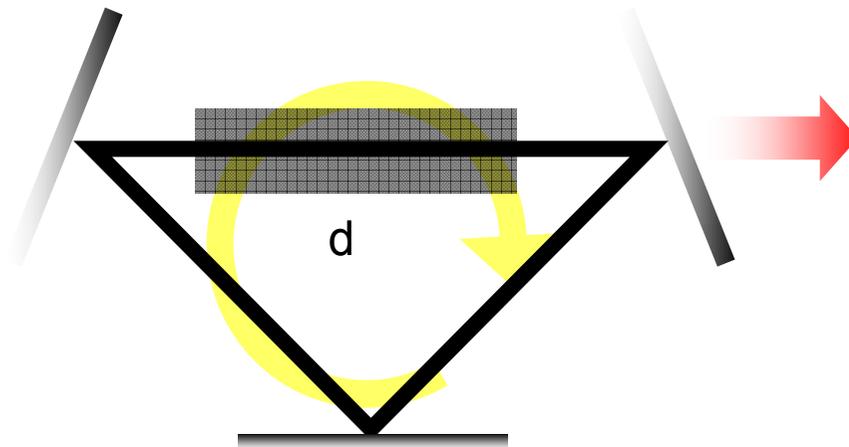
NB: Il existe des lasers **monomodes** et des lasers **multimodes**.

Types de cavité

- On n'a parlé que de cavités linéaires type :
- Mais toute cavité "bouclée" peut marcher !



Ex : Cavité en anneau ("d" remplace les "2L" des expressions précédentes)

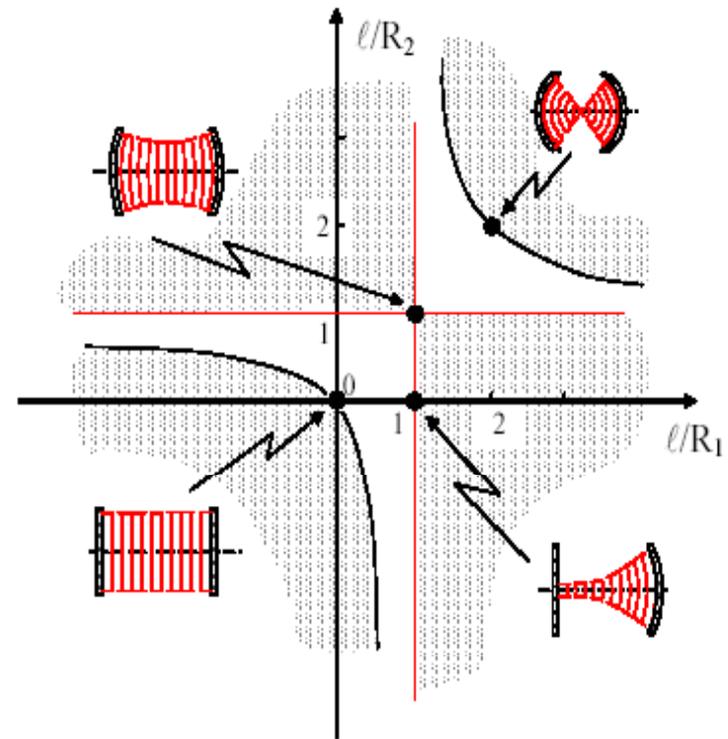
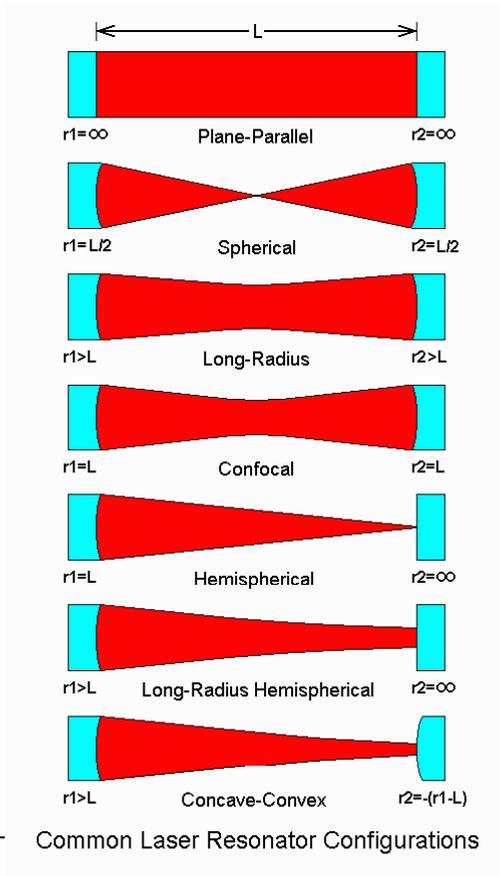


Rq : Onde progressive : pas de brûlage de trous donc fonctionnement monomode plus facile

Stabilité d'une cavité

Condition sur les miroirs pour qu'un rayon paraxial reste dans la cavité après un nombre infini d'aller-retours

- 2 miroirs R_1 , R_2 , cavité de longueur L

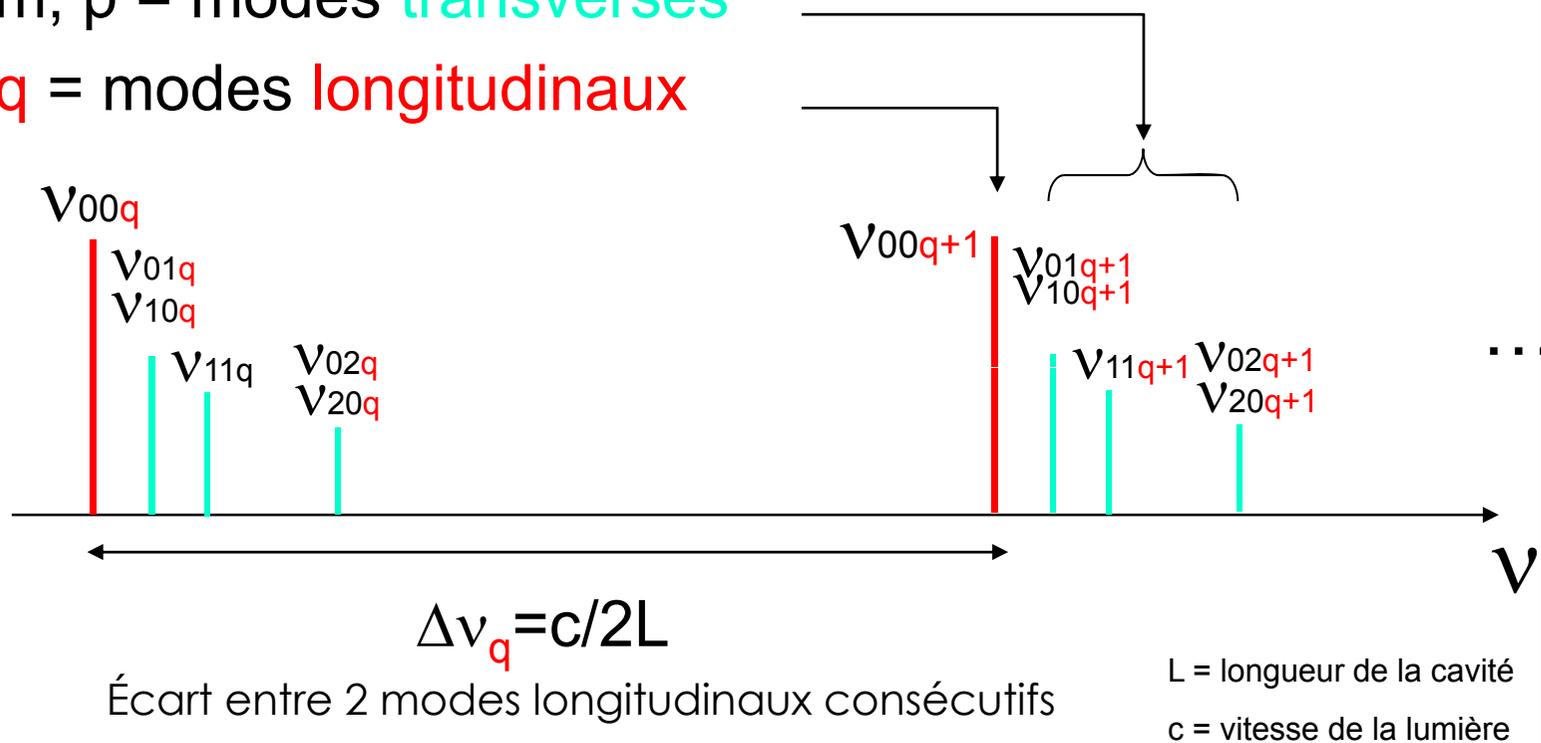


Répartition spectrale des modes

- Un mode ν_{mpq} = un triplet m, p, q

- m, p = modes **transverses**

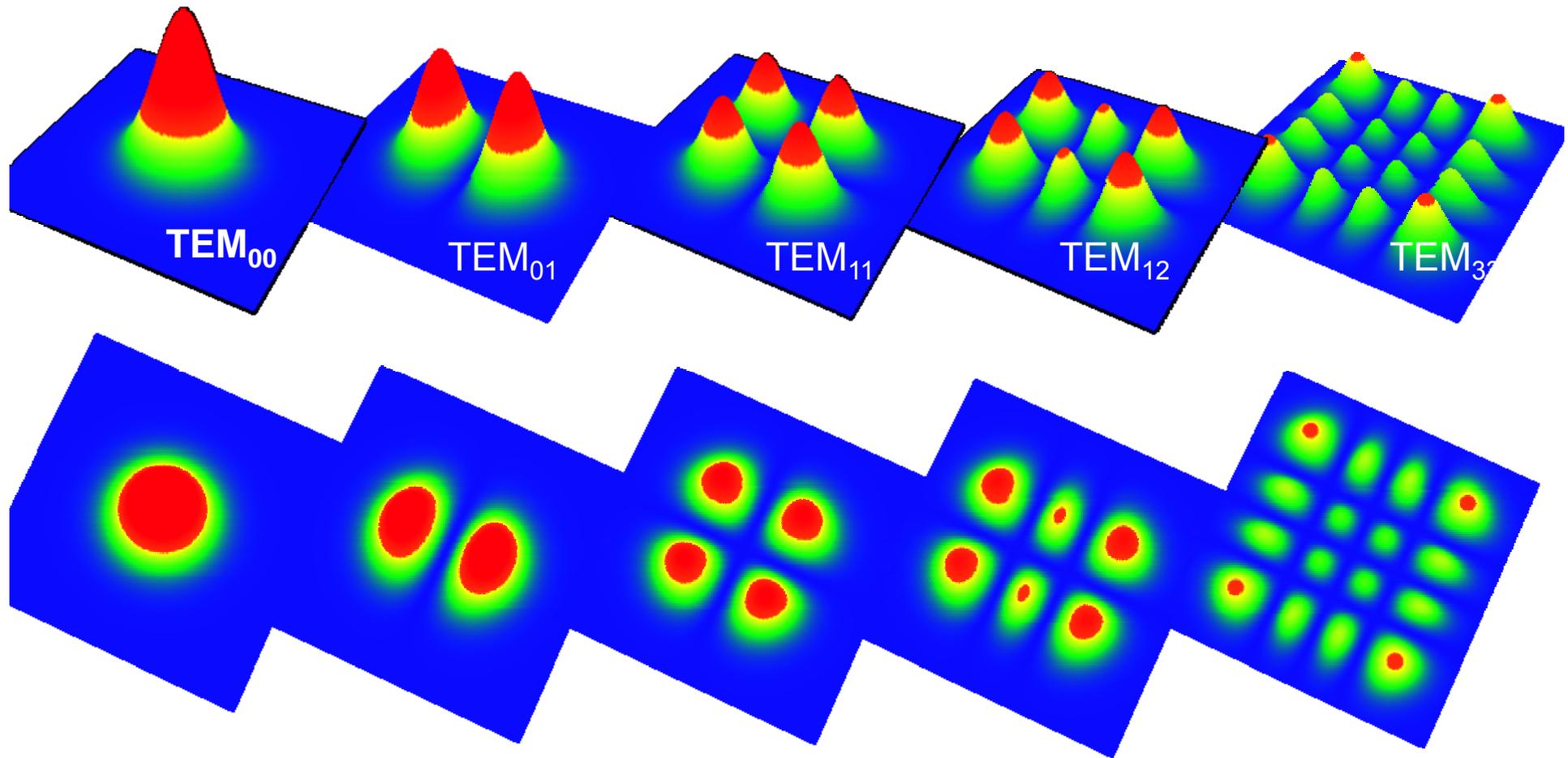
- q = modes **longitudinaux**



Un laser est monomode longitudinal si seuls les modes TEM_{mpq} lasent (q fixé).

Un laser est monomode transverse si seuls les modes TEM_{00q} lasent.

Répartition spatiale des modes

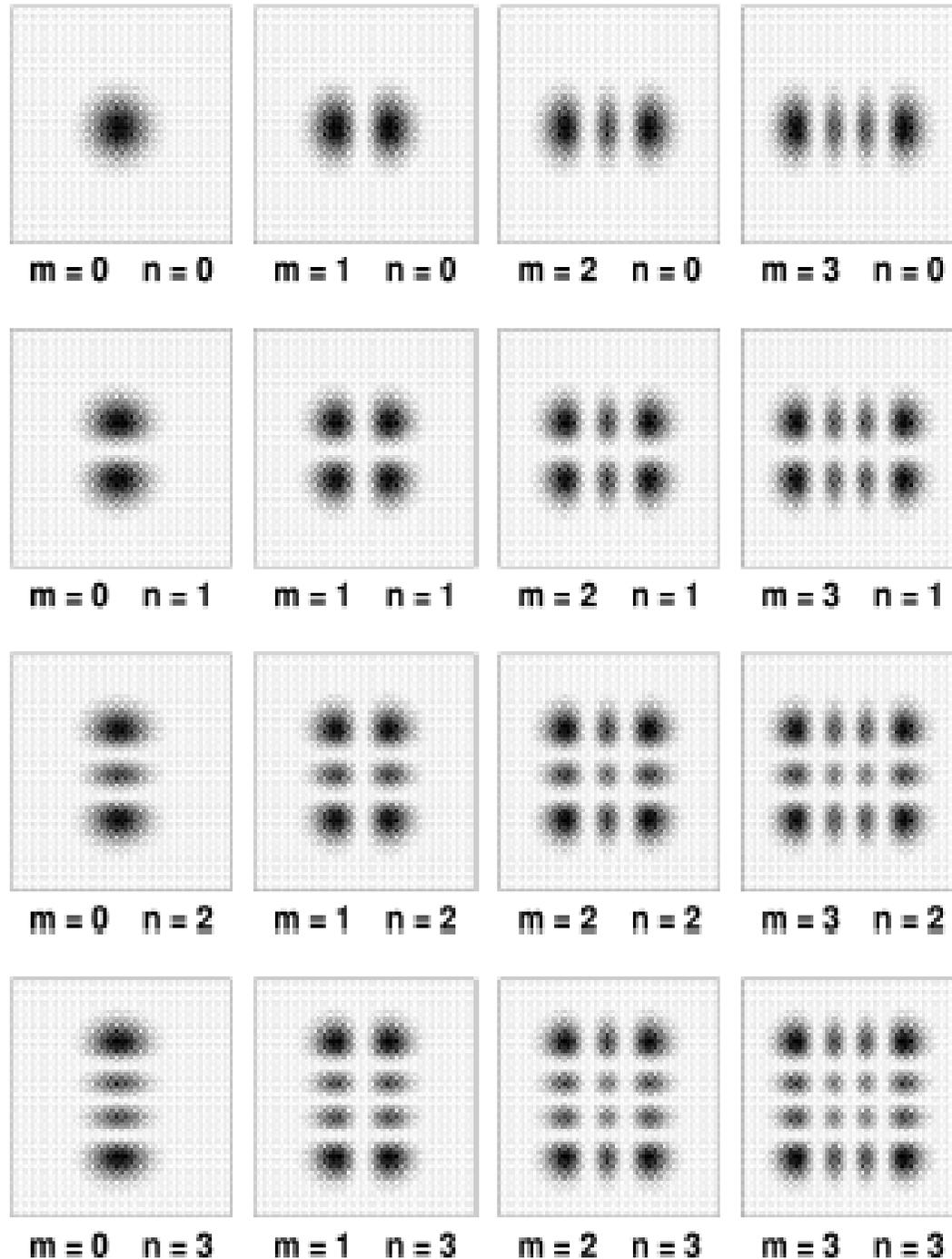


Modes TEM_{m,n}

Beam quality, M^2 :

The ratio of the laser beam's multimode diameter-divergence product to the ideal diffraction limited (TEM₀₀) beam diameter-divergence product

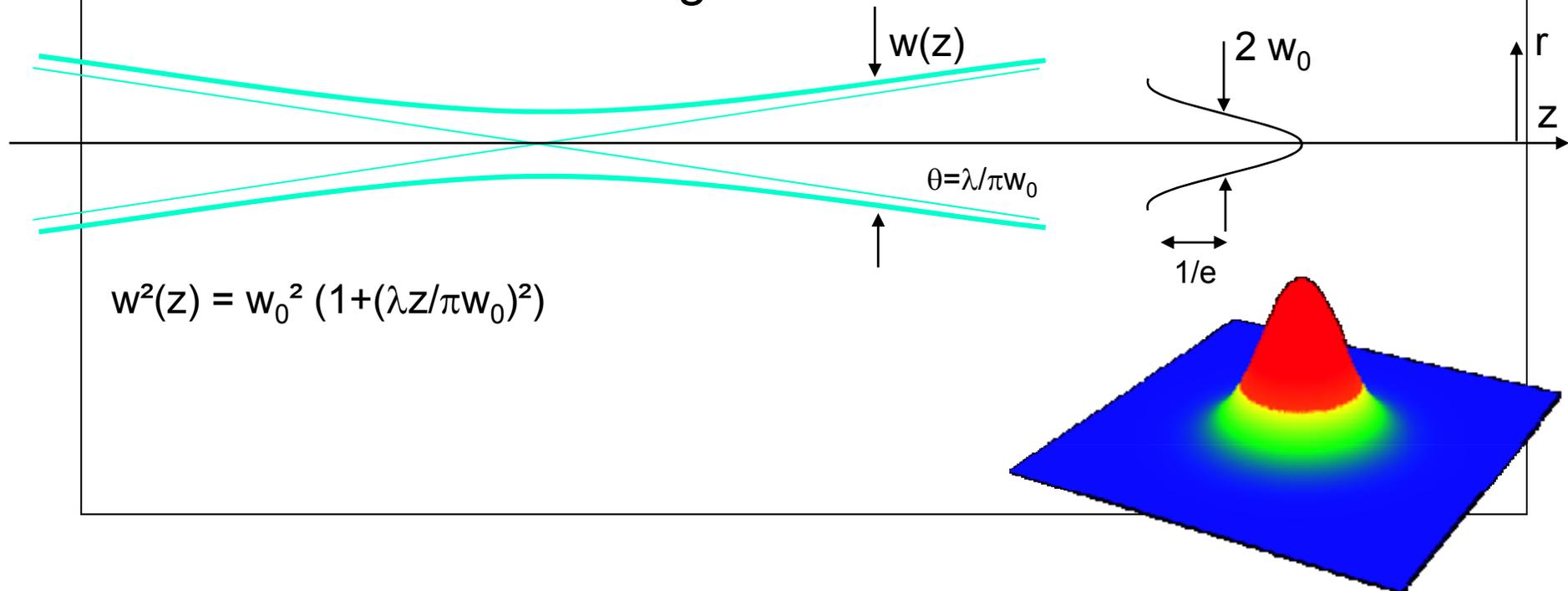
$M^2=1 \rightarrow$ Gaussian beam



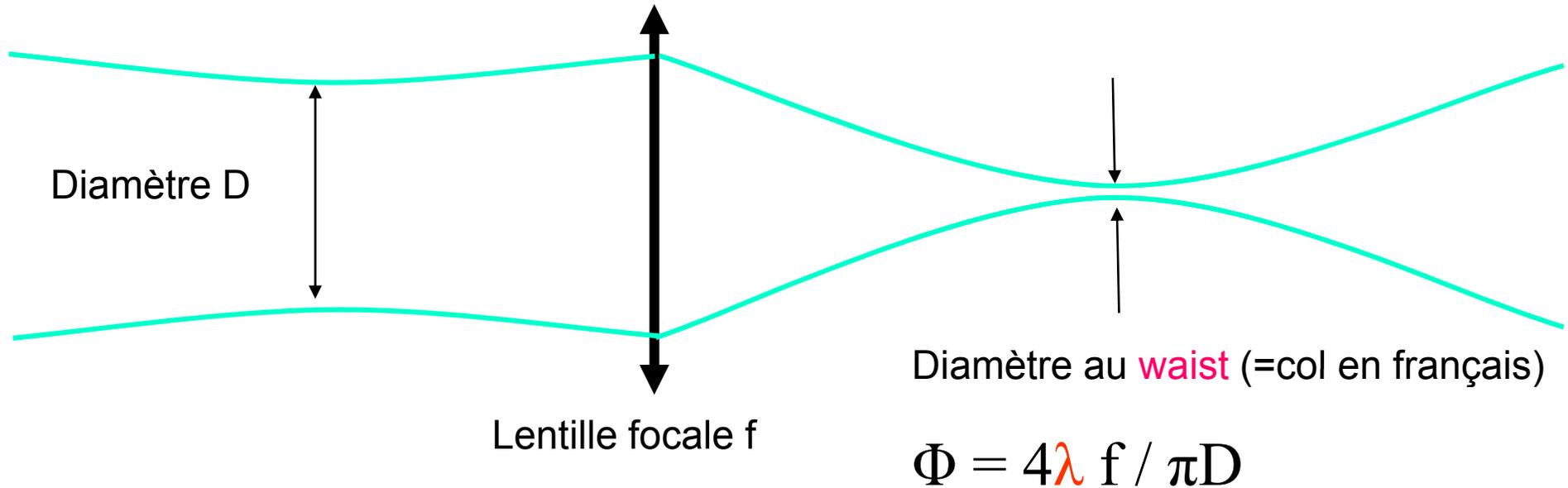
L'émission LASER

- Propriétés SPATIALES

- Faisceau très directif, collimaté (divergence très faible, mais pas nulle- 1 mrad environ)
- Profil Gaussien en général



Propriétés de l'émission LASER



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

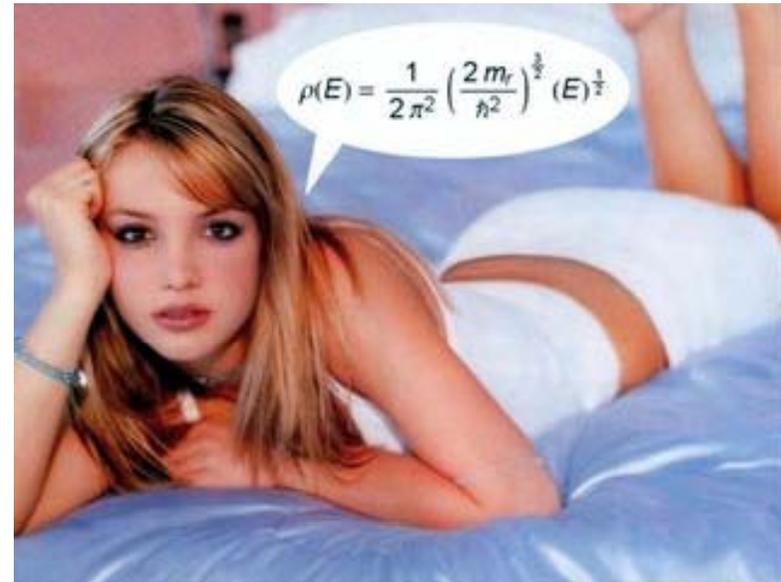
Focalisation sur des très petites dimensions (surface min $\sim \lambda^2$)

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

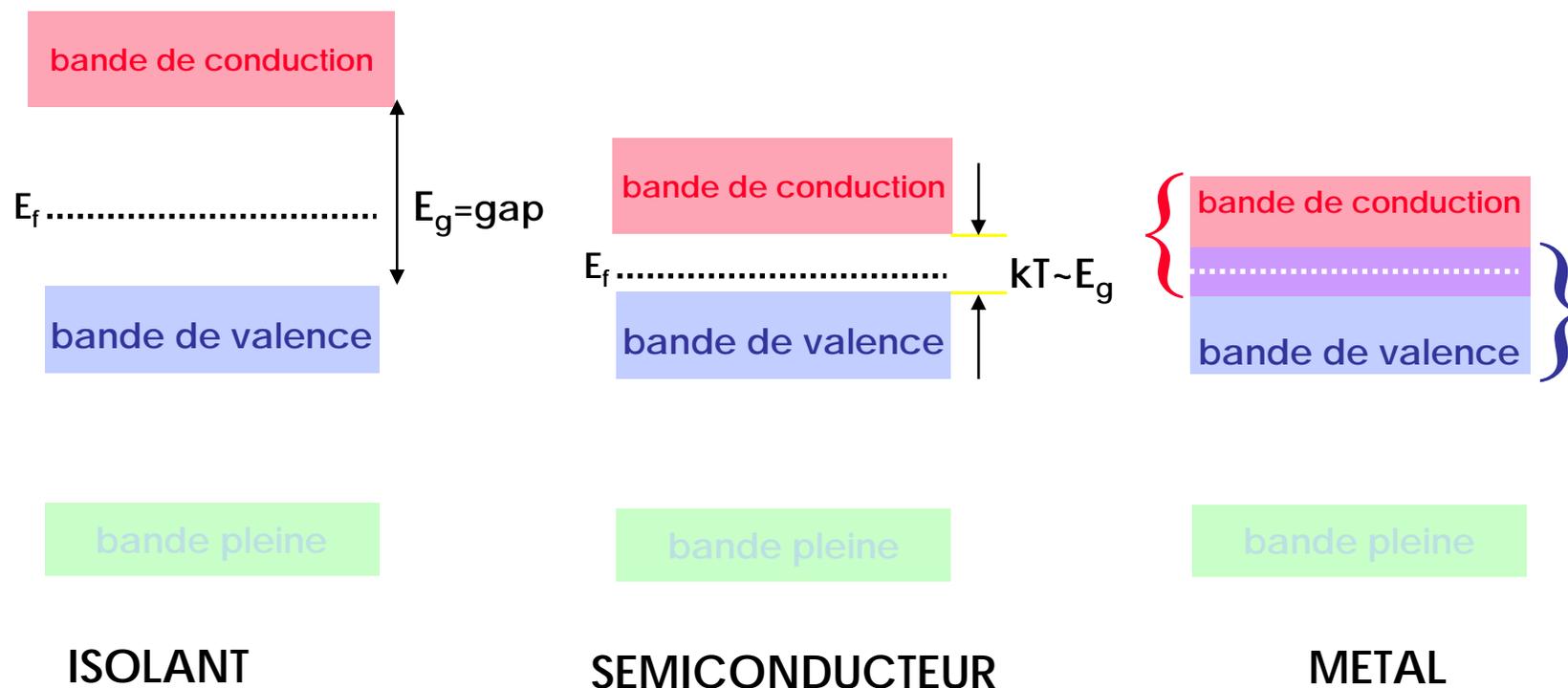
Ordre de grandeur : laser 10 W à $\lambda = 500$ nm (vert) :
densité de puissance max au waist (=Puissance/surface) =
 $10 / (0,5 \cdot 10^{-6})^2 = 4 \text{ GW/cm}^2$

Vérifiez vos sources d'information !

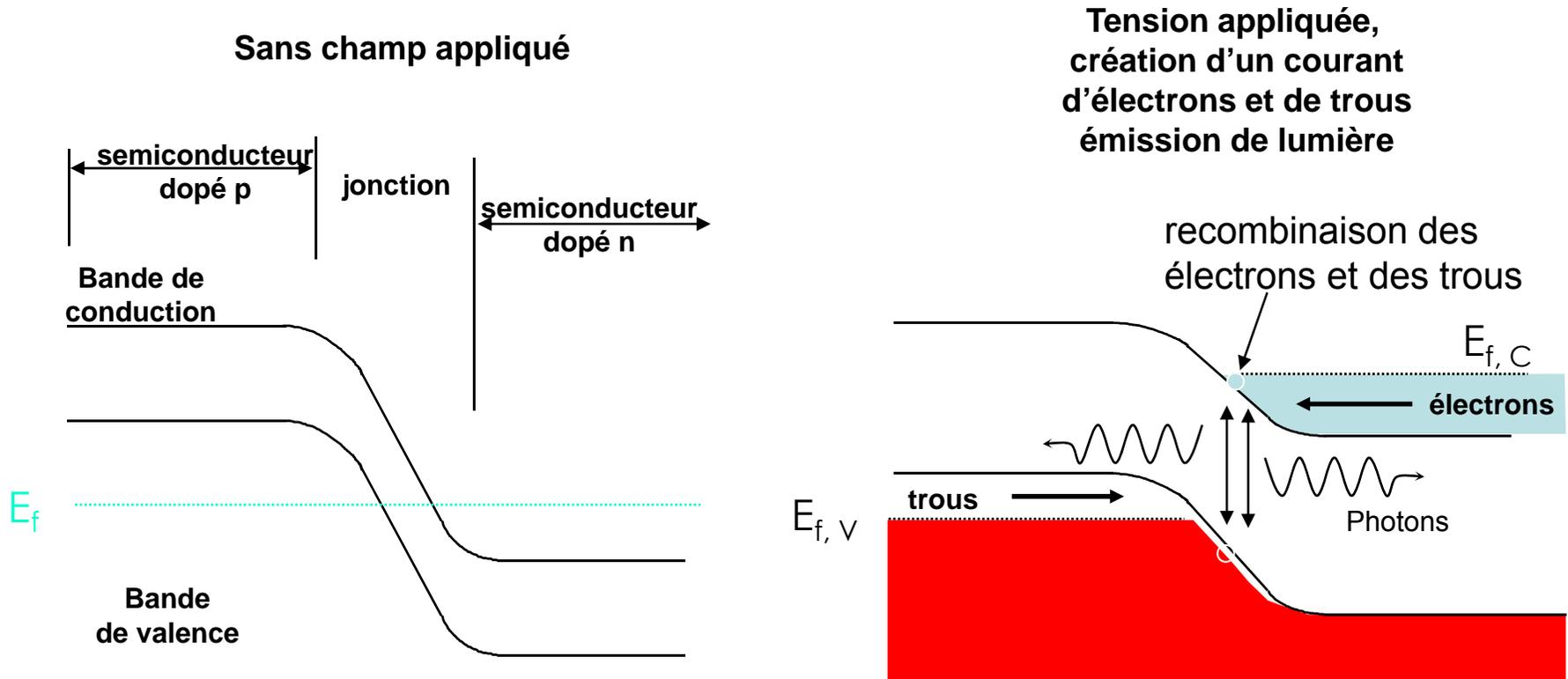
- It is a little known fact, that Ms Spears is an expert in semiconductor physics. Not content with just singing and acting, in the following pages, she will guide you in the fundamentals of the vital semiconductor laser components that have made it possible to hear her super music in a digital format.
- <http://britneyspears.ac/lasers.htm>



ELECTRON DANS UN SOLIDE : DIAGRAMME DES BANDES D'ENERGIE



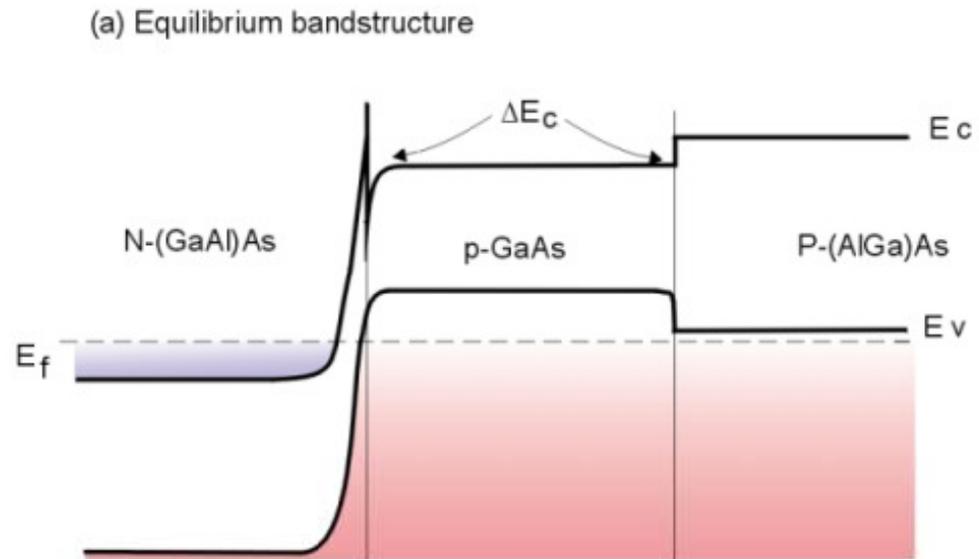
STRUCTURE DE BANDES



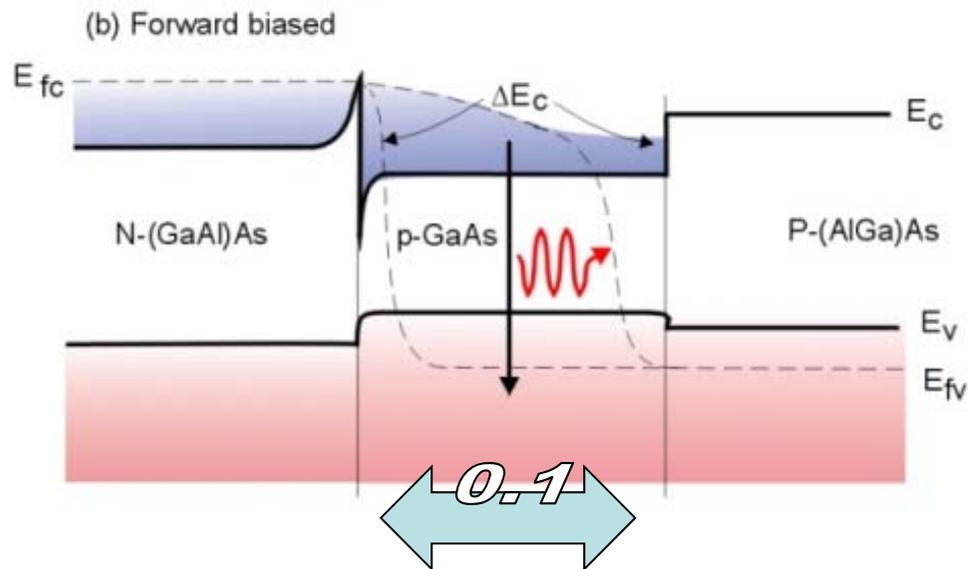
Le silicium massif ne peut pas émettre de lumière (SC à gap indirect) : les SC utilisés pour les diodes laser sont à gap direct : GaAs, InGaAs, AlGaAs etc.

Mise sous tension de la jonction

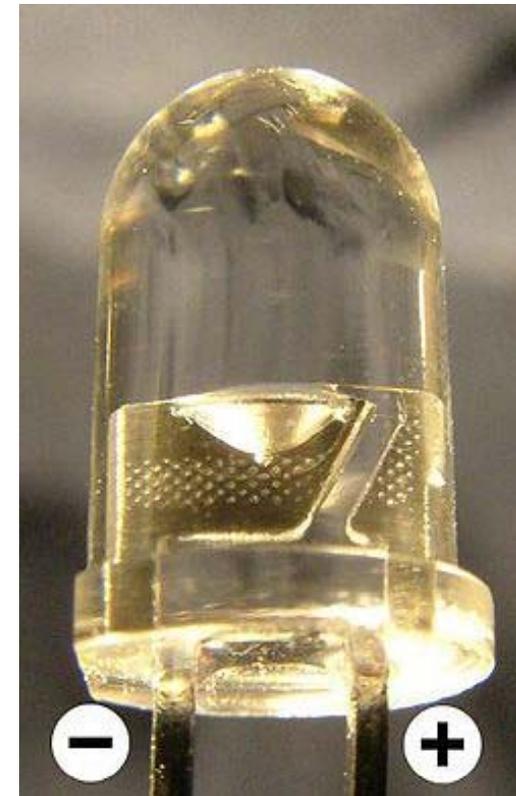
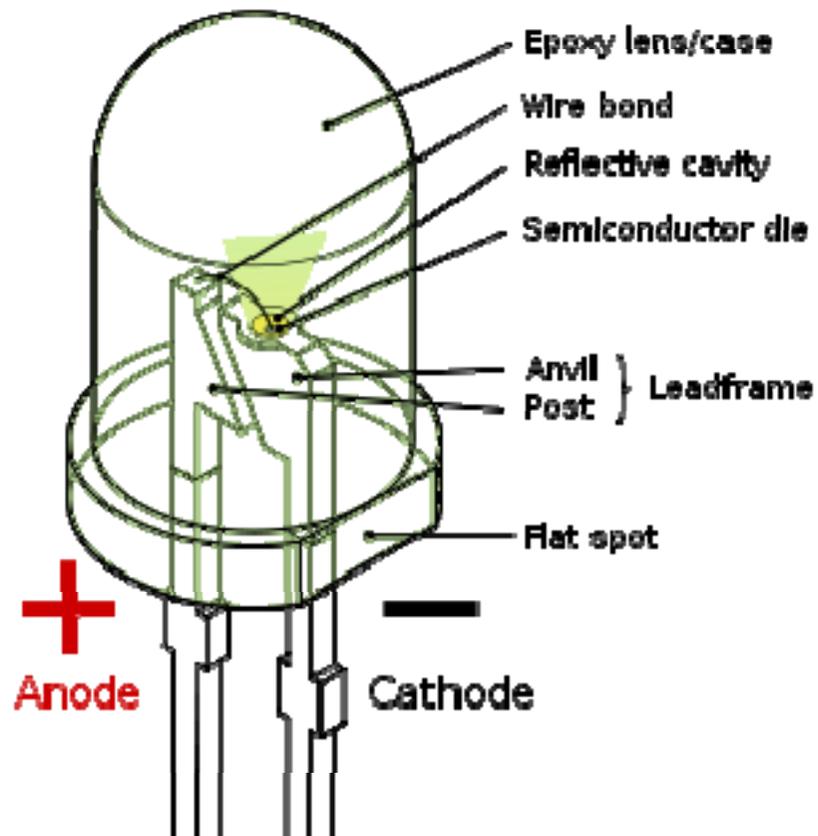
- 0 V



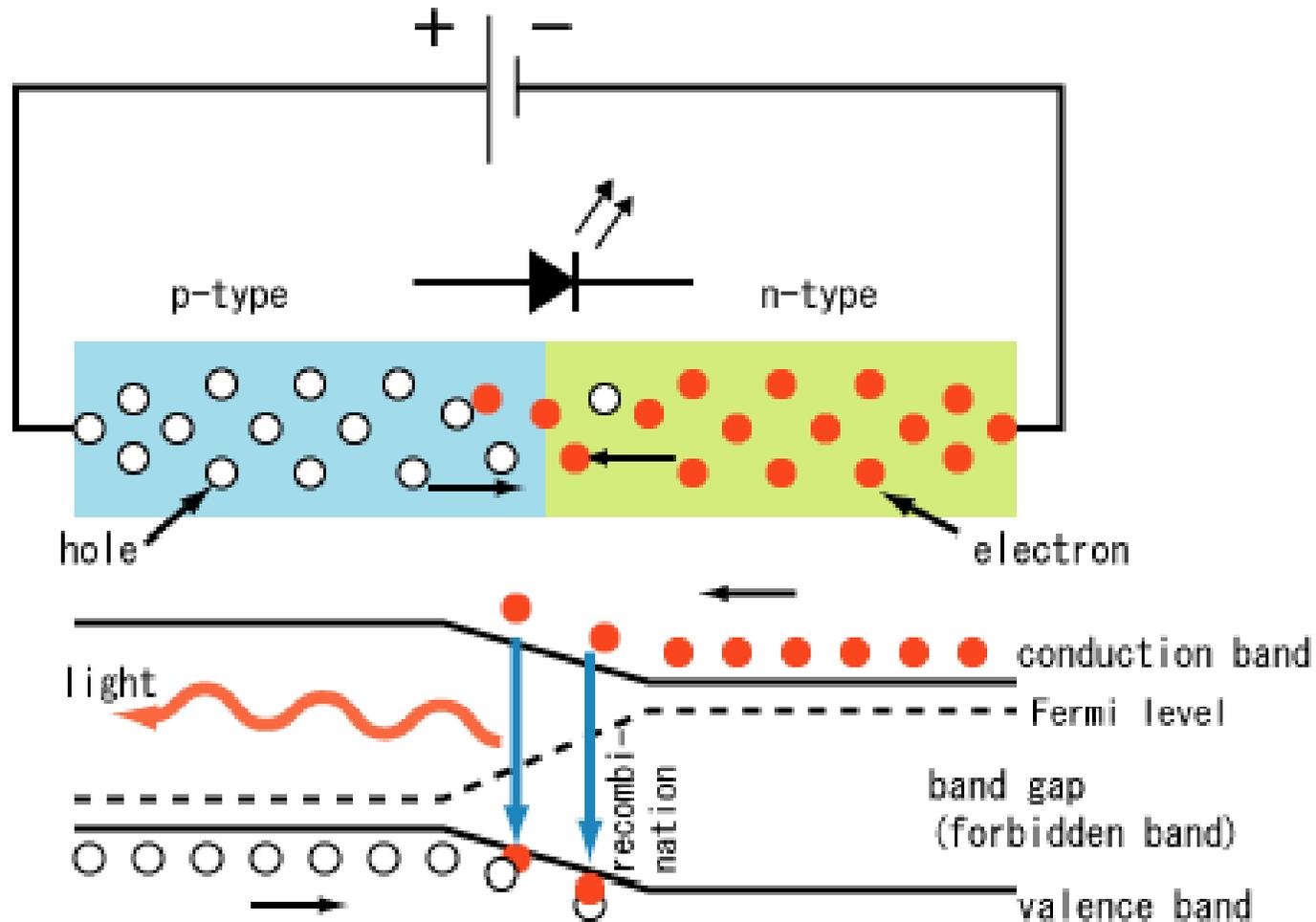
- 1.5 V



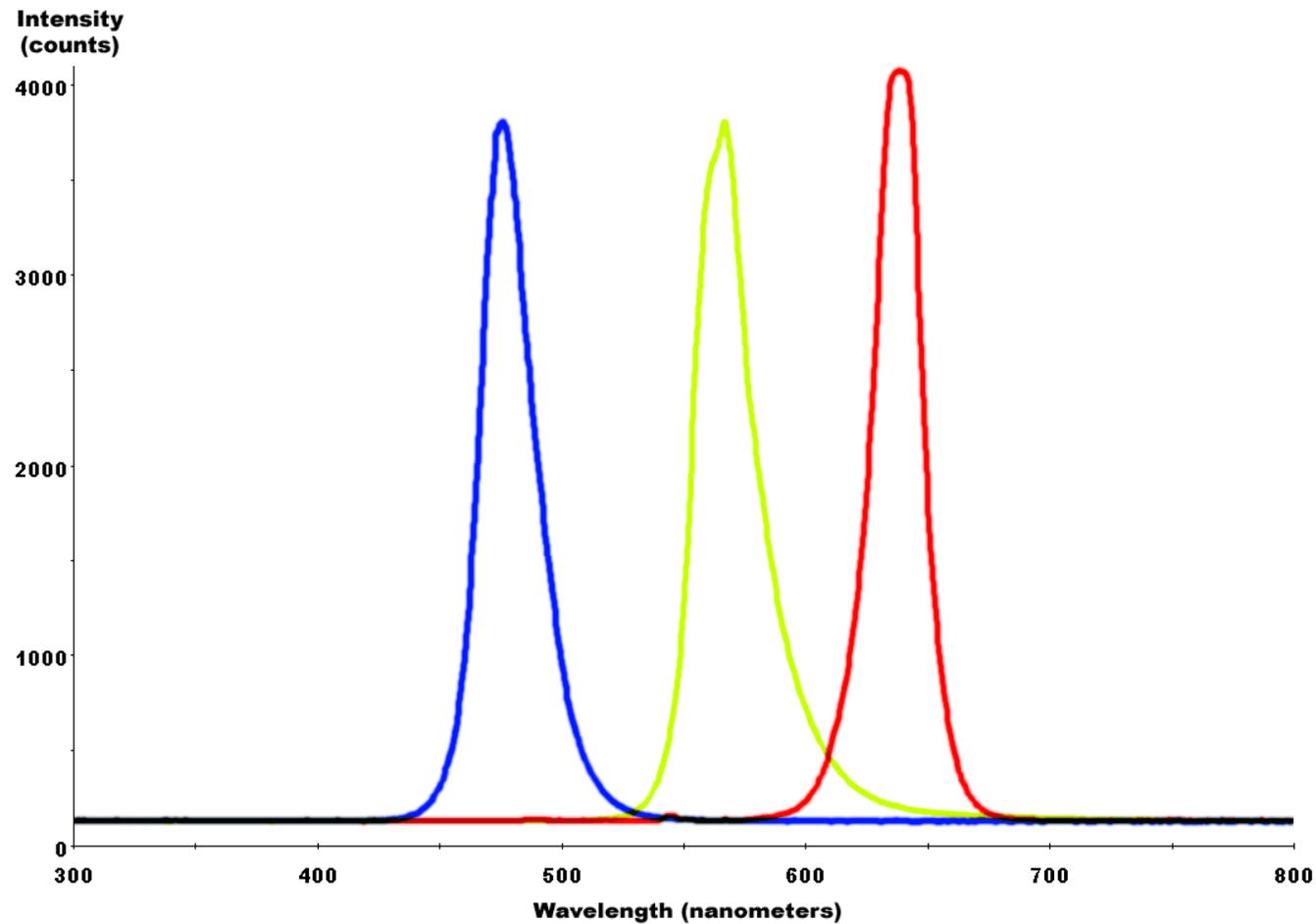
LED = diode émettrice de lumière



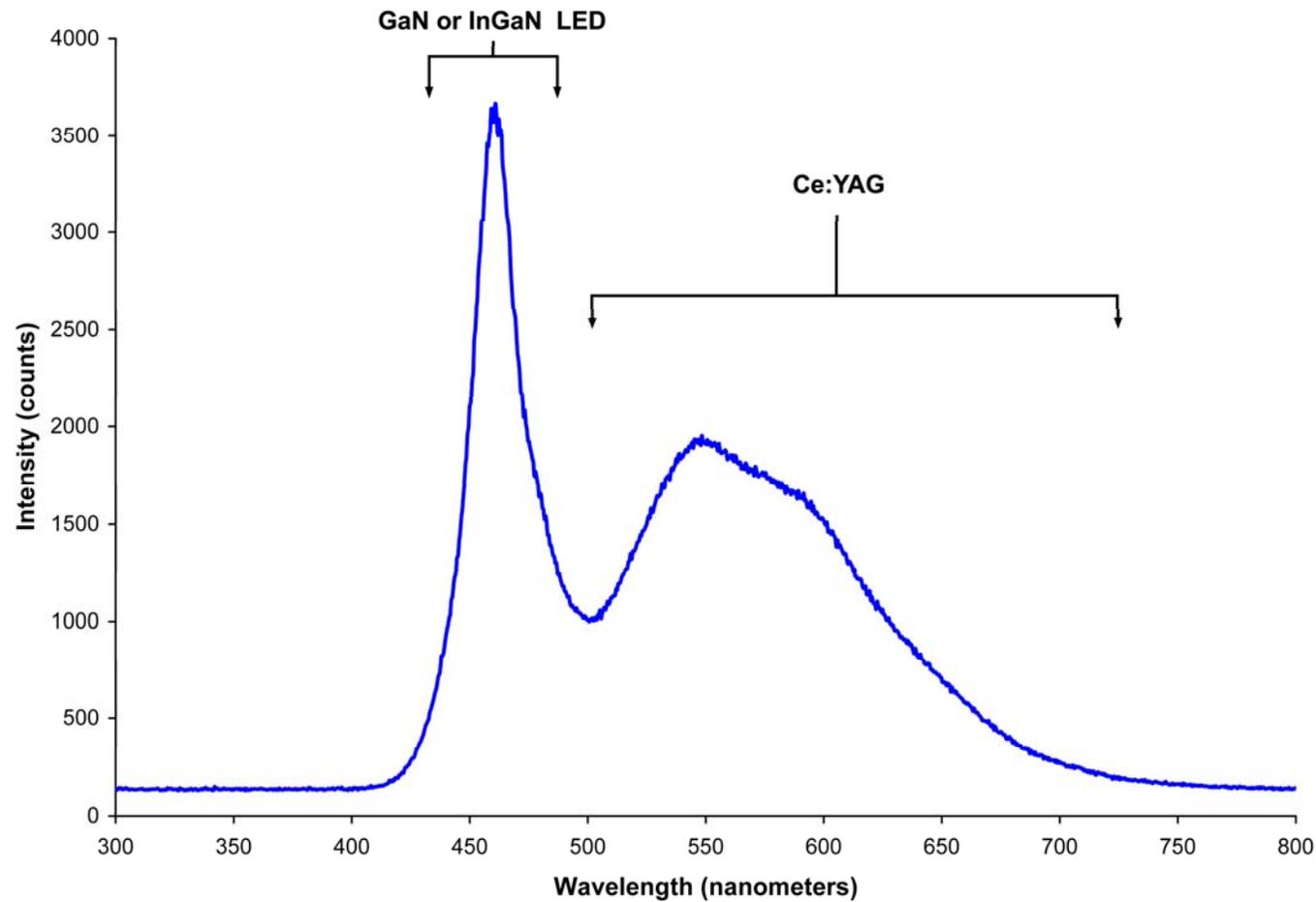
La LED est une diode : tout se passe dans la jonction !



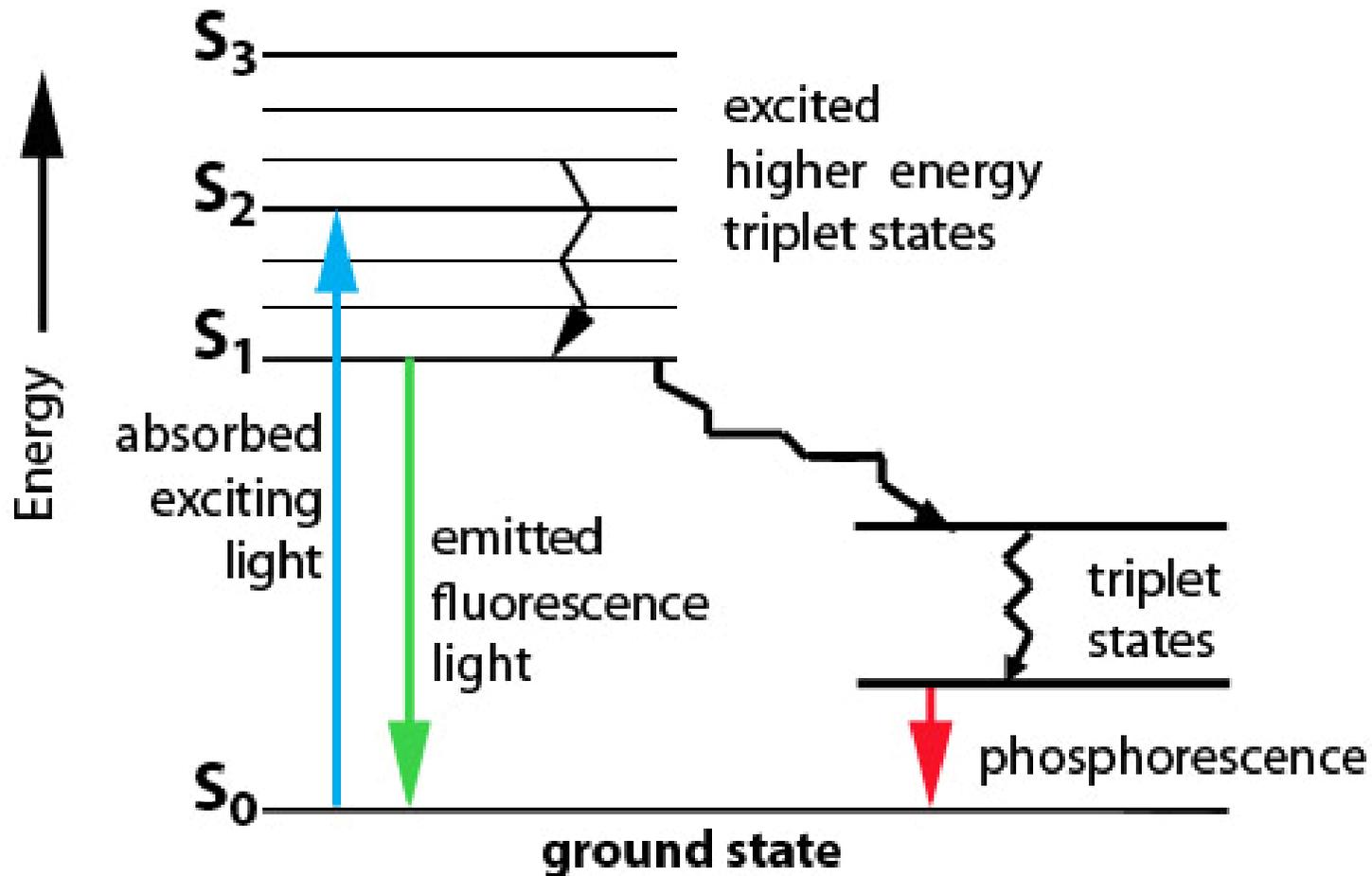
La LED est à peu près monochromatique



Les diodes blanches utilisent un phosphore luminescent (comme les tubes !)



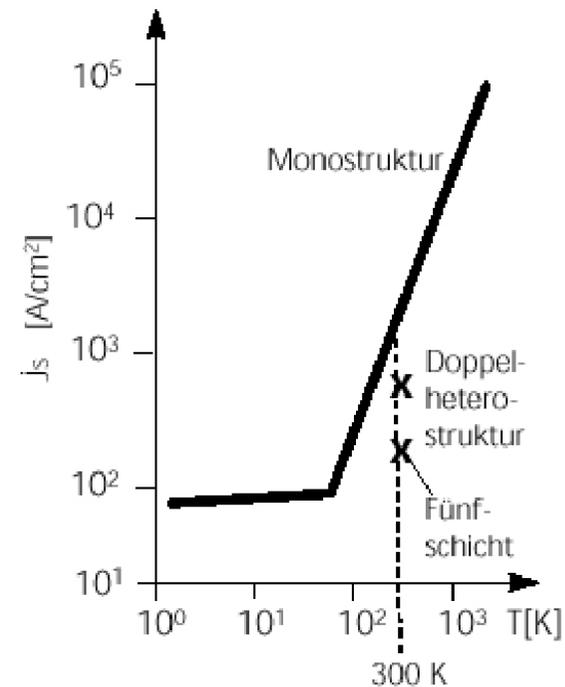
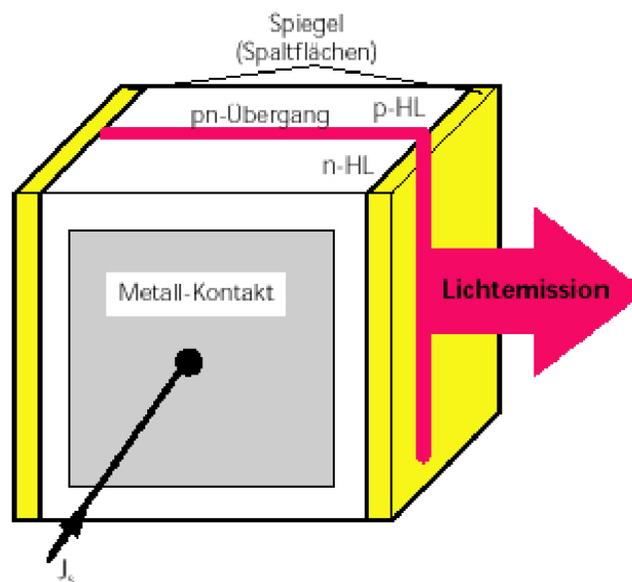
Fluorescence, phosphorescence: diagramme de Jablonski



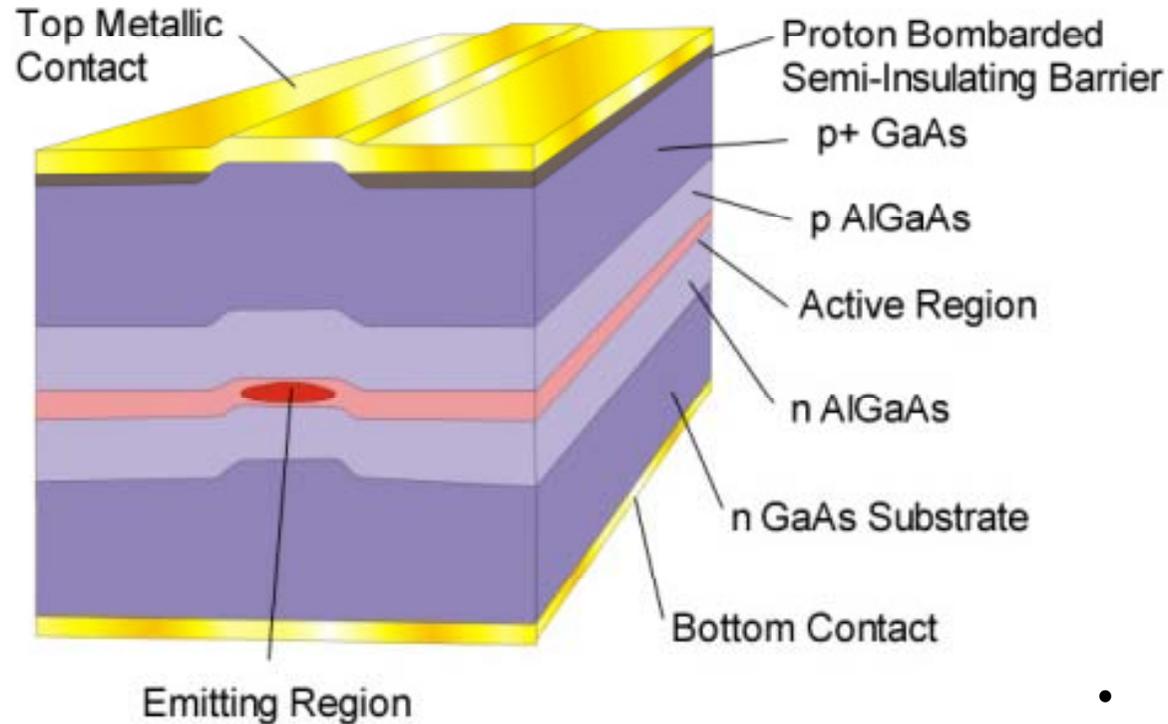
La diode laser : on a construit une cavité

Lasertechnik I

Aufbau und Schwellstromdichte j_s



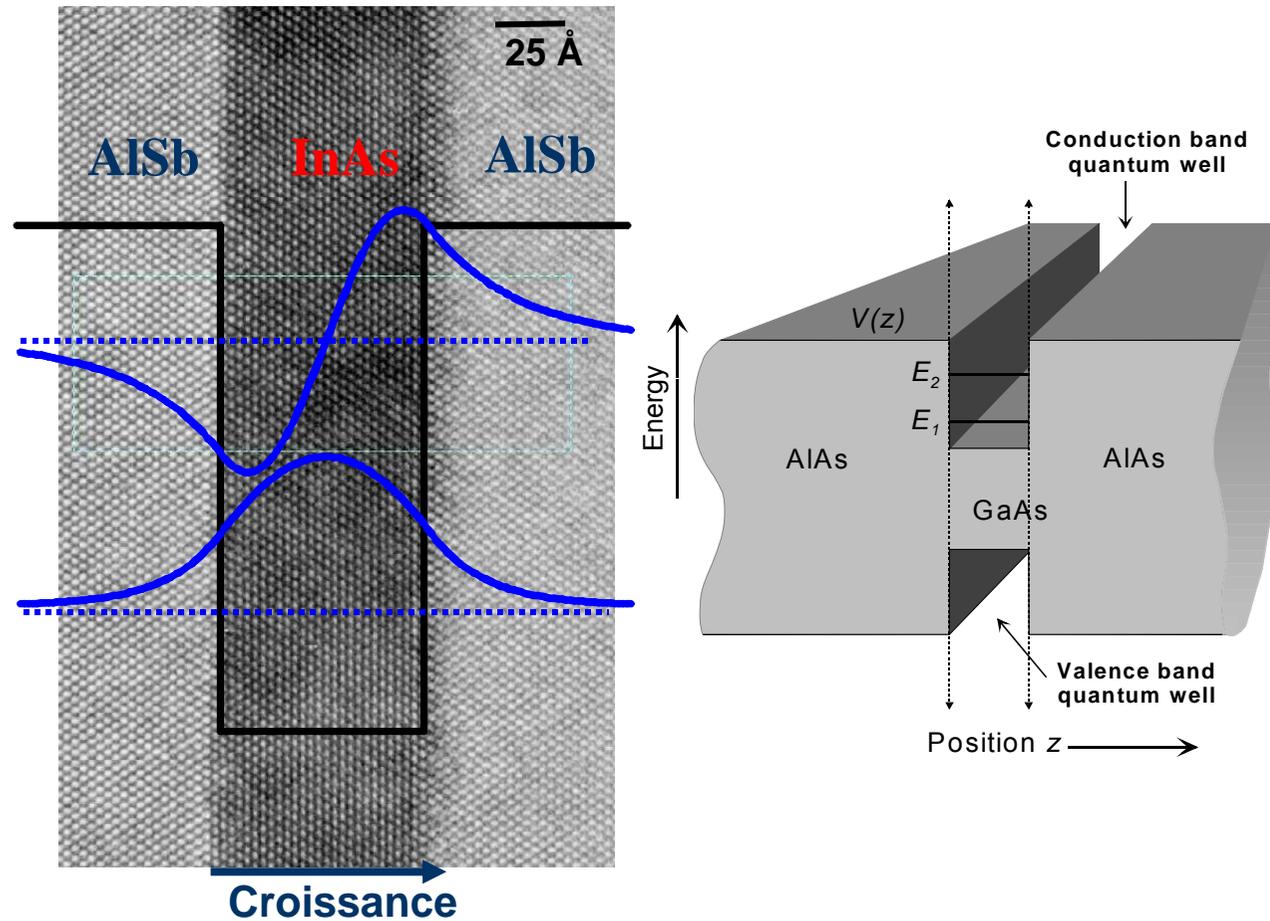
Structure d'une diode laser: exemple



- Épaisseur $0.1\mu\text{m}$
- Largeur $2\text{-}10\mu\text{m}$
- Longueur $200\mu\text{m}$
- Densité de courant ?

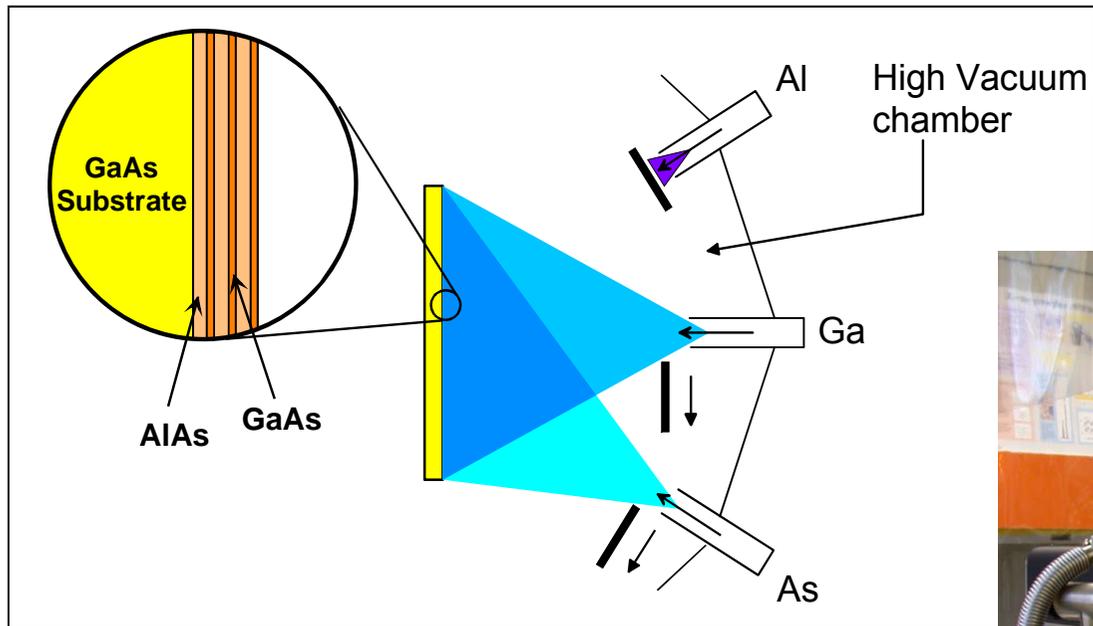
Principe des puits quantiques

Puits quantiques

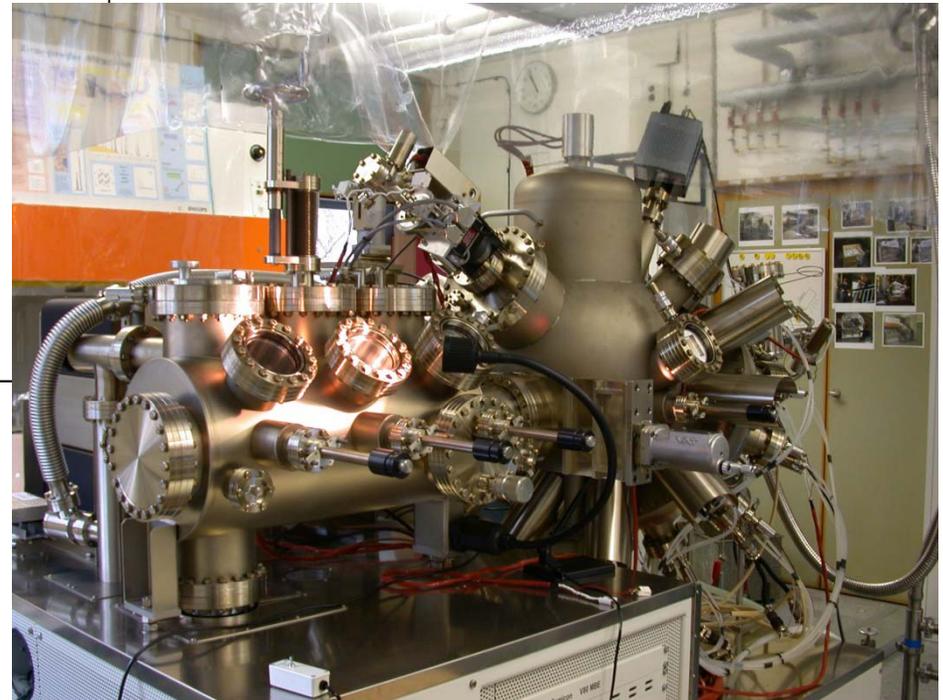


Technologie de fabrication par couches

TECHNIQUE DE CROISSANCE : MBE



Epitaxie par Jet Moléculaire
sous ultra-vide ($< 10^{-8}$ mbar)

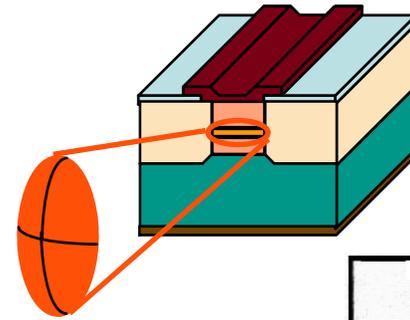


Propriétés des diodes laser

- Section émettrice: de $1\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ (faible puissance) jusqu'à $1\mu\text{m} \times$ plusieurs centaines de μm de longueur
- Divergence : $10^\circ \times 30^\circ$ (FWHM) environ
- Puissance : de quelques mW à **200 mW** avec un faisceau de même qualité qu'un laser
- Pour des puissances $> 200\text{ mW}$: faisceau + divergent qu'un faisceau laser de même taille
- Problème : un tel faisceau ne peut plus être focalisé sur une tache de diffraction de taille $\sim \lambda^2$
- Efficacité de conversion électrique-optique : 30 à 50 %
- Durée de vie (10 000 heures)
- Les Performances (seuil, longueur d'onde, efficacité, durée de vie) dépendent de la température

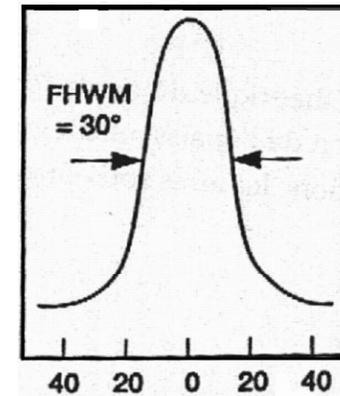


Profil spatial en champ lointain



plan \perp jonction (axe « rapide »)

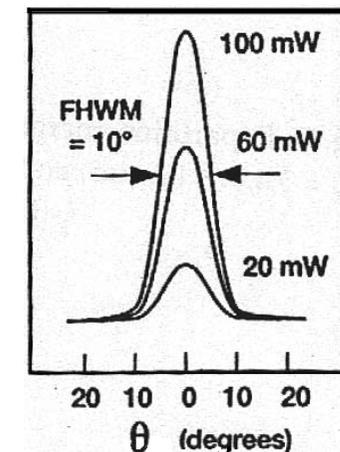
limité par la diffraction : faisceau très divergent, profil gaussien



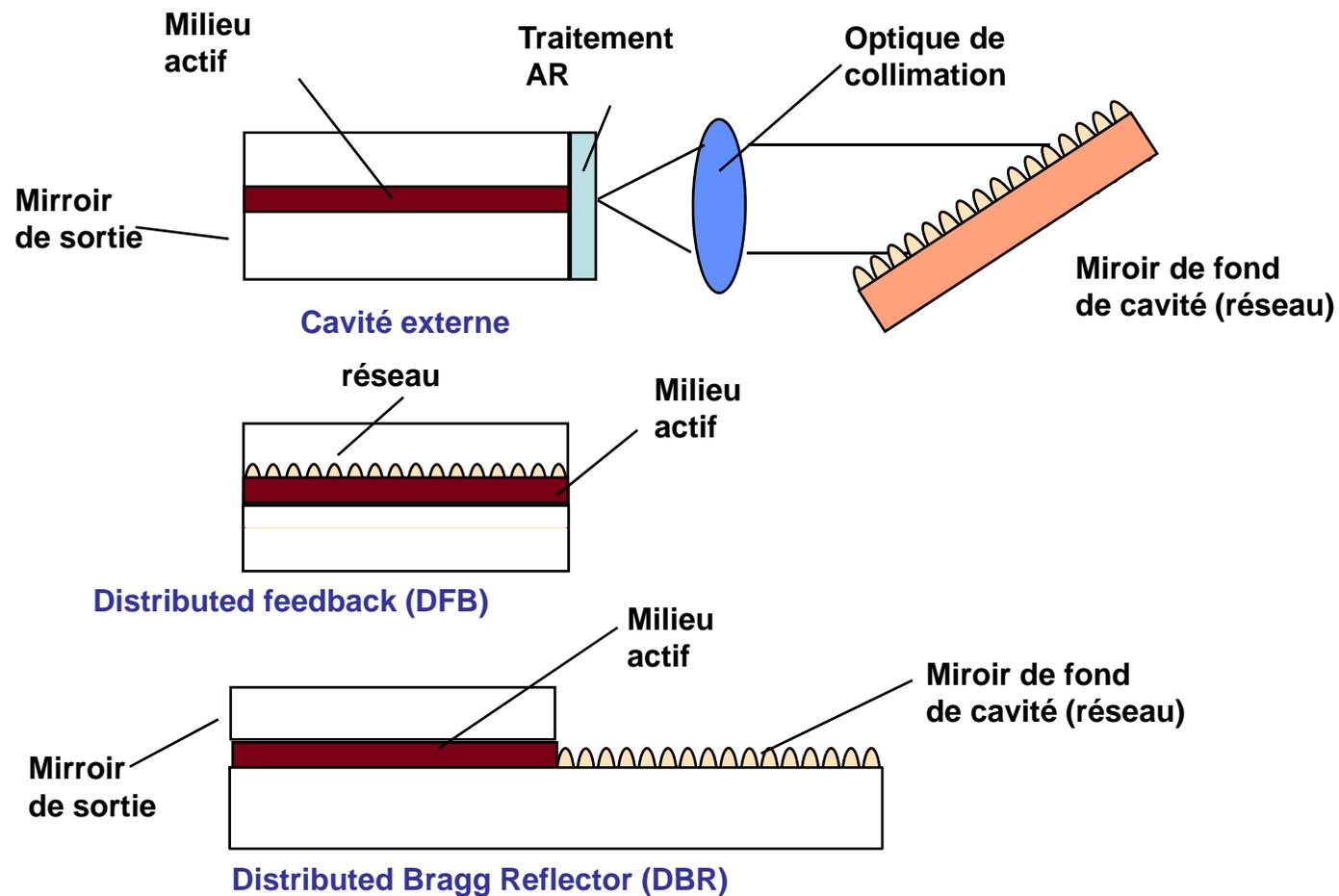
plan // jonction (axe « lent »)

♦ Selon le type de guidage réalisé et la largeur de la couche active, irrégulier !

→ Faisceau elliptique & divergent



AFFINEMENT SPECTRAL ET ACCORDABILITÉ



Applications : télécommunications (DWDM) et spectroscopie

Les diodes laser peuvent être modulées (GHz) par leur courant

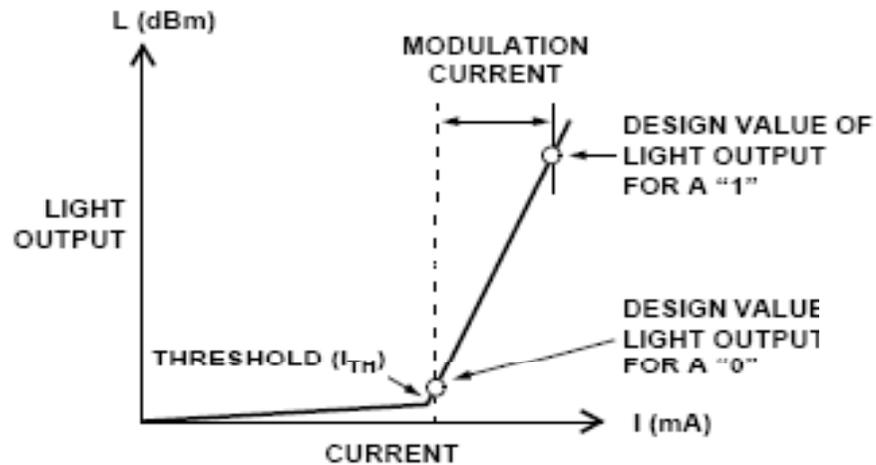


FIGURE 1. IDEALIZED LIGHT OUTPUT vs. CONTROL CURRENT

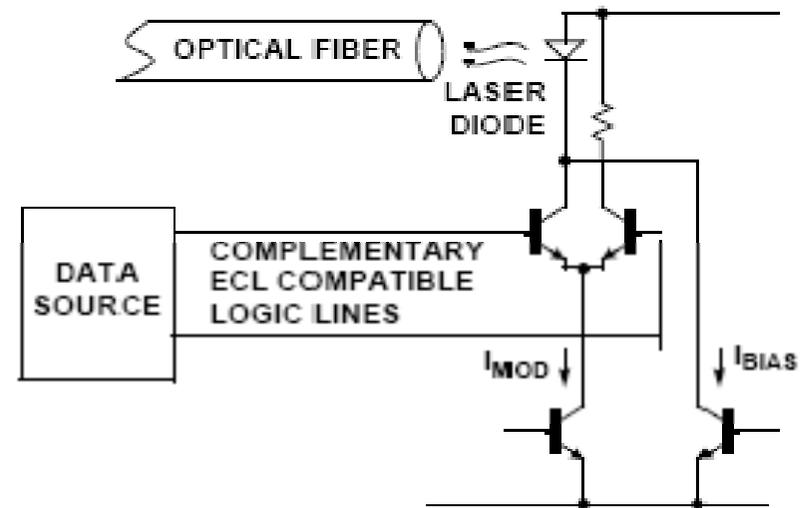
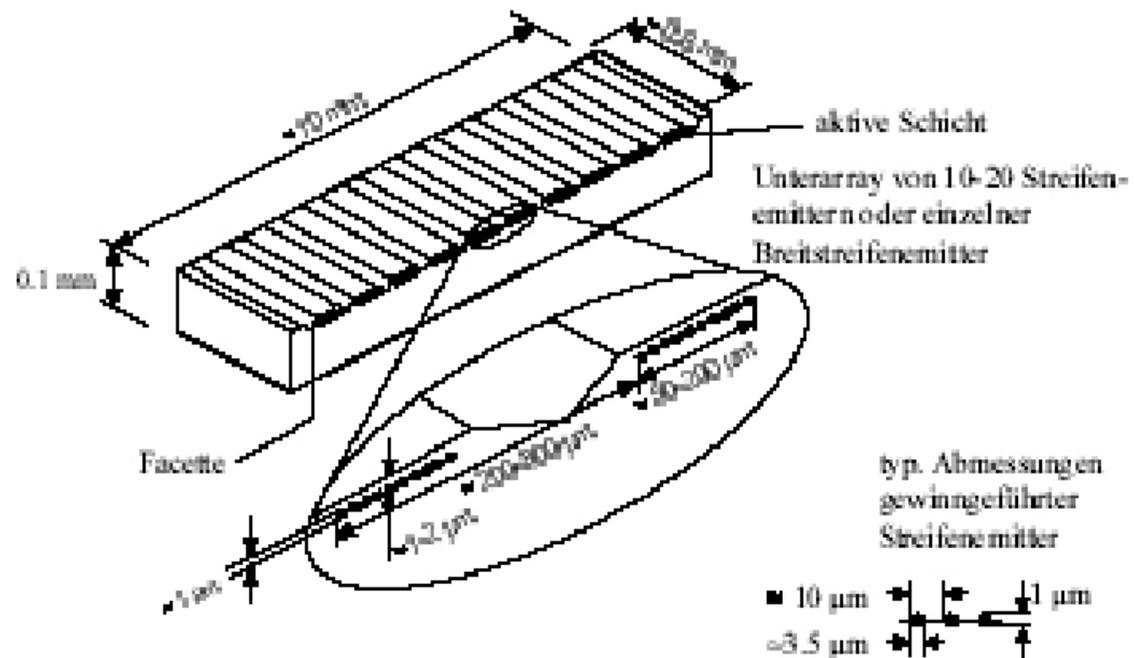
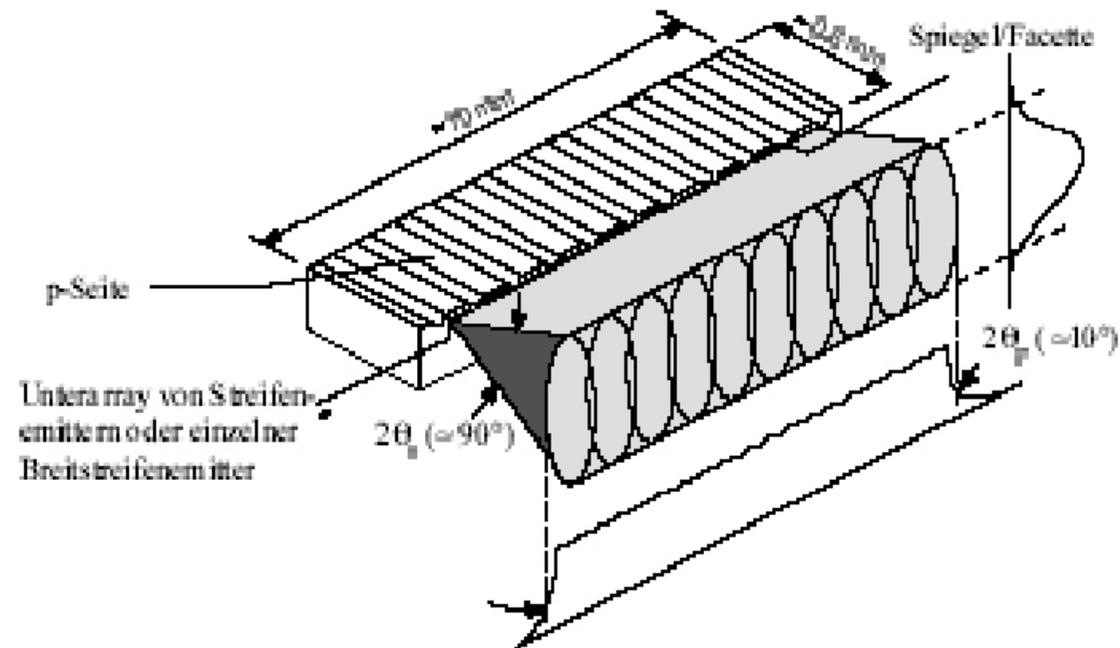
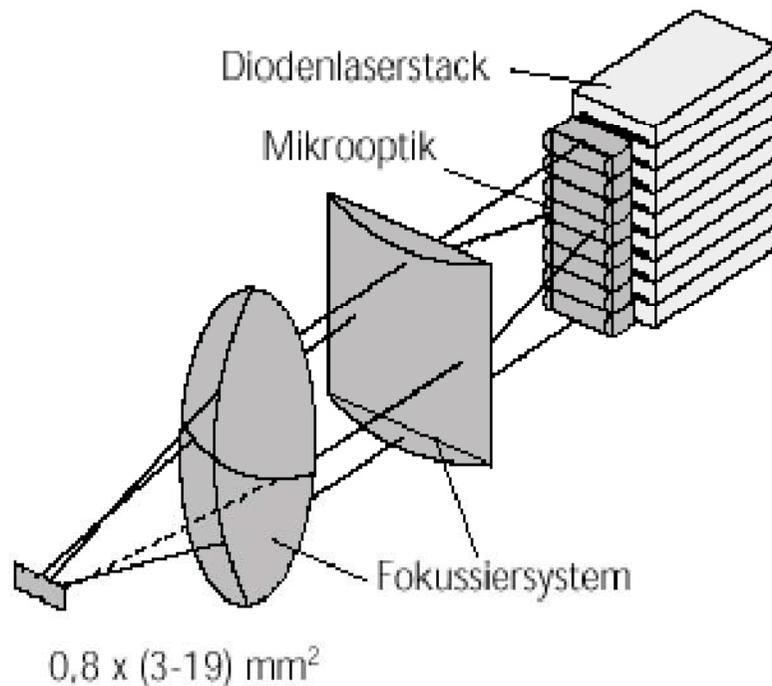


FIGURE 2. LASER DIODE DRIVER BLOCK DIAGRAM

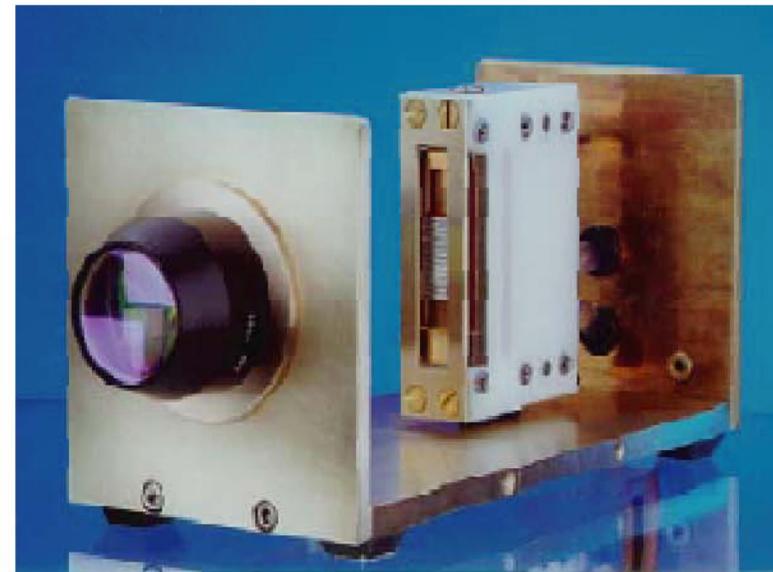
Barrette de diodes laser



Diodenlaserstacks für Produktionstechnologie



- bis zu 40 Diodenlaser (mit Polarisations/Wellenlängenmultiplexing)
- bis zu 1 kW
- bis zu $2 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$



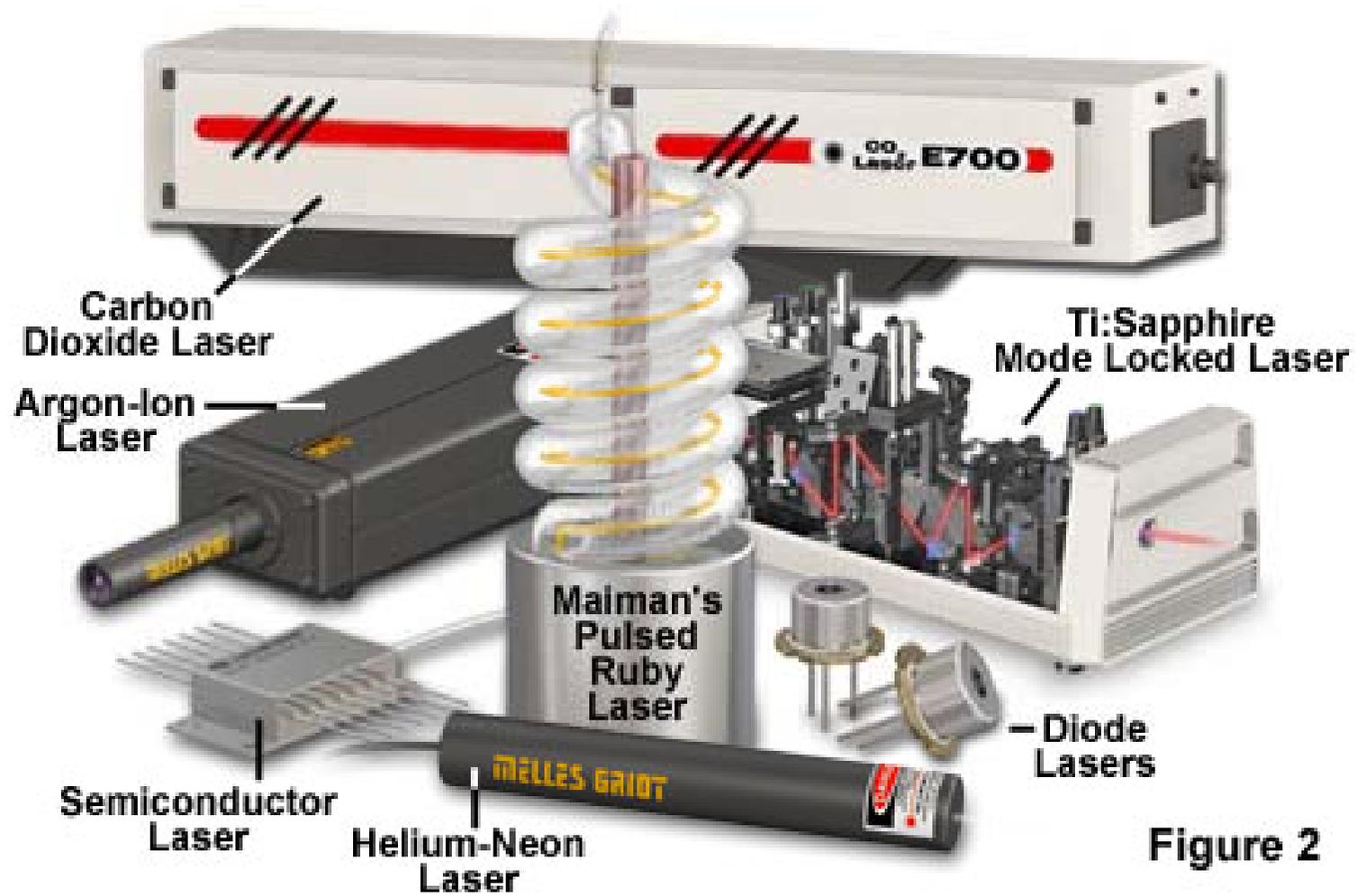
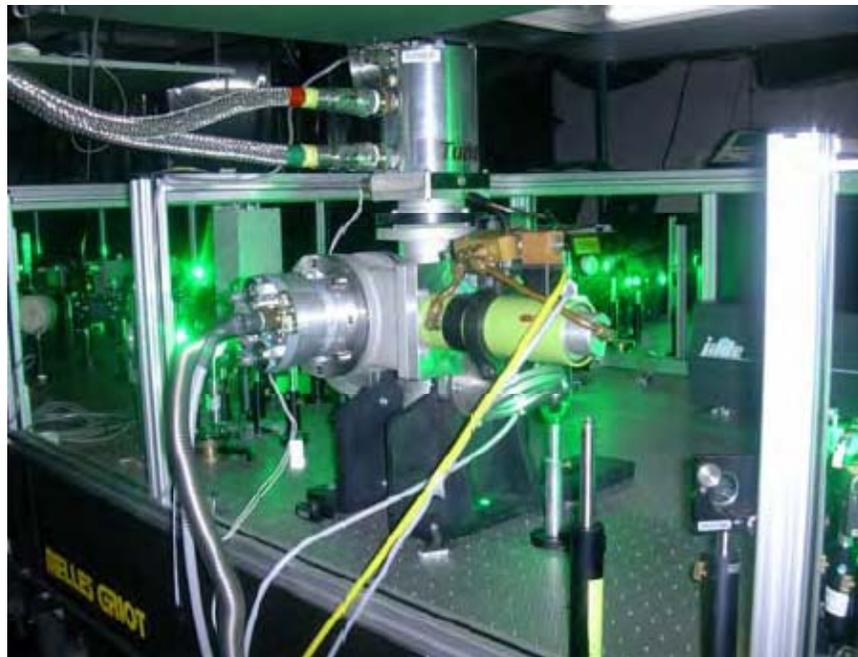


Figure 2

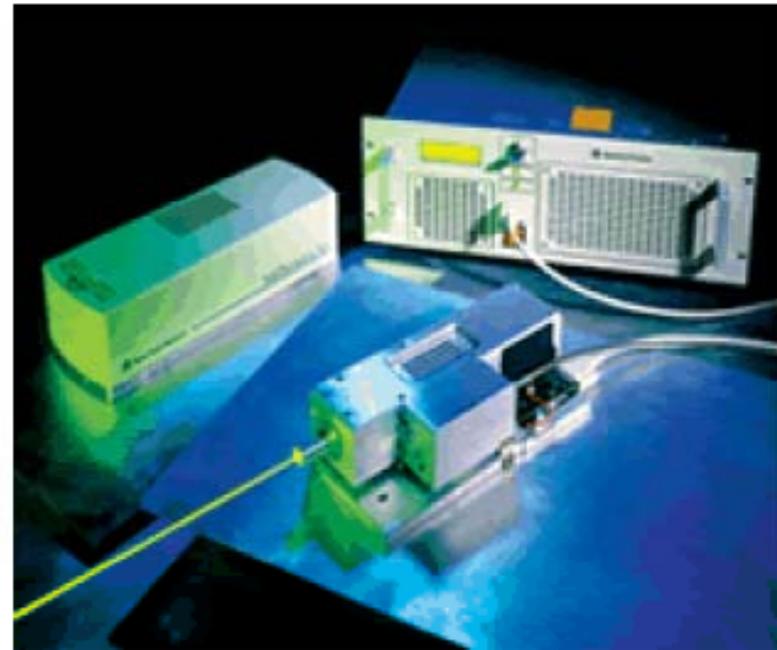
Différents types de lasers :

du plus fondamental...



Laser expérimental
ultra-bref ($\sim 10^{-15}$ s) et ultra-intense (10^{14} W)
LOA, Palaiseau

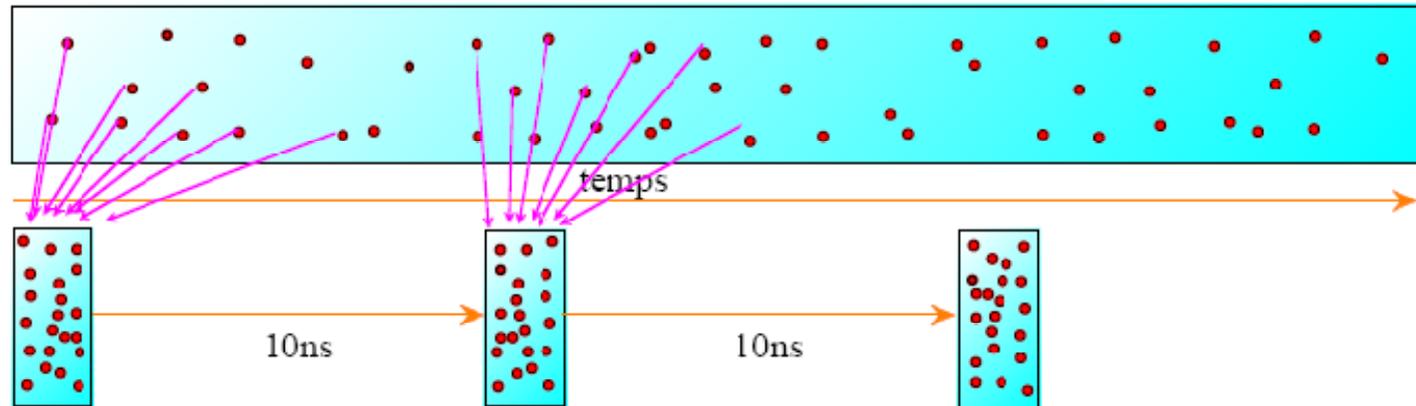
...au plus appliqué



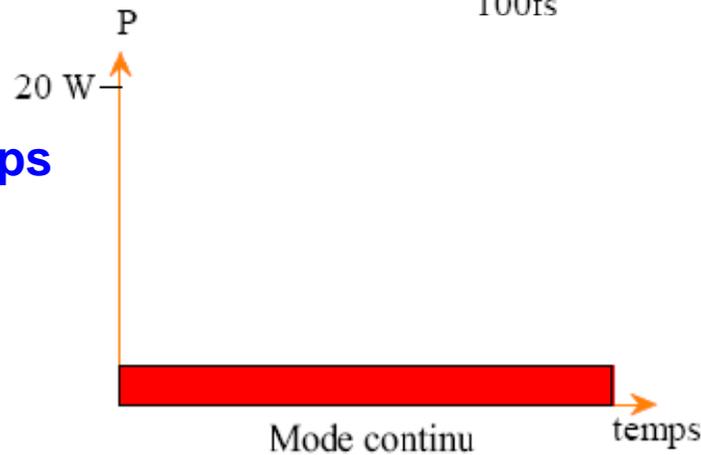
Laser commercial
continu 5W à 532 nm
Spectra-Physics

Lasers continus /lasers à impulsions

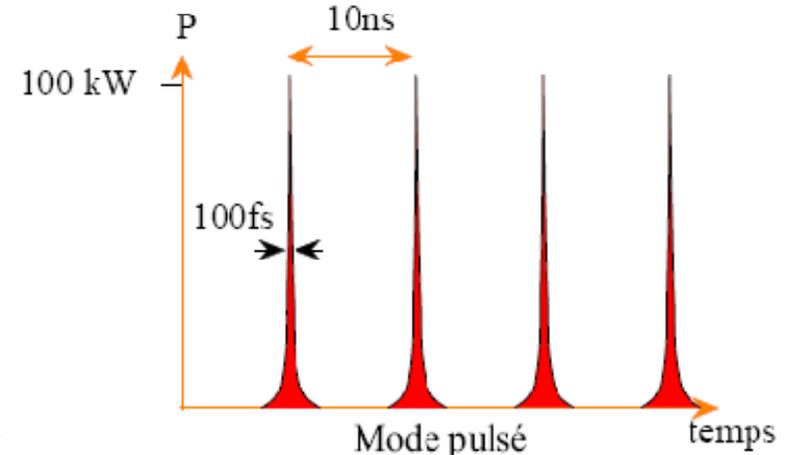
Principe



Puissance au cours du temps



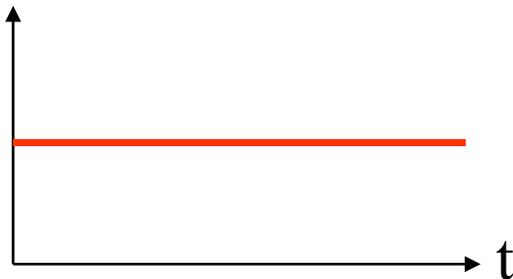
Puissance constante



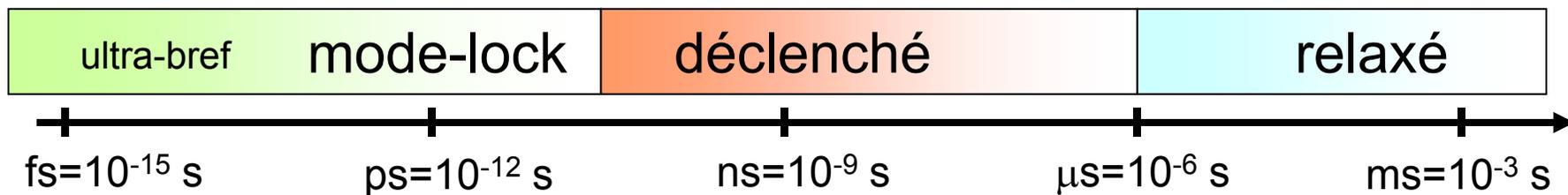
Très forte puissance pendant les impulsions !

Un laser à impulsion permet de concentrer toute l'énergie lumineuse pendant une très faible (environ 100 fs).
⇒ Puissances très élevées

Fonctionnement continu ou impulsionnel :



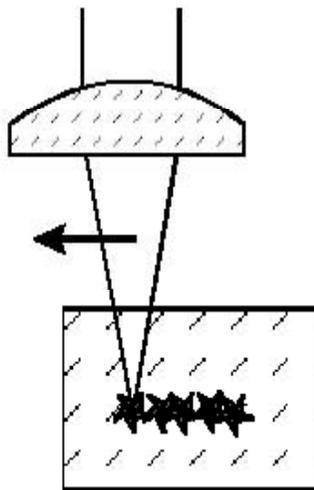
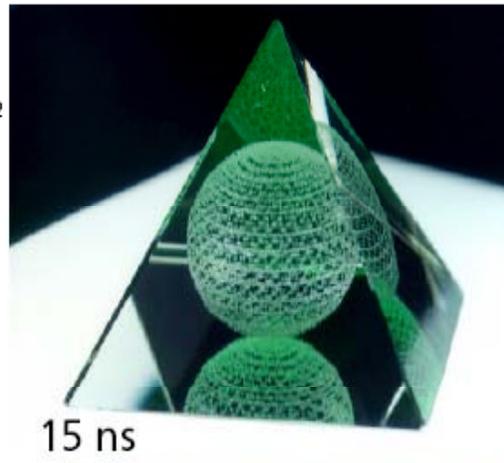
Impulsionnel : différentes techniques de production d'impulsions



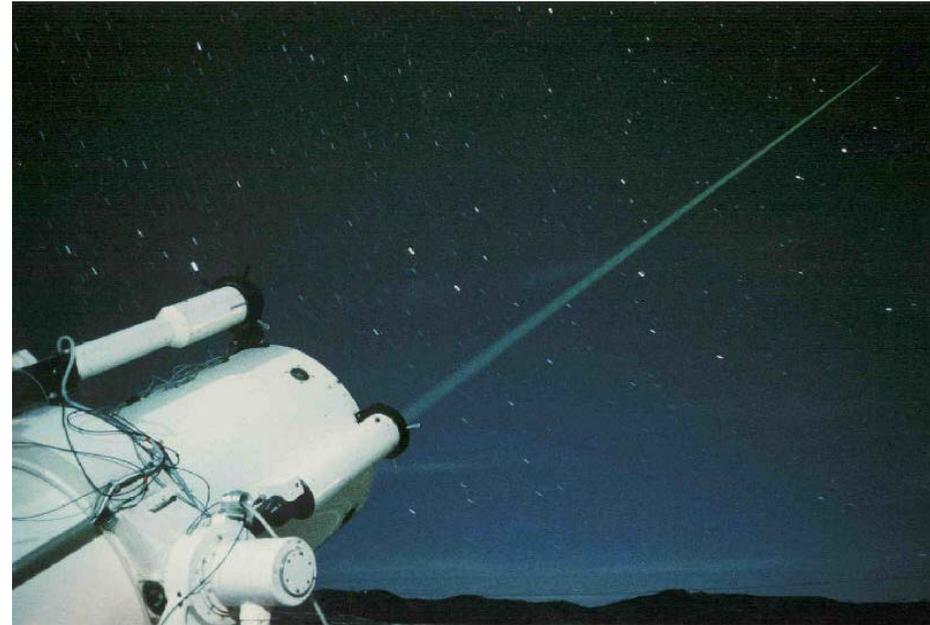
Marking of Glass with NIR pulsed Lasers

Marking of Glass Inner

- DPSSL, Stab/Innoslab
- Process Intensity $> 10^9$ W/cm²
- Q-switch, f bis 20 kHz
- Pulse duration: 15ns / 6ns / 100ps
- $M^2 = 1$, $r_f = 50 - 200$ μ m

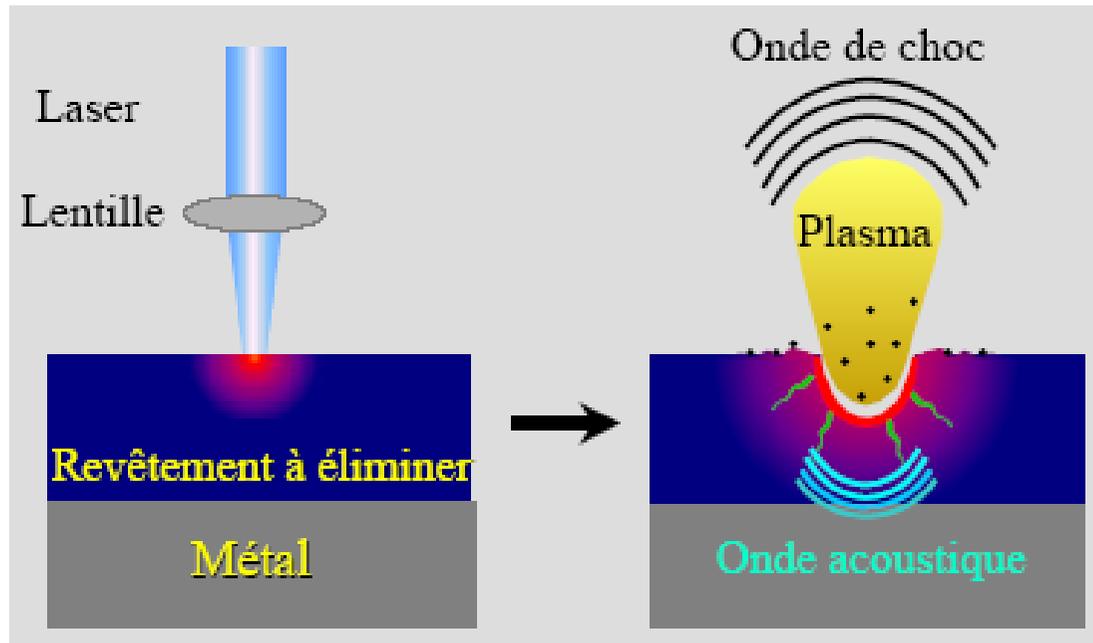


Applications des lasers

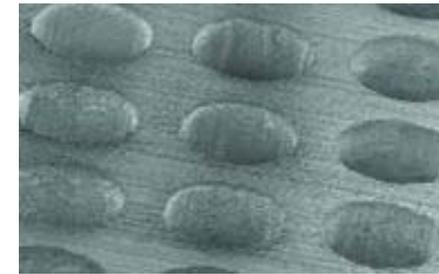


Applications des lasers

Interaction laser - matière



Aspects fondamentaux



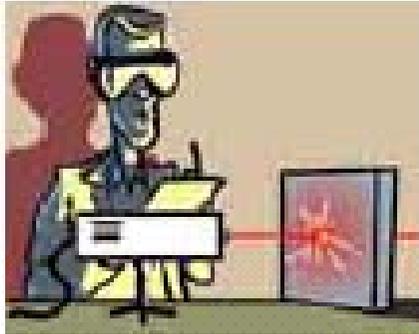
Micro-usinage



Modification d'indice

Des applications très diverses

Découpe
de matériaux



Lecture de
codes-barres



Lecture de CD



Animation nocturne

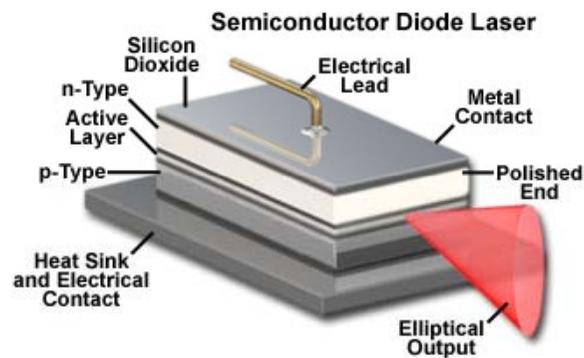


Telecoms

20

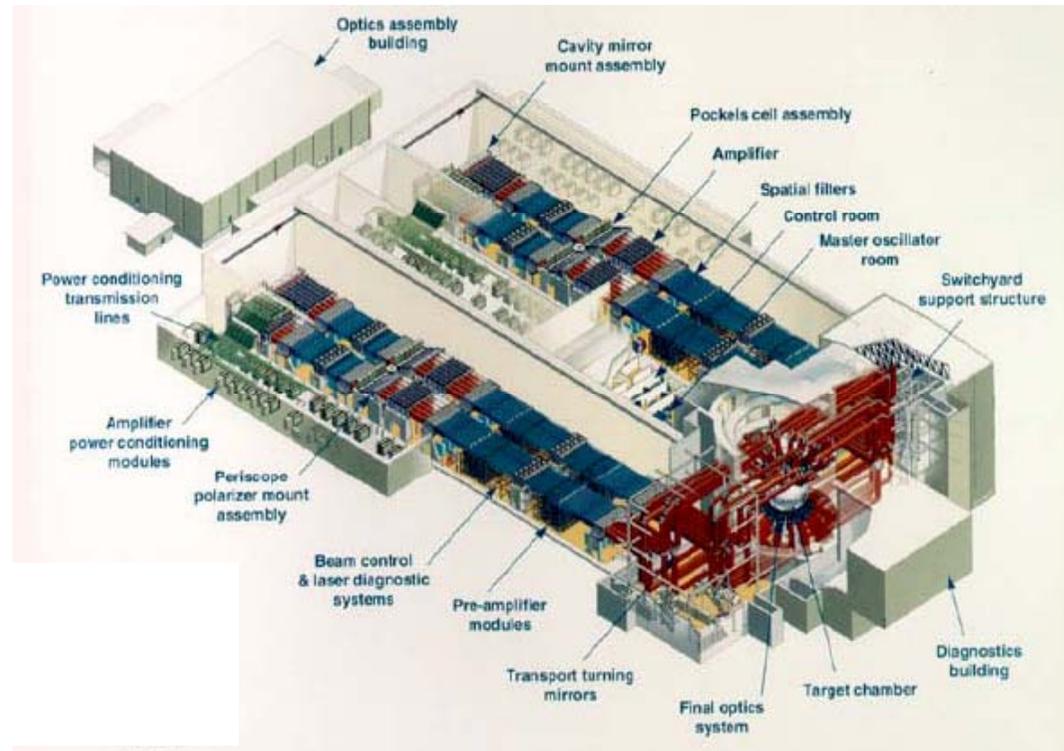
Différents types de lasers :

du plus petit...



Diode laser (semiconducteur)
~ 1 mm

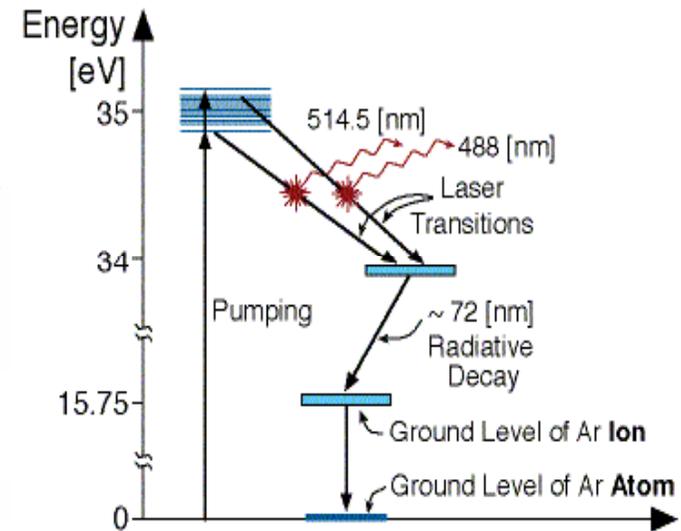
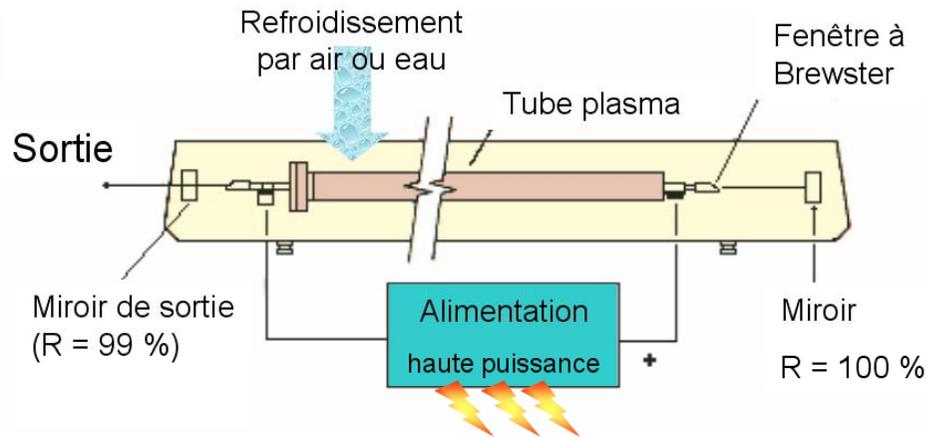
...au plus grand



Laser Mégajoule : 200m de long, 150 m de large

Les lasers à gaz ionisé

- Milieu actif = gaz ionisé (Ar, Kr...)
- Pompage = décharge électrique



- Argon : 364 nm, 488 nm, 514 nm
- Krypton : 647 nm (+ autres raies visibles)

Les lasers à gaz ionisé

- Fortes puissances possibles (20 W CW classique)
- Refroidissement par eau (fortes puissances) ou par air
- Encombrants et rendement électrique-optique faible (<0,01%)



Refroidissement par eau



Refroidissement par air

Les lasers à gaz ionisé

- Argon : 364 nm, 488 nm, 514 nm
- Krypton : 647 nm (+ autres raies visibles)
- Utilisés par exemple pour les shows laser

Argon



Argon + Krypton



Le laser CO₂

Transition IR entre 2 niveaux vibrationnels de la molécule de CO₂

- Pompage par décharge électrique DC ou RF dans un mélange comportant N₂ et CO₂
- Collisions inélastiques avec des électrons de faible énergie, excitation des molécules de N₂
- Transfert quasi-résonant de l'énergie acquise aux molécules de CO₂ par choc

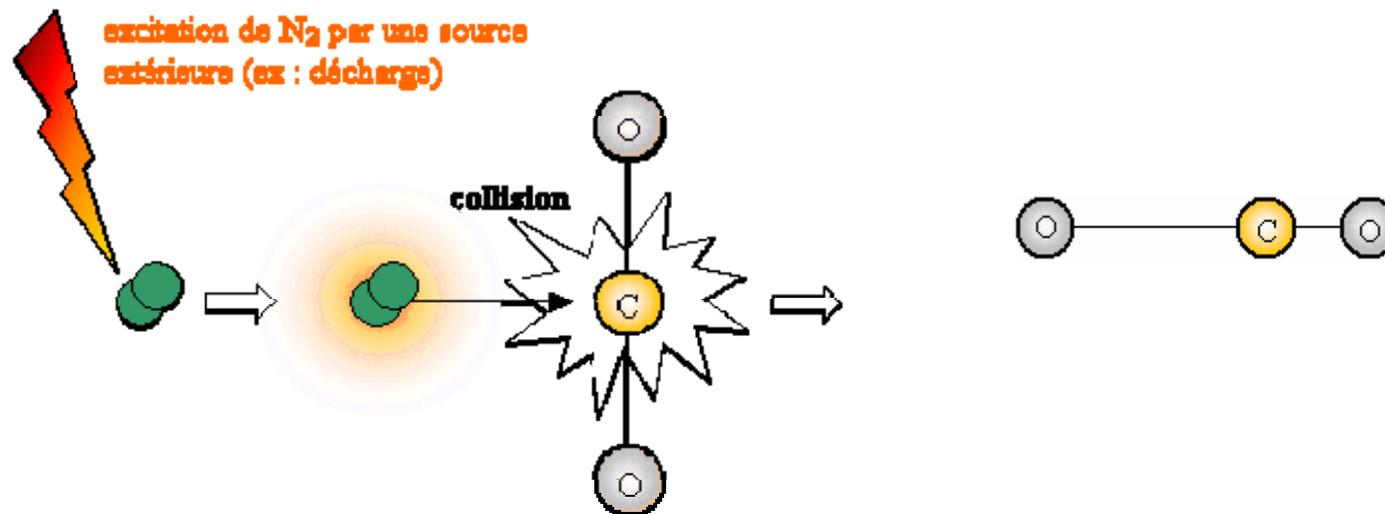
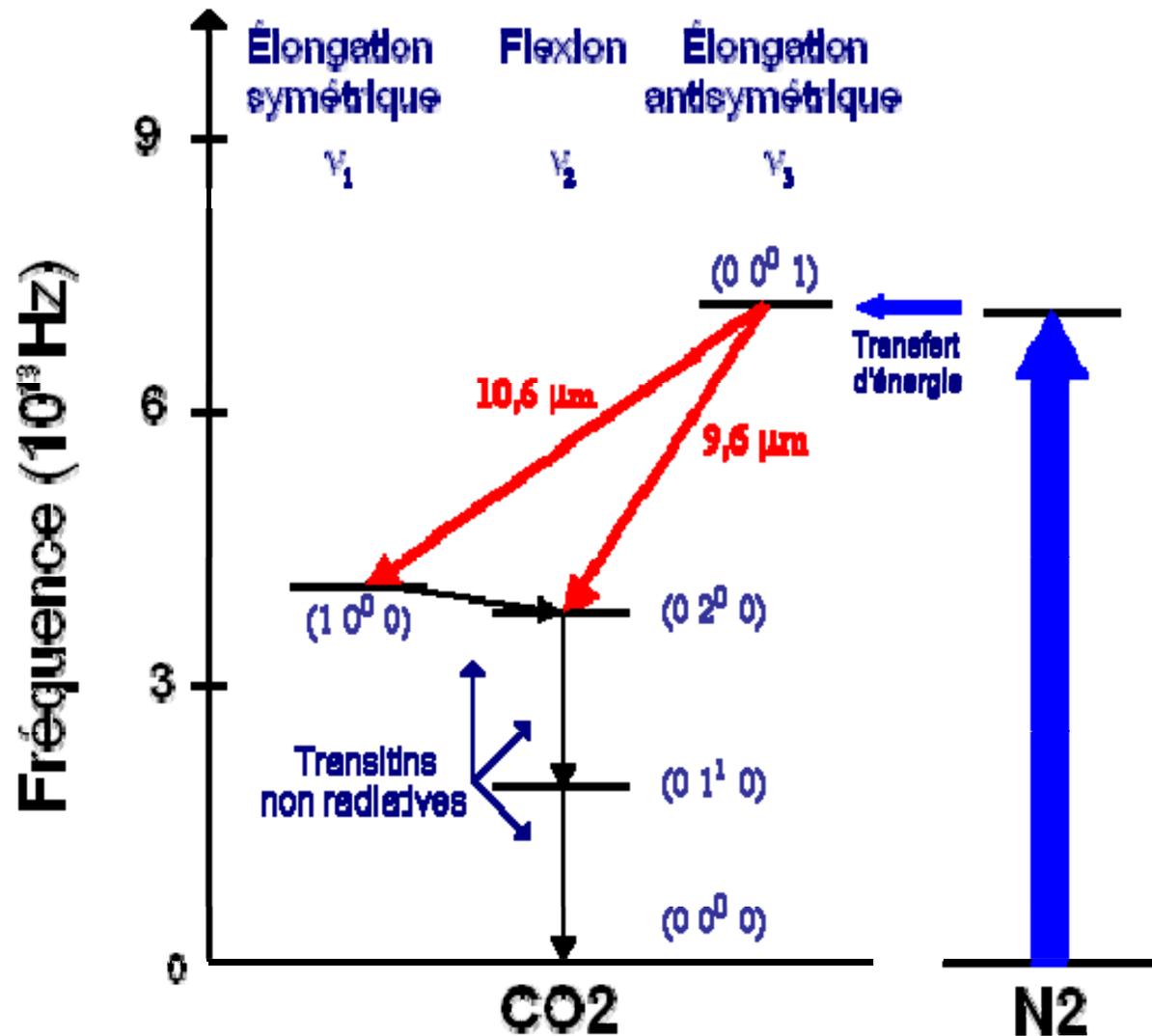


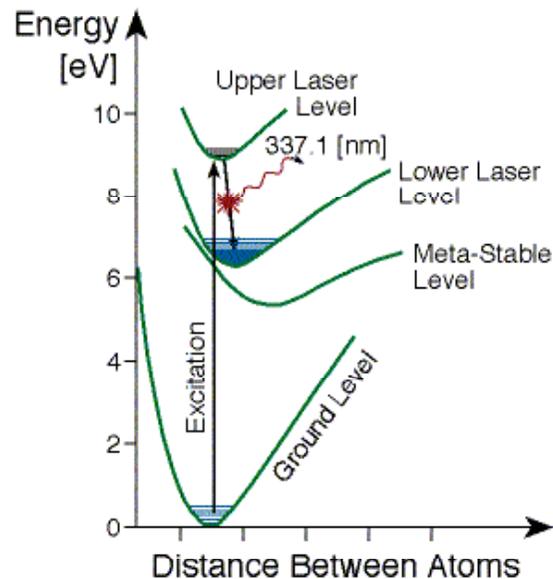
Diagramme d'énergie du laser CO2



Les lasers à Azote (N_2)

Milieu **amplificateur** : Azote gazeux, statique ou en flux

Pompage électrique



Emission **dans l'UV** (337.1 nm)

Uniquement pulsé (ns)

Laser bon marché, puissant ($P_{\text{crête}} = \text{qqf MW}$)

Peu efficace (rendement = 0.1%)

Effet laser obtenu à partir de l'Azote atmosphérique par décharge électrique : (Pas de cavité !)

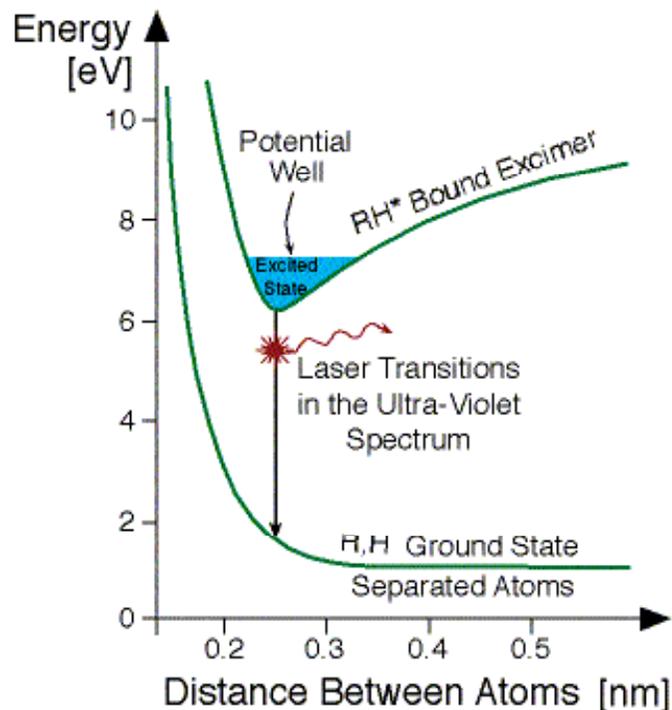


Les lasers excimères

- Ex : les lasers ArF, KrF, XeCl, XeF...

Ces excimères (**excited dimers**) ont des états excités stables et des états fondamentaux instables.

L'excitation (par décharge électrique) produit automatiquement une inversion de population (la population dans le niveau fondamental est par définition nulle !).



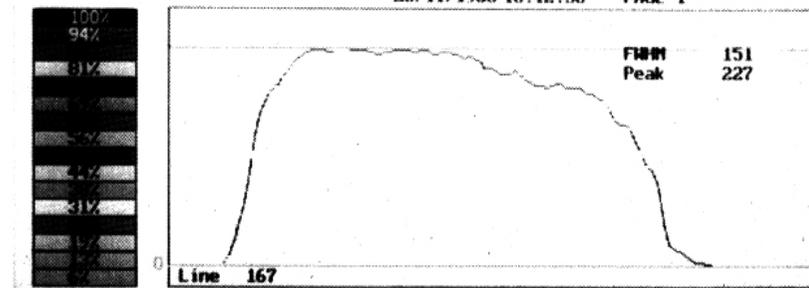
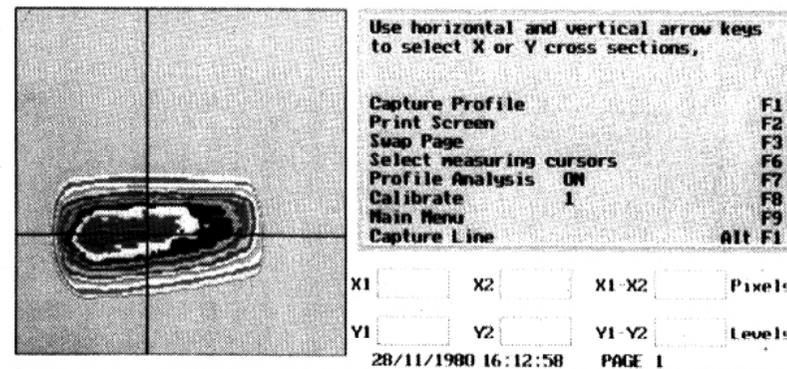
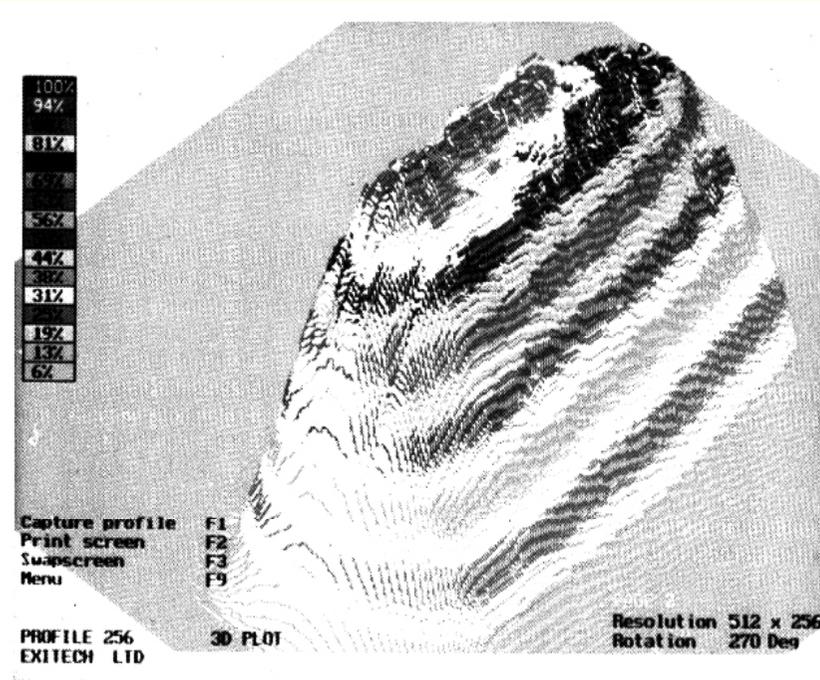
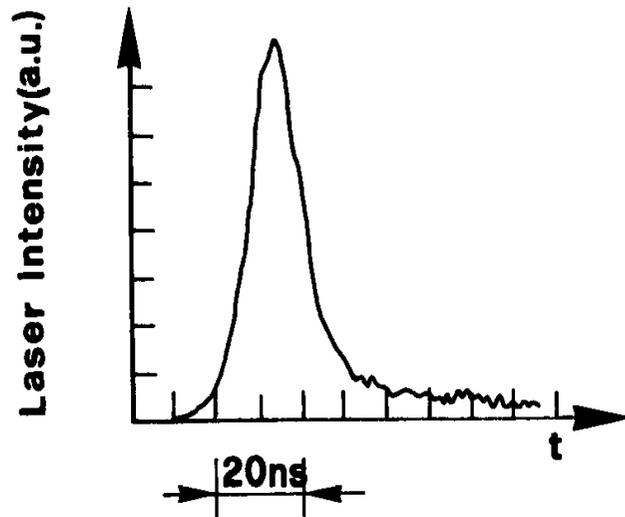
Emission dans l'UV

(principales raies à 157, 193, 248, 308, 351 nm)

Fonctionnement **pulsé** seulement (μs à ps)

Applications : Biologie, Médecine, découpe, lithographie pour la microélectronique...

Faisceau d'un laser excimère

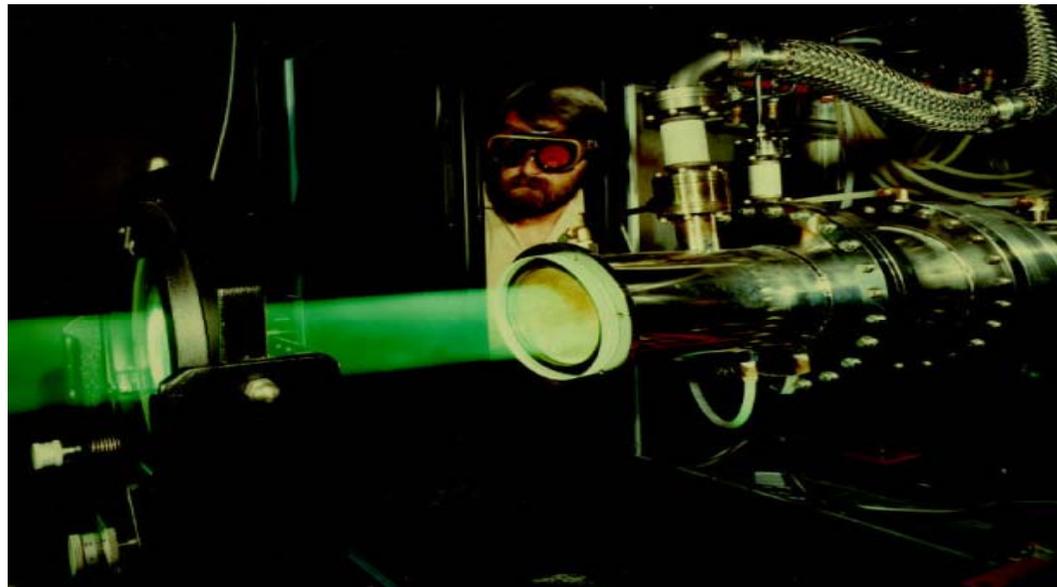


Les lasers à vapeur de cuivre

Laser visible **impulsionnel** de forte puissance moyenne
Milieu amplificateur : mélange de néon et de vapeur de cuivre

Longueurs d'onde : 510 nm (vert) et 578 nm (jaune)

*Application : pompage de lasers à colorant pour le procédé SILVA
(Séparation Isotopique par Laser en Vapeur Atomique) du CEA
(enrichissement de l'uranium en isotope U235 par photo-ionisation
sélective vers 625 nm) – maintenant abandonné.*



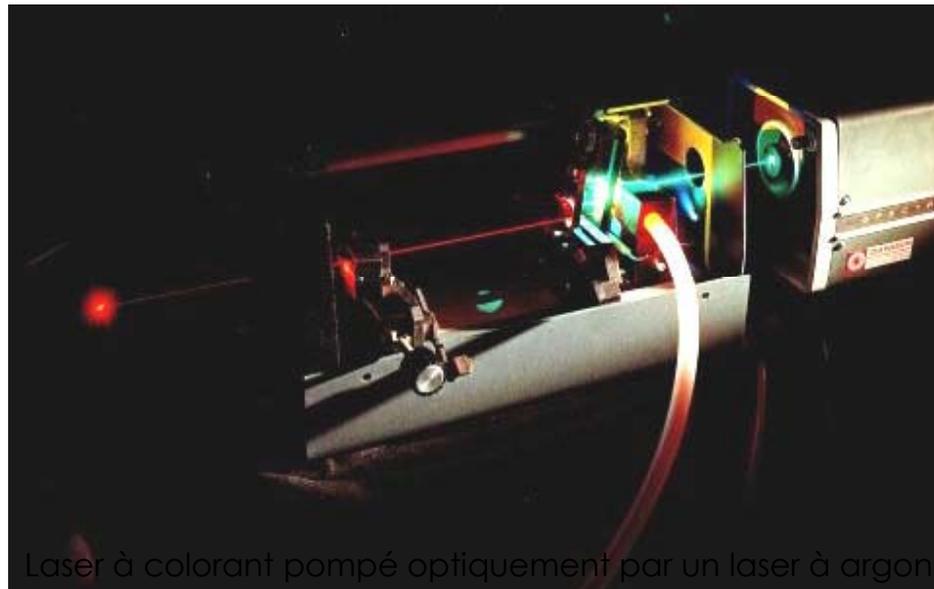
Le laser à colorant

Le milieu actif est un **colorant organique** fluorescent, en solution dans un liquide.

Le pompage se fait **optiquement** (par un autre laser)

- intérêt majeur : ils sont **accordables**.
- Tout le spectre visible peut être balayé par des lasers à colorant.

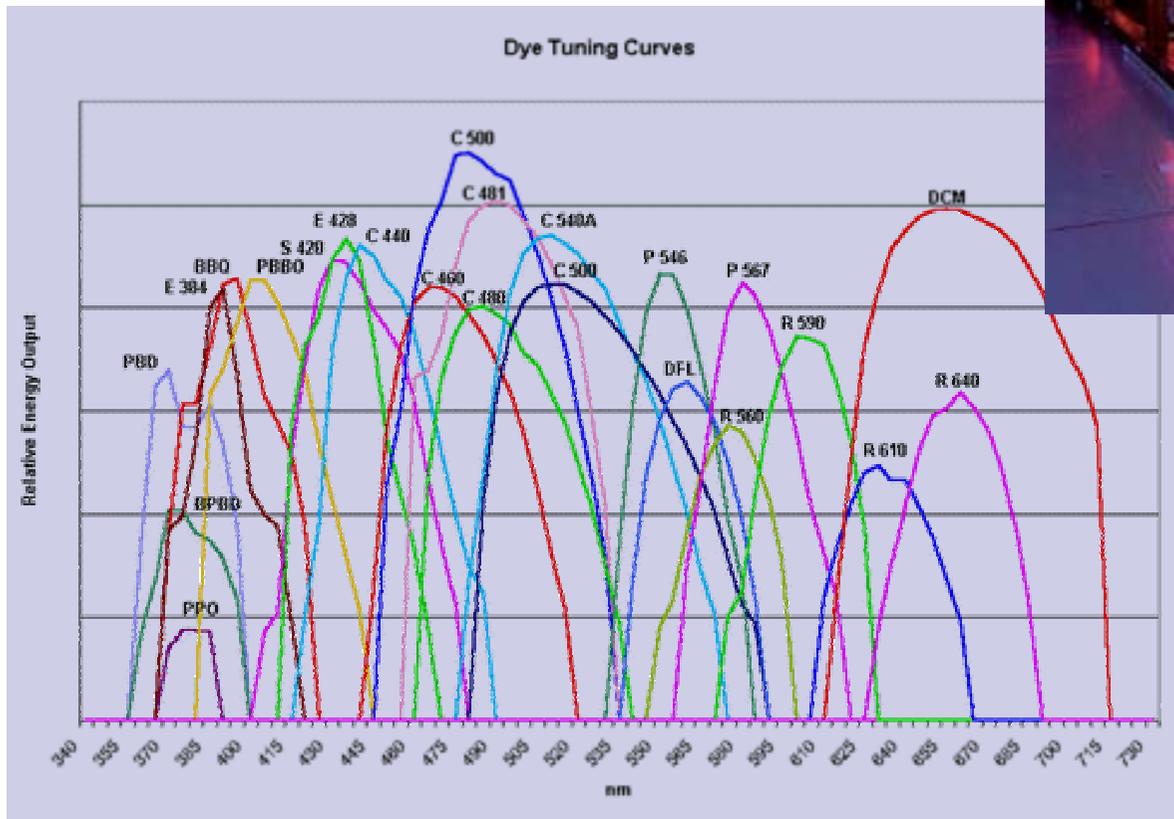
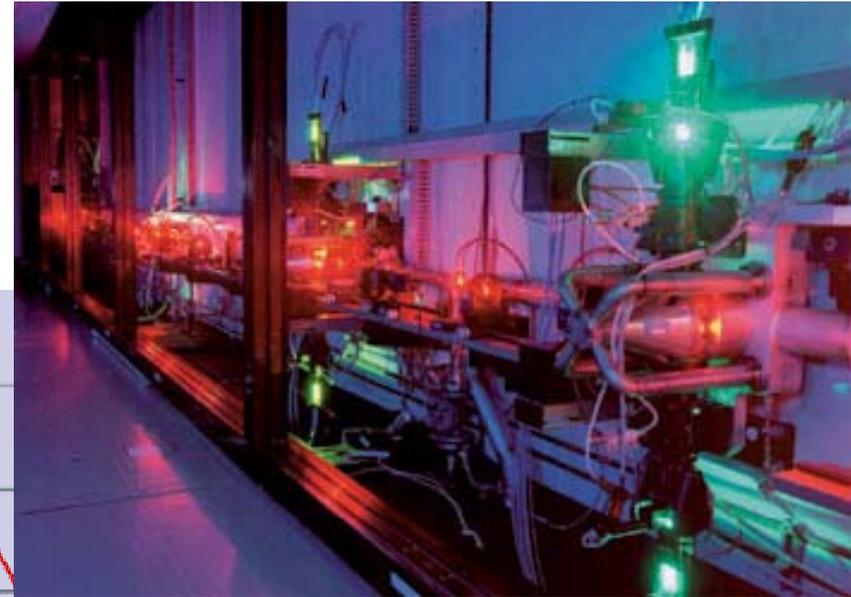
Ces lasers sont peu pratiques (remplacement régulier du colorant, produits toxiques...) et sont surtout utilisés pour la recherche



Laser à colorant pompé optiquement par un laser à argon

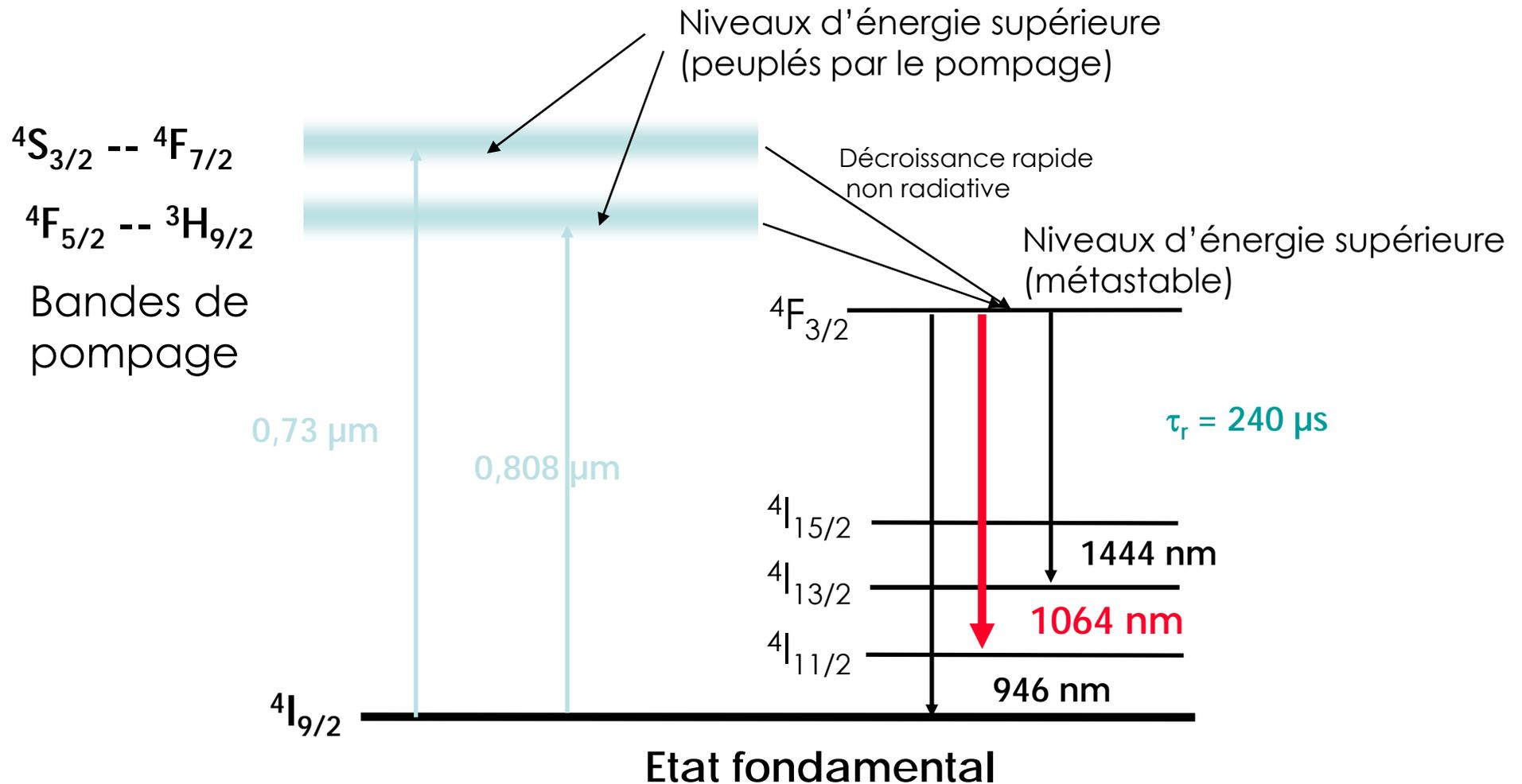
Le laser à colorant

Longueurs d'ondes accessibles avec différents colorants :



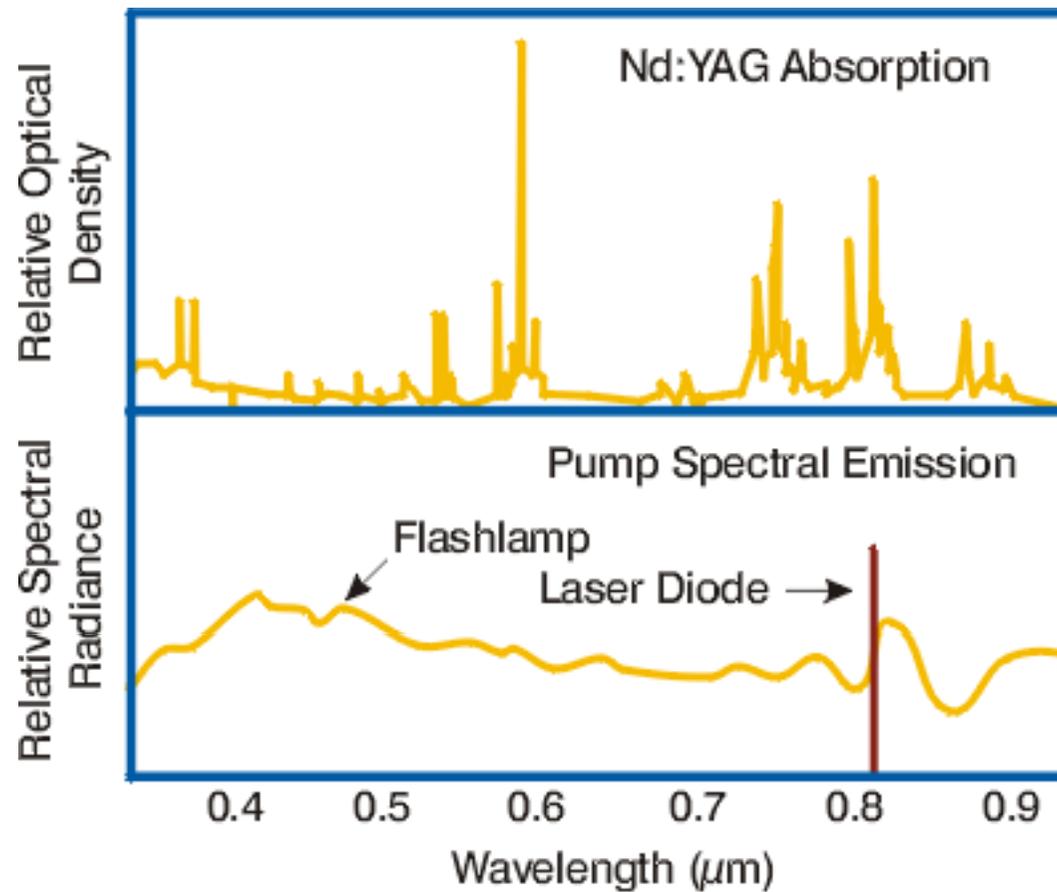
Accordabilité (pour un colorant donné) obtenue avec un réseau intracavité

Le laser Nd:YAG (Neodym :Yttrium Aluminium Garnet)



Le laser Nd:YAG

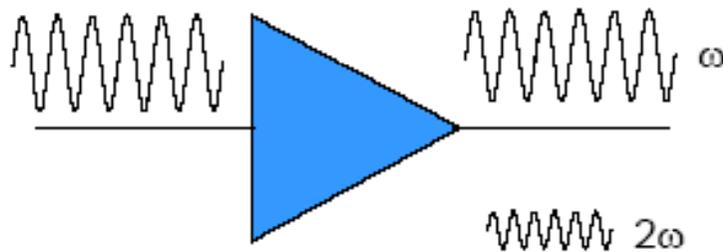
Pompage par **lampe flash** ou par **diode laser**
(Lasers de forte puissance)



Optique NON linéaire

1960 : invention du laser

1964 : toute la théorie de l'optique non linéaire est achevée, tous les effets sont prévus !



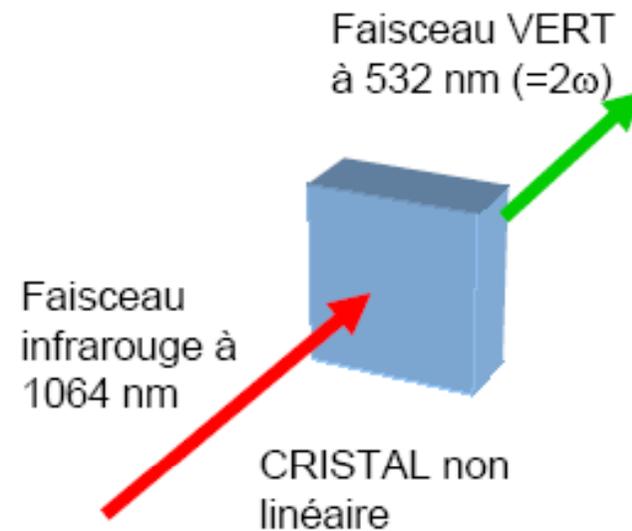
$V_s = f(V_e)$ non linéaire :

$$V_s = k V_e + k_2 V_e^2$$

$$\text{Si } V_e = V \cos(\omega t)$$

$$\text{Alors } V_s = k V \cos(\omega t) +$$

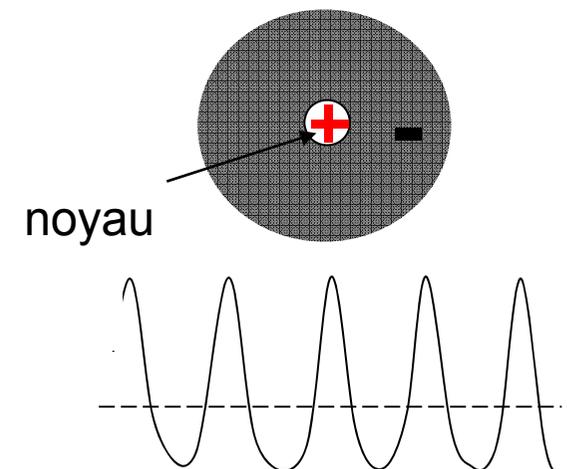
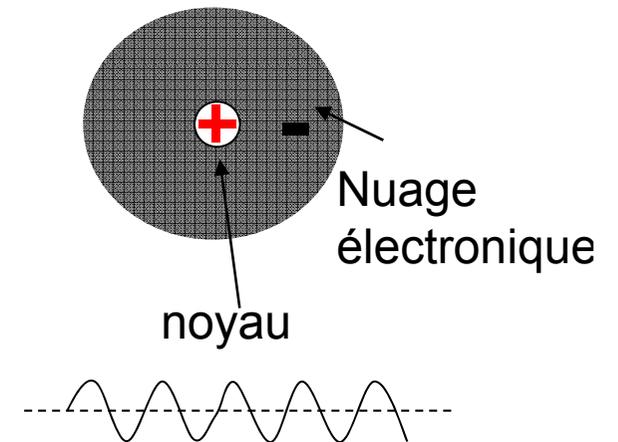
$$k_2 (V^2 / 2)(1 + \cos(2 \omega t))$$



Les non-linéarités optiques ne se manifestent que pour des intensités très élevées $> \sim 10^9 \text{ W/cm}^2$: besoin du LASER !

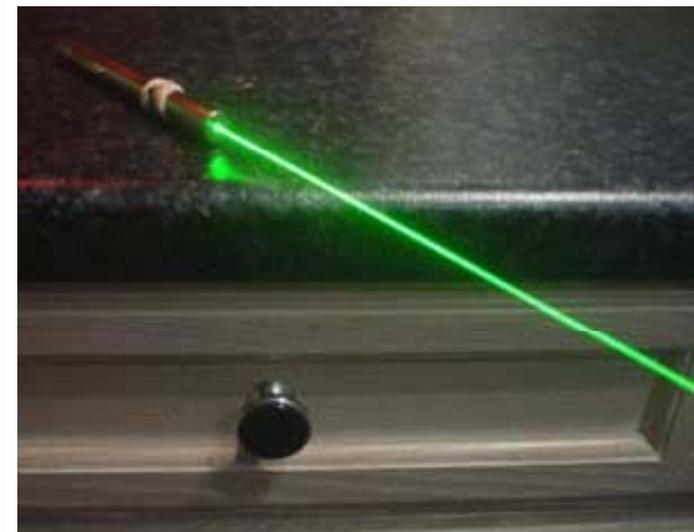
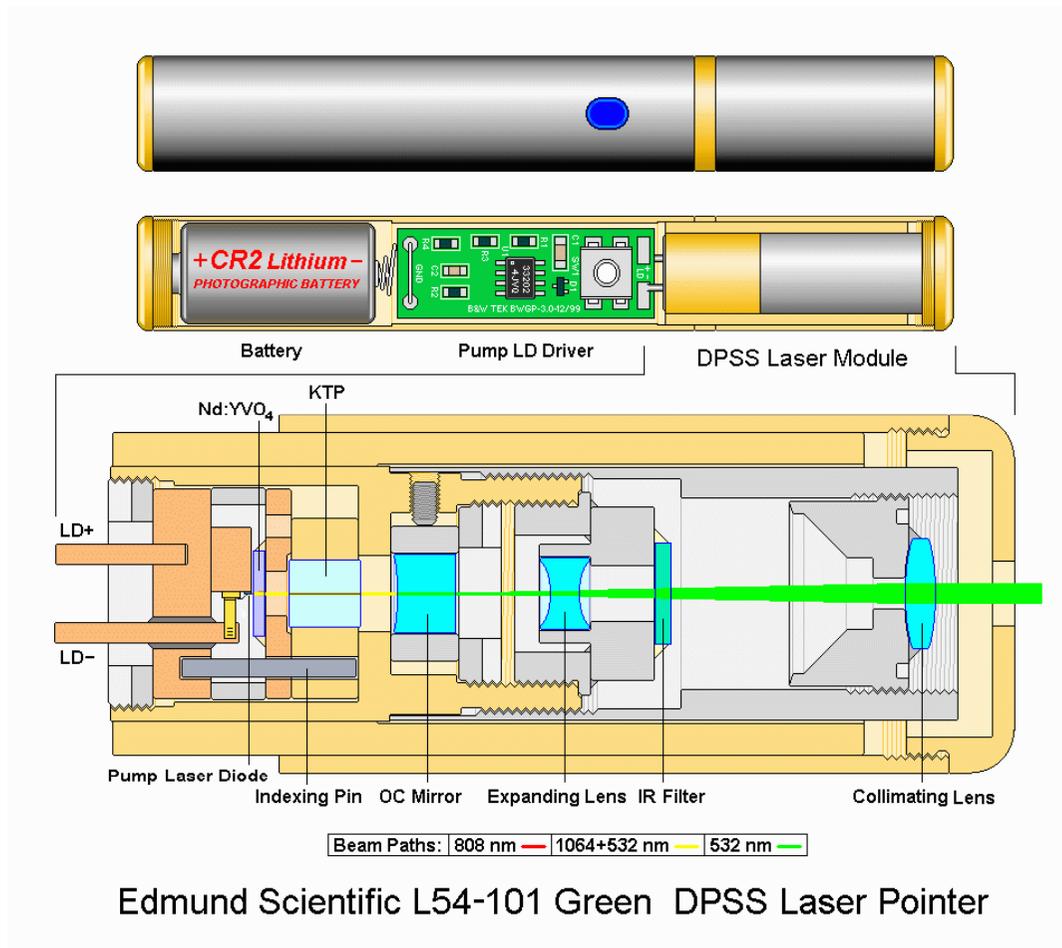
Origine de la nonlinéarité

- Les électrons des atomes oscillent à la fréquence du champ électrique de l'onde
- Les électrons en mouvement rayonnent un champ (comme une antenne) de même fréquence : phénomènes de propagation, réfraction, diffusion... usuels
- Si les électrons sont "trop secoués" (par un champ intense), le déplacement du centre de masse du nuage électronique n'est plus sinusoïdal (comme un ressort qu'on a tiré trop fort): il apparaît des fréquences nouvelles dans le champ rayonné par l'atome.



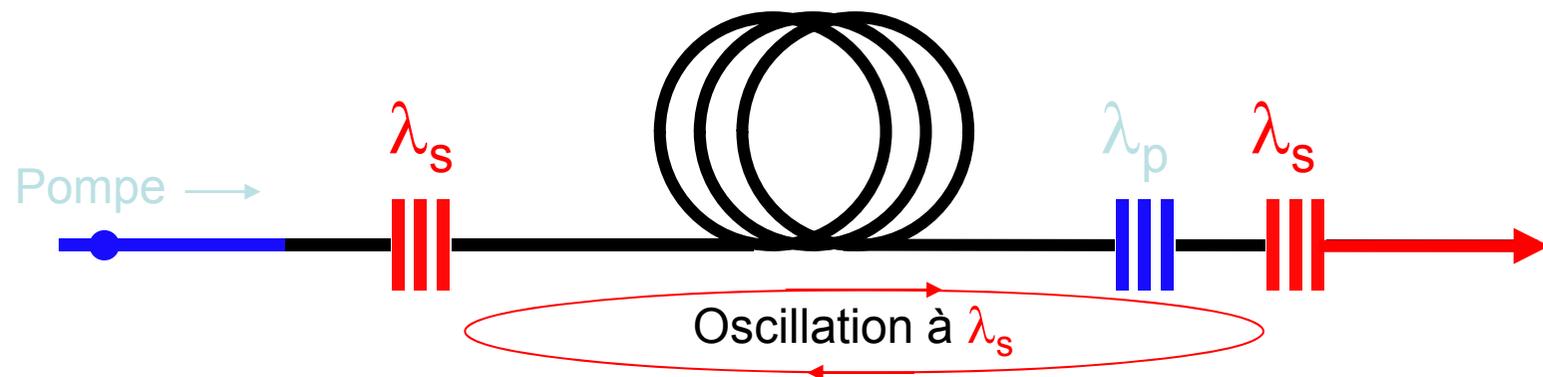
Fonctionnement d'un pointeur vert

- Conversion du rayonnement infrarouge (très facile à obtenir) en rayonnement visible et UV (pas de cristaux émettant directement dans l'UV) : la plupart des lasers solides visibles et UV du commerce sont en fait des lasers infrarouges suivis de dispositifs non-linéaires, basés sur des cristaux biréfringents permettant le phase matching.



Les Lasers à fibre

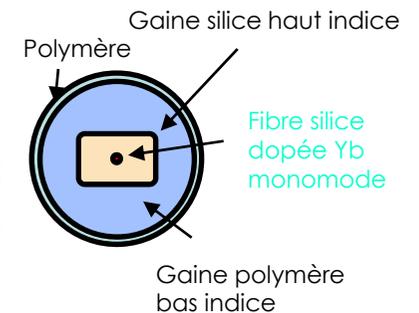
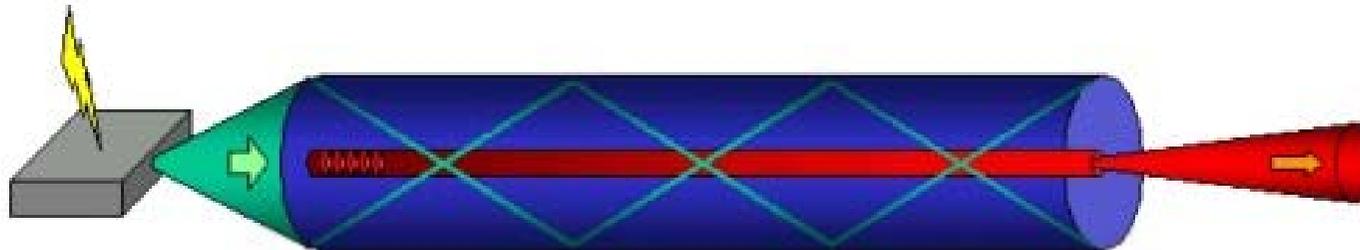
- Le **milieu amplificateur** est une fibre optique dopée avec des ions terres rares (Erbium et/ou Ytterbium essentiellement)
 - Compacité, souplesse, robustesse
- La cavité peut être **très longue**
 - Répartition des effets thermiques
 - Fortes puissances avec bonne qualité spatiale.



Les Lasers à fibre

Le pompage : Comment injecter une diode de puissance (multimode) dans une fibre optique monomode ?

Une solution : fibre à **double coeur**



Fortes puissances possibles !

Le Futur: fibres photoniques...



Ce que je n'ai pas pris chez B. Spears (!)

- Sources de cette présentation:
 - Cours A. Crut – Université de Lyon
 - Cours S. Forget – Université Paris-Nord
 - Cours P.Blandin N. Sanner Université de la Méditerranée
 - Cours P.Hofmann, EPFL
 - Wikipedia, naturellement ...
- Livres:
 - Lasers, principes et fonctionnement - R.Dändliker, Th Sidler
 - Atoms, Molecules and Photons - W. Demtröder