
Physique - Laser

M2 Imagerie

Kuan Fang REN

2009

Les lasers

Le **laser** fait partie de notre vie quotidienne. Pour preuve, voyez cet étrange individu qui rentre à Paris en avion: le lecteur CD qui lui diffuse son morceau préféré utilise un **laser** à semi-conducteur, tout comme l'imprimante qui lui a tiré le dossier qu'il est en train de lire. Et tout à l'heure, juste avant l'embarquement, le prix de la bouteille de parfum qu'il a acheté a été lu grâce à un **laser** à semi-conducteur. Sur la carte de crédit avec laquelle il a payé, l'hologramme a été réalisé avec un **laser**. La bouteille de parfum elle-même a été gravée avec un **laser** Nd³⁺:YAG pulsé. Une partie des tôles de l'avion, tout comme le tissu du siège sur lequel il est assis, ont été découpé par **laser**. Certaines soudures de la carlingue ont été faites avec un **laser** CO₂. L'avion ne garde son cap que grâce à un **gyrolaser** utilisant un **laser** He-Ne. Les yeux de la charmante personne assise à côté de lui ont été sauvés grâce à un **laser** excimère. A l'atterrissage, le coup de fil qu'il donnera sera acheminé par fibre: là encore, un **laser** à semi-conducteur est nécessaire. Même l'air qu'il respirera à Paris a quelque chose à voir avec les **lasers**, qui se chargent de surveiller sa qualité.

Les Lasers, D. Dangoisse et al, DUNOD, p238, 2004

Ce n'est pas tout, pas du tout !!!

Plan du cours

- Introduction
- Principe du laser
- Caractérisation du faisceau
 - **Faisceau continu**
 - **Impulsion**
- Différents types de laser
- Applications
 - **Pince et ciseaux**
 - **Laser à impulsions – coupe, soudure, mesure ...**
 - **Laser de puissance**

Introduction

1. Tous états de la lumière

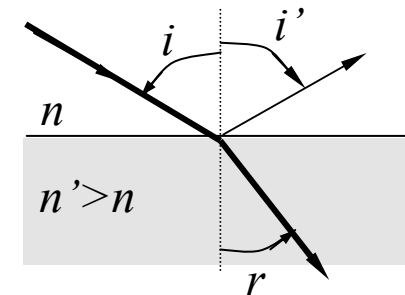
i. Rayons lumineux – optique géométrique

- Ils se propagent rectilignement dans un milieu homogène
- Ils sont réfléchis et réfractés sur une surface.

- Image dans un miroir,
- Fibre optique
- Appareil de photo
- Projecteur
- Microscope
- Lunettes correctrices
- Lunette astronomique
-

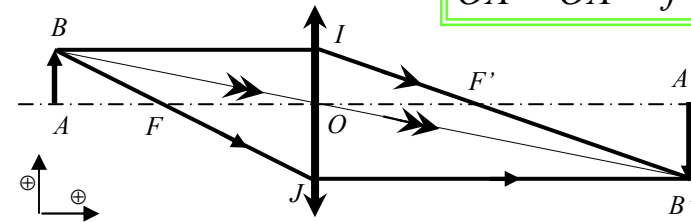
- Lois de Descartes:

$$i = i'$$
$$n \sin i = n' \sin r$$



- Relation de conjugaison (lentille mince):

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'}$$



Introduction

ii. Ondes – électromagnétiques

La lumière est une onde électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 370 nm et 780 nm.

La **vitesse** de la lumière :
Dans le vide :

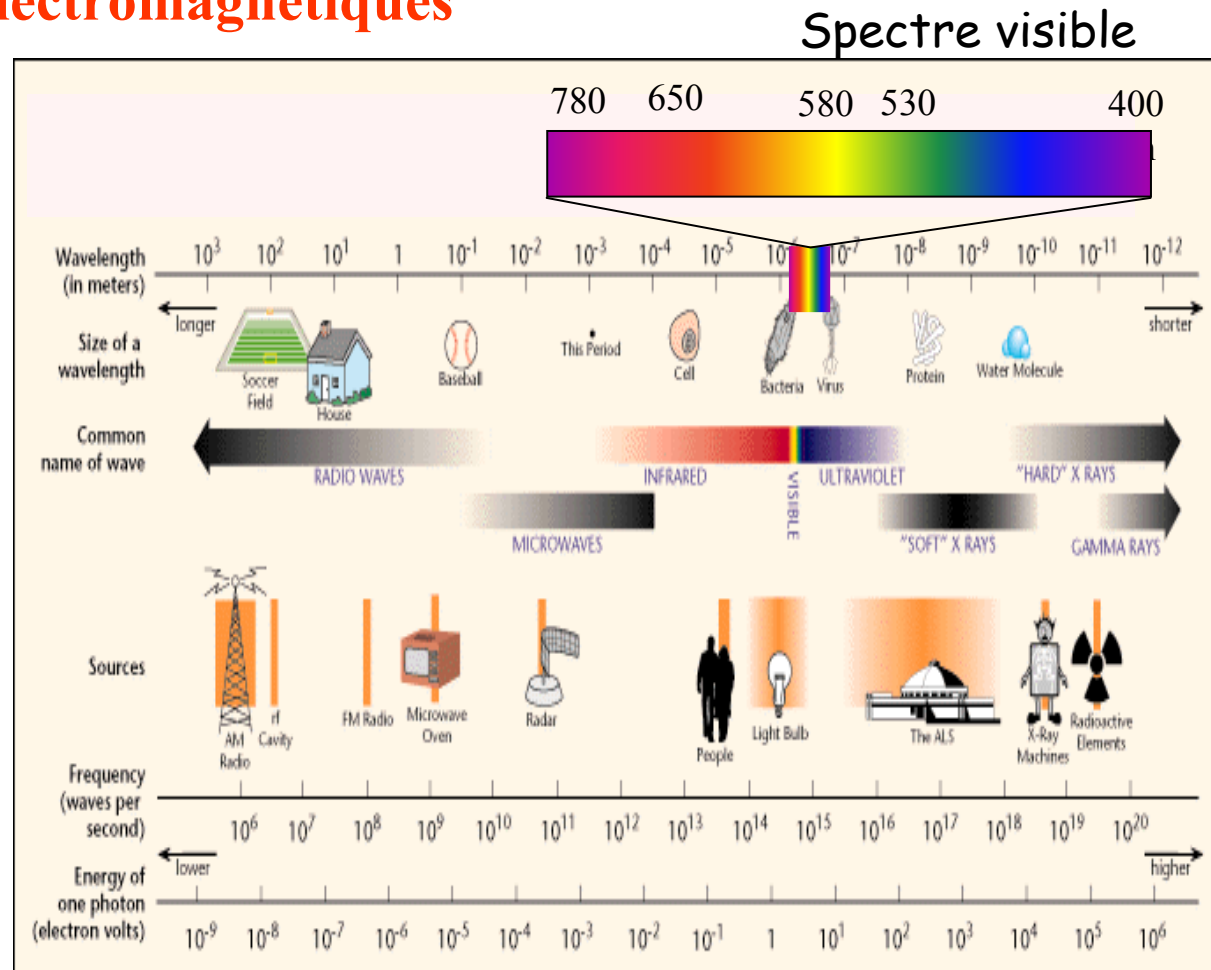
$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Dans un milieu d'indice n :

$$V = c/n$$

Relation longueur d'onde λ , fréquence ν :

$$\lambda = c / \nu$$



Introduction

ii. Ondes – électromagnétiques

- Loi de Wien

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m K}$$

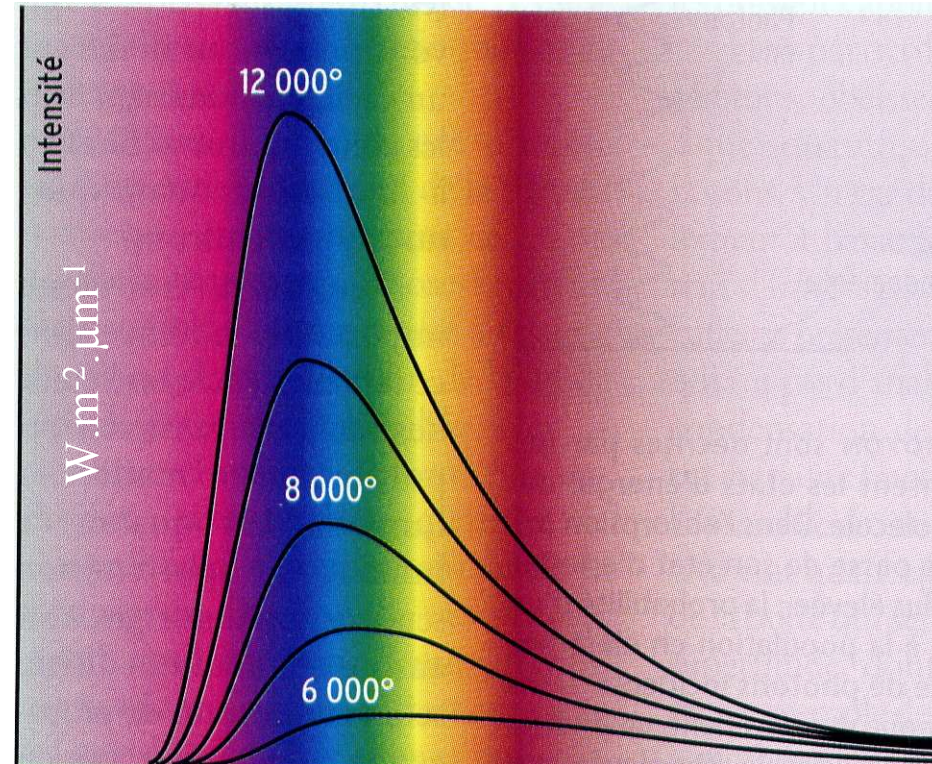
- Loi de Planck :

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J.s,}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J. K}^{-1}$$

Quanta d'énergie



Introduction

iii. Photon – effet photoélectrique

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

Exemples:

- Énergie d'un photon rouge :

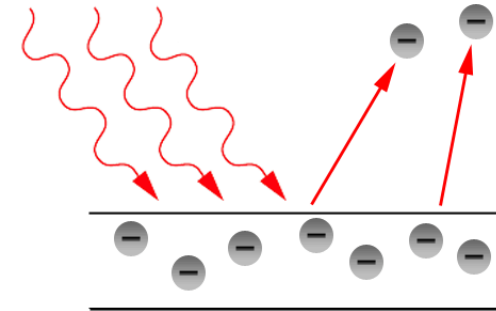
$$E = 0.25 \cdot 10^{-18} \text{ J.s}$$

- Énergie d'un photon bleu :

$$E = 0.5 \cdot 10^{-18} \text{ J.s}$$

- La lumière la plus faible discernable par l'œil humain:

~ 20 photons / s.



Base pour la compréhension du principe de laser

Introduction

2. Quelques ordres de grandeurs

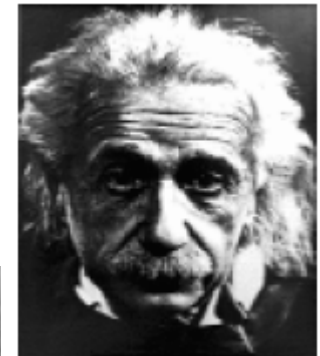
- Vitesse de la lumière:
 - dans le vide (air): $c = 3.0 \times 10^8$ m/s
 - Dans un milieu: $v = c/n$ n : indice de réfraction
- Lumière dans le visible:
 - longueur d'onde: $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,8 \mu\text{m}$,
 - fréquence: $3,75 \times 10^{14} < f < 7,5 \times 10^{14}$ Hz
- Diamètre d'un faisceau laser:
 - $\lambda < w_0 < \text{qq cm}$
- Puissances:
 - Moyenne: mW ~ KW (MW en projet)
 - Crête: 10^{19} W
- Durée d'une impulsion:
 - $T_{\min} > \sim 2\lambda/c$ (~5 fs dans le visible).

Introduction

3. Historique du *LASER*

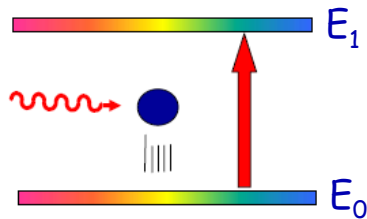
*L*ight *A*mplification by *S*timulated *E*mission of *R*adiation

- 1887 : Heinrich Hertz découvre l'effet photoélectrique
- **1901 : Max Planck établit la loi du rayonnement du corps noir**
- 1905 : Albert Einstein postule la quantification de l'énergie électromagnétique : le **photon** est né
- **1913 : Niels Bohr introduit la quantification des niveaux d'énergie des électrons**
- 1917 : Albert Einstein introduit le concept d'**émission stimulée** pour expliquer le rayonnement du corps noir



Principe du laser

1. Absorption et émission

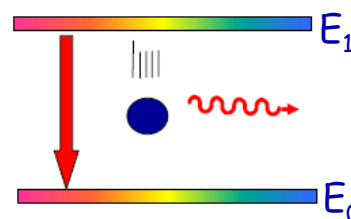


Absorption

Sous l'action d'une onde électromagnétique, l'atome, initialement dans l'état E_0 est porté vers un état E_1 d'énergie supérieure, tout en prélevant cette énergie sur le champ.

Efficacité : Ce processus n'est efficace que si :

\exists un état 1 / $h\nu \geq E_1 - E_0$ (ν : fréquence du rayonnement)

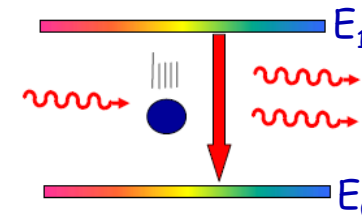


Émission spontanée

Un atome excité au niveau E_1 a une durée de vie limitée et passe *spontanément* au niveau E_0 en émettant un photon de fréquence ν_{10} telle que $h\nu_{10} = E_1 - E_0$

Les caractéristiques de la fluorescence sont très différents pour le rayonnement induit : polarisation, phase et direction d'émission aléatoires

\Rightarrow Rayonnement incohérent



Émission stimulée

La transition du niveau E_1 vers le niveau E_0 est *stimulée* par un photon de fréquence ν_{10} , c'est à dire, d'énergie égale à $E_1 - E_0$.

Le photon produit par cette désexcitation est *indiscernable* du photon incident. Les deux photons auront les mêmes caractéristiques : fréquence, polarisation, direction et phase.

Pour augmenter la probabilité d'émission stimulée, il est important que la population (densité d'électrons) du niveau 1 soit plus élevée que celle du niveau 0 \Rightarrow inversion de population C'est la première condition nécessaire pour avoir l'effet laser.

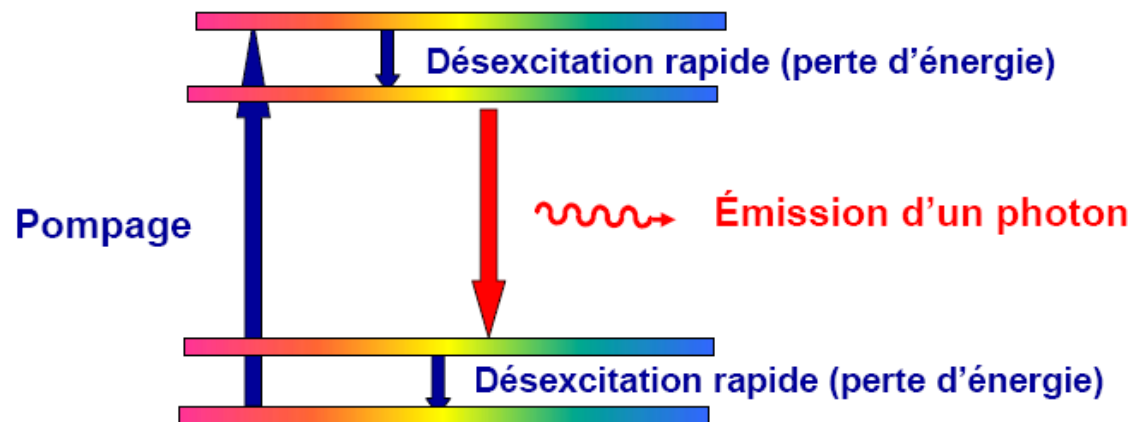
- Inversion de population impossible dans les systèmes à deux niveaux

Principe du laser

1954 : Charles H. Townes et Jim Gordon (Columbia University) démontre le premier MASER (micro-ondes)

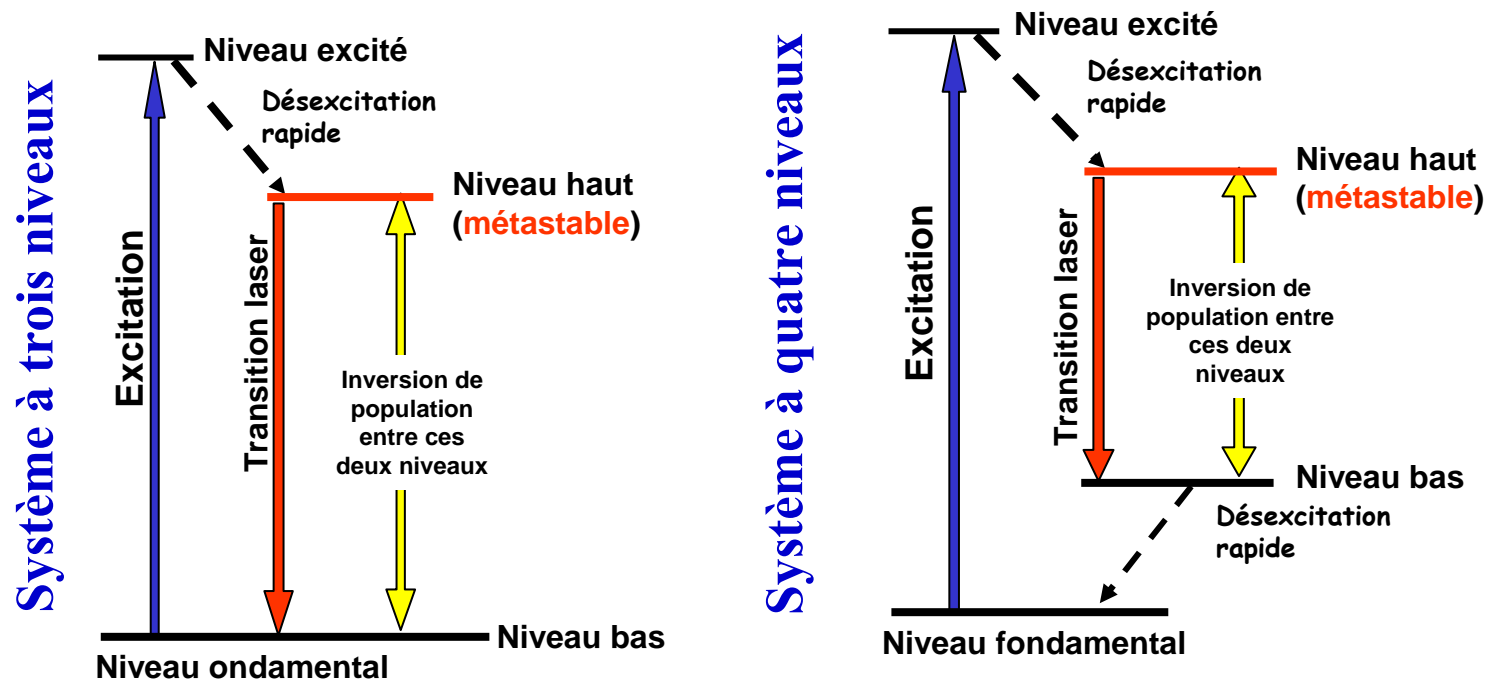
1958 : Alfred Kastler démontre que le pompage optique permet d'obtenir l'inversion de population

– Inversion de population



Principe du laser

2. Diagramme des niveaux d'énergie



Le critère principal pour réaliser l'inversion de population est d'avoir un niveau **métastable** avec une **longue durée de vie**. En moyenne, cette durée varie de la microsecondes à la millisecondes selon les matériaux.

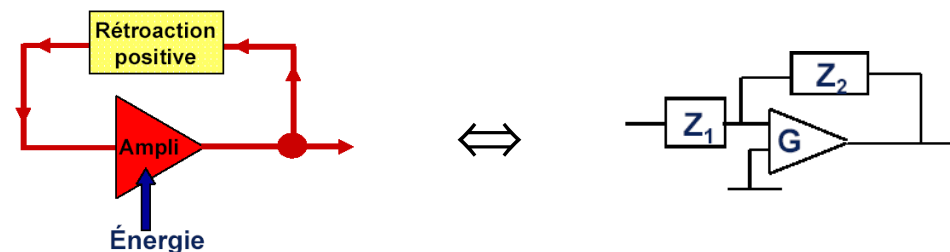
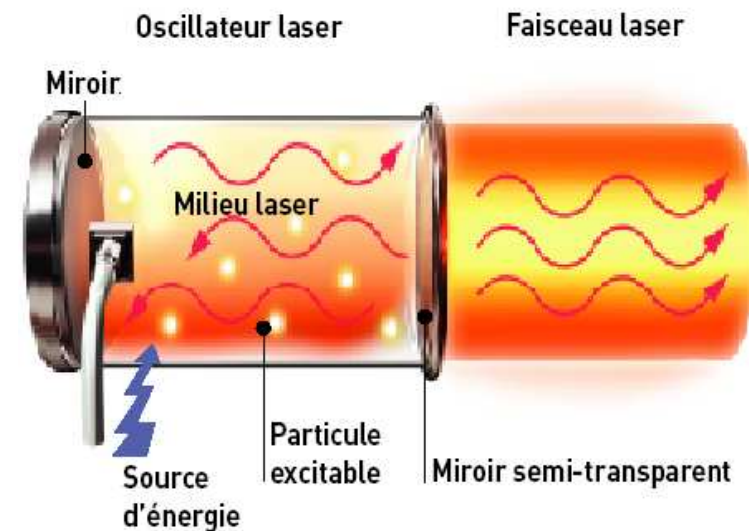
Le pompage permet l'excitation des électrons du niveau bas vers le niveau haut.

Principe du laser

3. Oscillateur optique

Une source d'énergie va exciter les particules du milieu laser qui pourront alors émettre de la lumière.

+ Rétroaction optique par des miroirs (interféromètre de Fabry-Pérot)



Analogie avec l'oscillateur en électronique

Principe du laser

4. Cavité optique

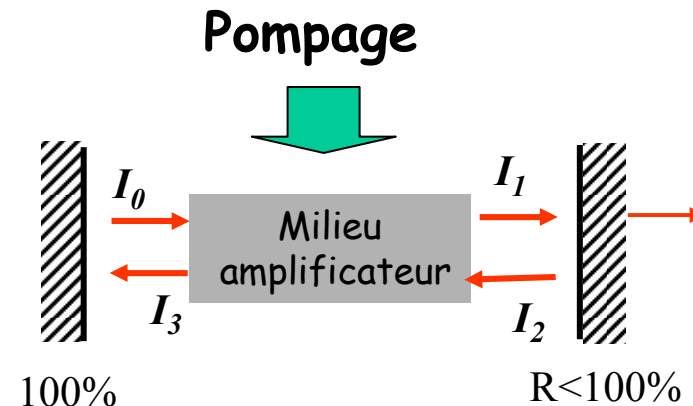
i. Pourquoi une cavité

- Le champ électromagnétique traverse beaucoup de fois le milieu à gain

⇒ la longueur d'interaction est décuplée

- La cavité confine les photons dans une direction privilégiée proche de l'axe optique z
- ⇒ propriétés de directivité de la lumière laser.

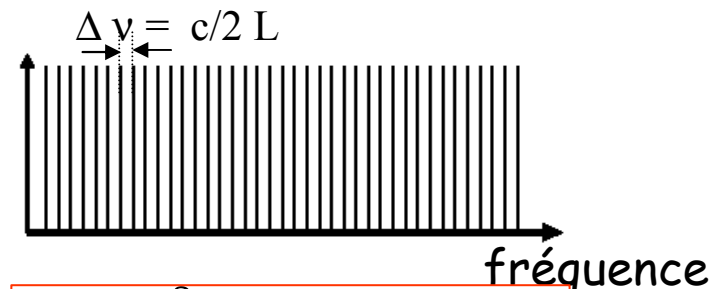
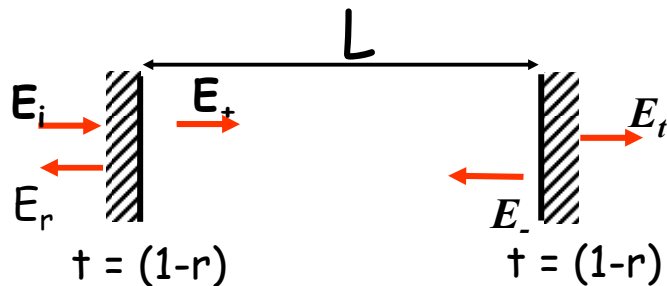
- filtrage spectral en sélectionnant une ou plusieurs composantes monochromatiques
- ⇒ pureté spectrale des lasers.



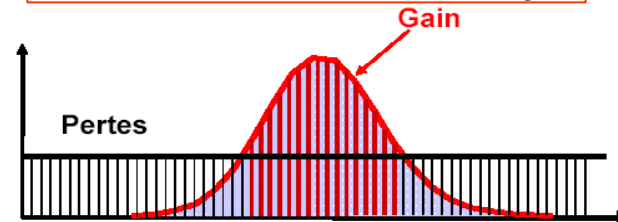
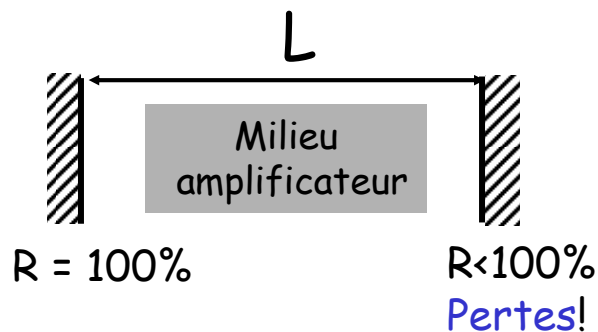
Principe du laser

4. Cavité optique

ii. Interféromètre de Fabry-Pérot



$$T = \frac{|E_t|^2}{|E_i|^2} = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{2\pi\nu l}{c}\right)}$$



Dans une cavité laser, seuls les modes pour lesquels le gain l'emporte sur les pertes sont amplifiés par le milieu amplificateur.

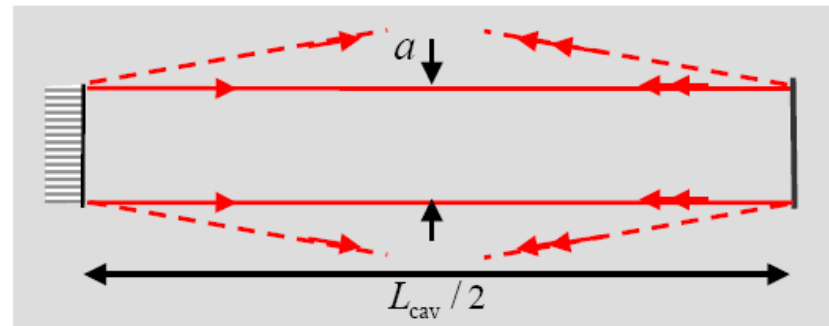
Principe du laser

4. Cavité optique

iii. Pertes par diffraction dans une cavité laser

Pertes négligeables si

$$\frac{\lambda}{a} L_{\text{cav}} \ll a$$

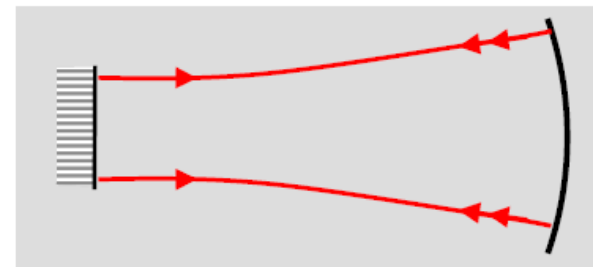


Généralement pas le cas

(milieux amplificateurs confinés) $a = 1 \text{ mm} \Rightarrow \frac{a^2}{\lambda} = 1 \text{ m}$

La solution : cavité stable à miroirs concaves

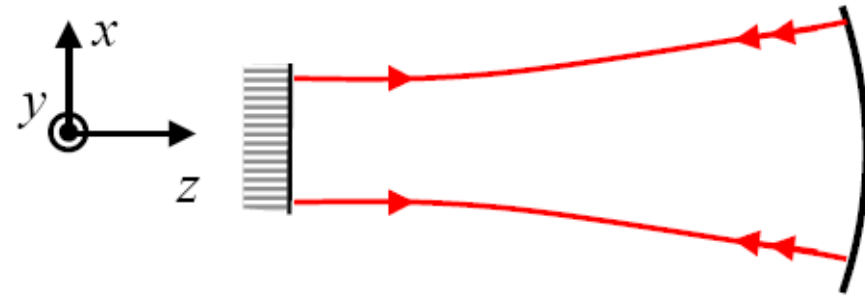
Le miroir concave compense la divergence due à la diffraction



Principe du laser

5. Mode du faisceau laser

Modes: solutions stationnaires de l'équation de propagation à 3D, avec conditions aux limites (miroirs)



Suite $u_{m,n,p}(x, y, z)e^{-i\omega_p t}$ de solutions, dépendant de 3 indices entiers (3D)

p : indice longitudinal $\omega_p = p 2\pi \frac{c}{L_{\text{cav}}} + \varepsilon_{m,n,p}$

m, n : indices transverses : nombre de nœuds (zéros) dans le profil transverse

Mode de base = gaussien:

$$I(r, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right]$$

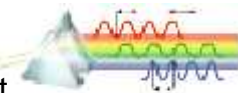
Principe du laser

6. Comparaison avec lumière ordinaire



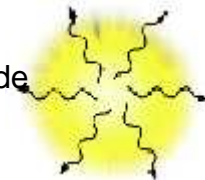
La lumière ordinaire est...

- **Composée de plusieurs couleurs:**
avec un prisme, la lumière que l'on voit blanche peut être décomposée en un arc-en-ciel.



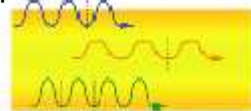
- **Multidirectionnelle:**

les différentes ondes lumineuses se déplacent dans toutes les directions de l'espace à partir de la source.



- **Désordonnée:**

les différentes ondes lumineuses ne sont pas émises en même temps. Elles oscillent de manière désordonnée, indépendamment les unes des autres.



La lumière laser est...

- **D'une seule couleur:**

on dit qu'elle est monochromatique. Il existe de nombreux types de lasers de couleurs différentes



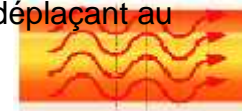
- **Unidirectionnelle :**

toutes les ondes lumineuses se déplacent dans la même direction et forment un faisceau de lumière étroit, non divergent.



- **Ordonnée (ou cohérente):**

toutes les ondes sont en phase, c'est-à-dire avec leurs "bosses" et leurs "creux" aux mêmes endroits. C'est le caractère ondulatoire de la lumière laser. Il est possible de comparer la lumière laser à une armée de petits soldats "marchant au pas cadencé" et la lumière ordinaire à une foule de personnes se déplaçant au hasard..



Principe du laser

Concentration spatiale, spectrale et temporelle

Grande cohérence spatiale

--> focalisation maximale sur un diamètre = λ

- **Forte directivité** : divergence = $\theta = \lambda/\pi w_0$

exemple : $w_0=1$ cm, $\theta = 2 \cdot 10^{-5}$ rad à $\lambda = 633$ nm

Le faisceau double de taille au bout de 500 m !



Luminance d'un laser TEM 00 : P/λ^2

Exemple : He:Ne 1mW à 633 nm : $L = 2,5 \cdot 10^9$ W/sr/m²

Soleil 1 kW/m² au sol, 30' d'arc : $L = 1,6 \cdot 10^7$ W/sr/m²

Principe du laser

Largeur de raie très fine: --> excitation sélective de niveaux d'énergie
(refroidissement laser, horloge atomique)
--> grande longueur de cohérence
($\Delta \nu = 10 \text{ Hz}$, $L = 30\,000 \text{ kms}$)

Production d'impulsions ultracourtes : record 4,5 fs (IR)
et 0,7 fs (rayons X)

--> puissance crête élevée

- laser Nd:YAG 100 mJ, 5 ns : $P_{\text{crête}} = 20 \text{ MW}$

- laser fs amplifié à saphir dopé au titane
1 J, 20 fs : $P_{\text{crête}} = 50 \text{ TW}$ (10^{12})

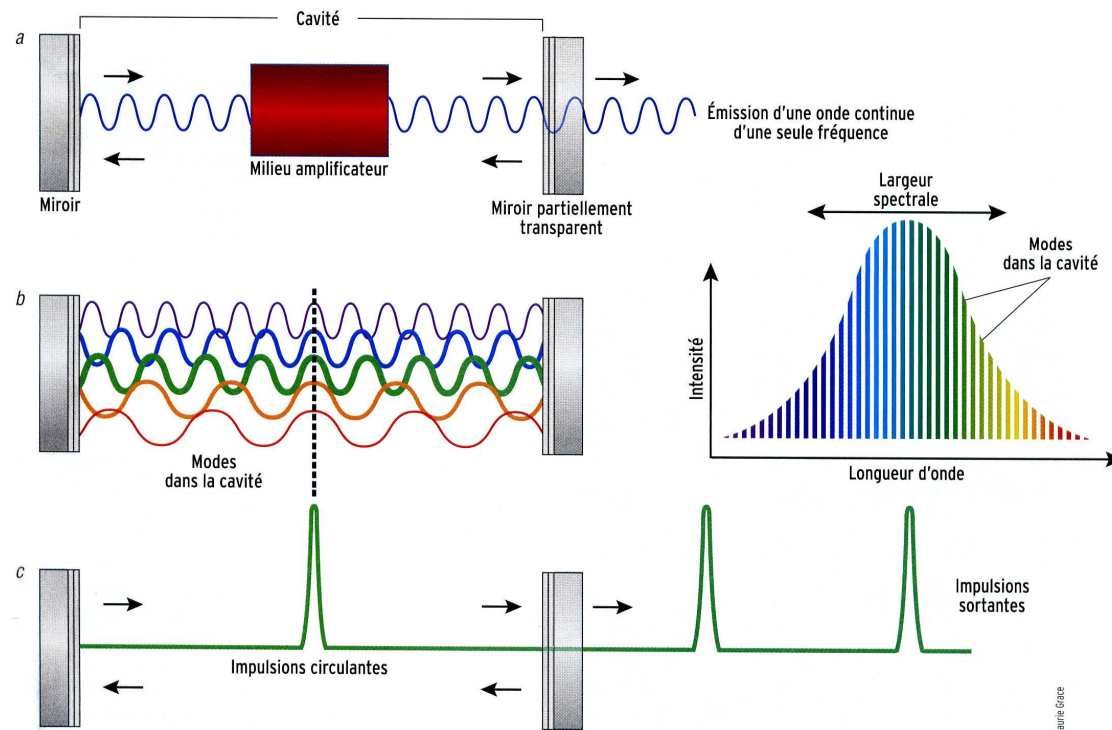
Principe du laser

7. Laser à impulsions ultracourtes

Principe: Si l'on rajoute un paramètre (pompage ou perte) dépendant du temps, le laser peut alors délivrer des impulsions de lumière.

Méthode:

- Active: placer dans la cavité une cellule acousto-optique, ou électro-optique
- Passive: placer dans la cavité un absorbant saturable rapide.

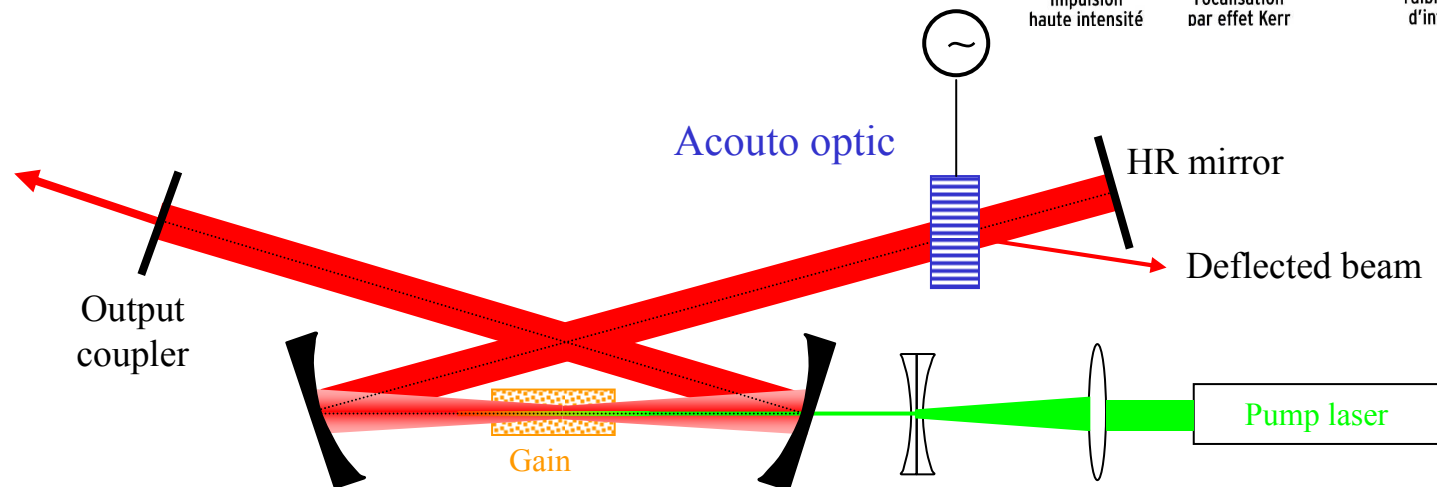
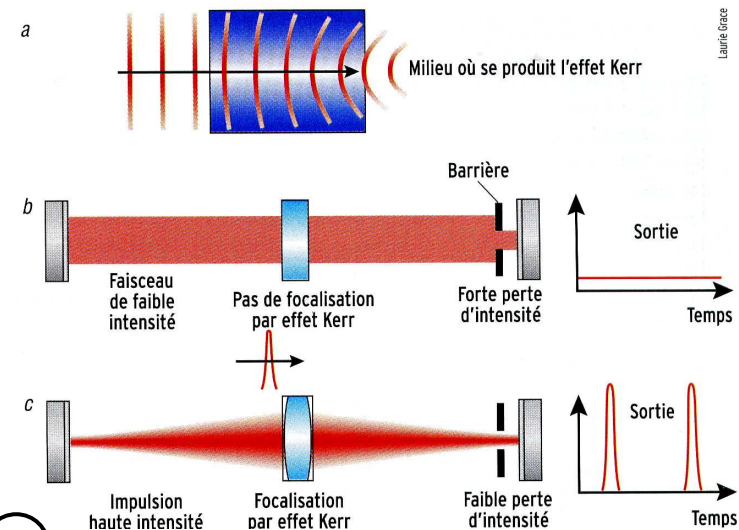


Principe du laser

7. Laser à impulsions ultracourtes

Première génération : utilisait des jets de colorants organiques dissous dans des solvants visqueux

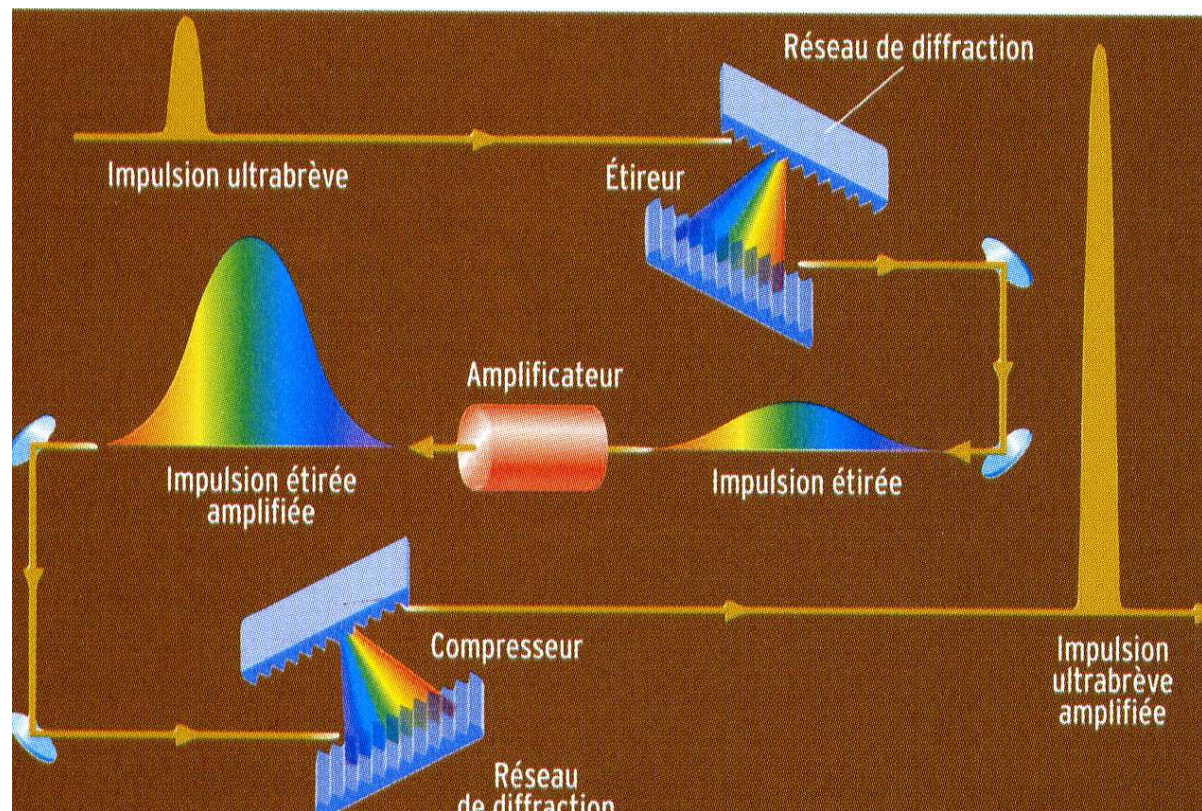
Nouveaux matériaux: cristaux à large bande comme le saphir dopé au titane.



Principe du laser

7. Laser à impulsions ultracourtes

Les rayonnements ultra intenses sont produits en trois phases:
1. Étirement, 2. Amplification 3. Compression - intensité est 10 000 fois supérieure.

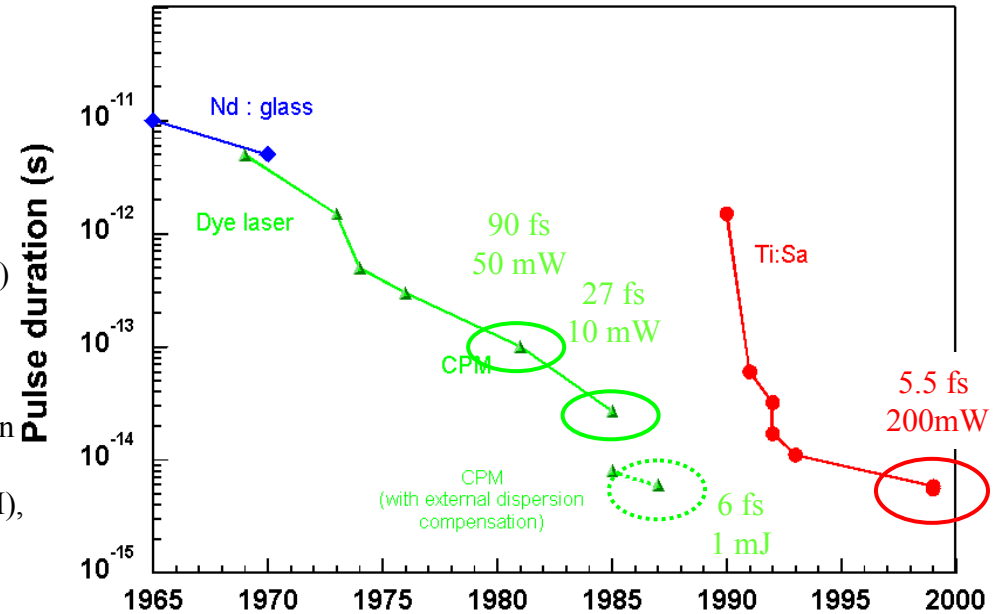


Principe du laser

7. Laser à impulsions

Key dates :

- 1964 : first pulsed laser in picosecond domain
- 1981 : CPM (colliding pulsed Mode locked dye Laser)
first sub-100fs pulsed laser
- 1985 : the shortest duration obtained by
CPM+dispersion compensation (27fs)
- 1987 : CPM with amplification and external dispersion
compensation (2 cycles pulse duration)
- 1990 : Ti:Sa oscillator, « Magic modelocking » (KLM),
femtosecond democratization.
- 1999 : 2 cycles pulse duration in Ti:Sa oscillator

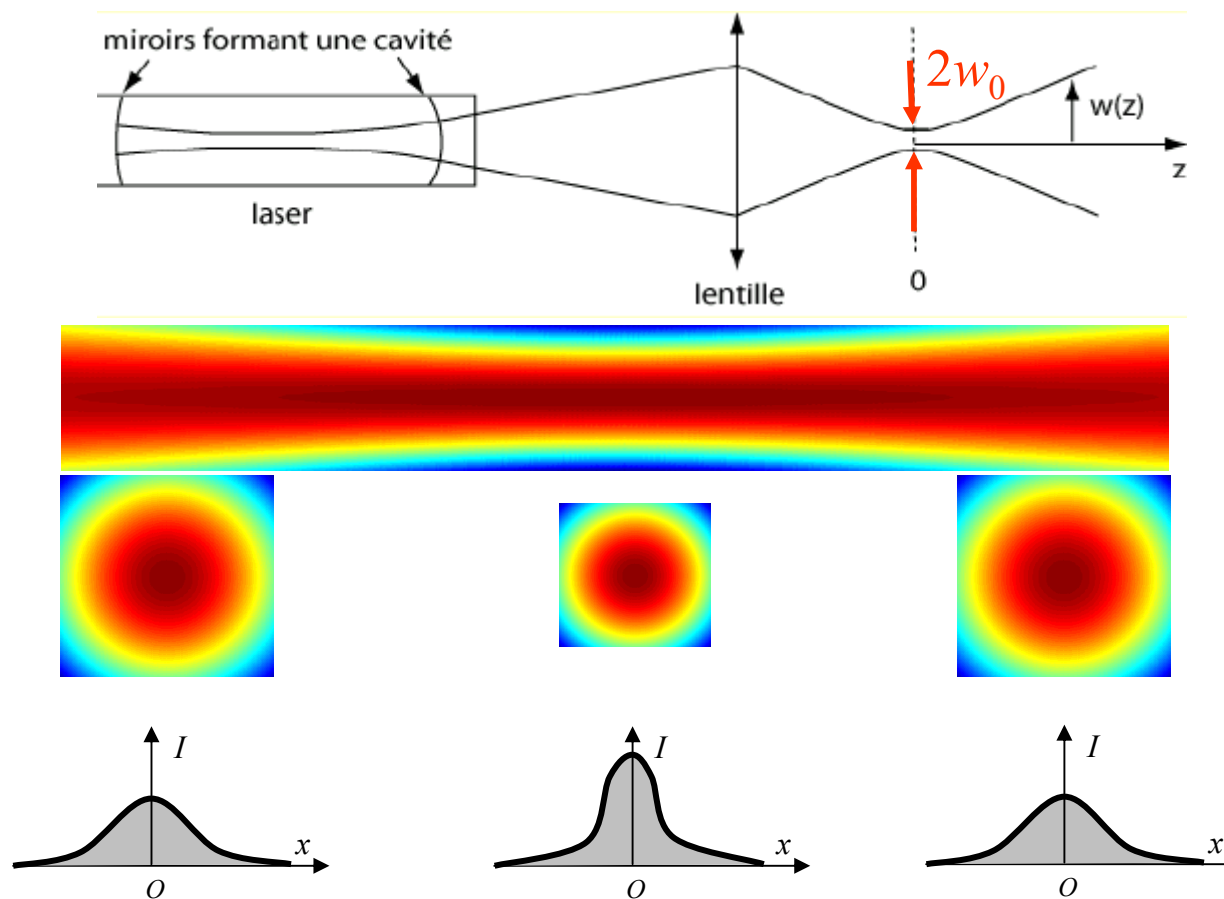


Préfixes SI

Puissance	Préfixe	Symbole	nombre	Puissance	Préfixe	Symbole
10^{24}	yotta	Y	Quadrillion	10^{-24}	yacto	y
10^{21}	zetta	Z	Trilliard	10^{-21}	zepto	z
10^{18}	exa	E	Trillion	10^{-18}	atto	a
10^{15}	péta	P	Billiard	10^{-15}	femto	f
10^{12}	téra	T	Billion	10^{-12}	pico	p
10^9	giga	G	Milliard	10^{-9}	nano	n
10^6	méga	M	Million	10^{-6}	micro	μ
10^3	kilo	k	Mille	10^{-3}	milli	m
10^2	hecto	h	Cent	10^{-2}	centi	c
10^1	déca	da	Dix	10^{-1}	déci	d

Caractérisation du faisceau laser

1. Faisceau continu



Caractérisation du faisceau laser

1. Faisceau continu - gaussien

(a). **Intensité** décroît exponentiellement en fonction de r , elle évolue aussi le long du faisceau en z

$$I(r, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \exp \left[-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right]$$

(b). **Rayon au col du faisceau** (beam waist radius)

$$I(r = w) = \frac{I(r = 0)}{e^2}$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2}$$

(c). **Divergence du faisceau:**

$$\theta = \arctan \left(\frac{\lambda}{\pi w_0} \right)$$

Si le faisceau est gaussien en un point, il est gaussien partout en aval (cohérence spatiale)

Caractérisation du faisceau laser

(d). Distance de Rayleigh: $z_R = \pi w_0^2 / \lambda$.

$$I(0, z_R) = \frac{I_0}{2}, \quad w(z_R) = \sqrt{2} w_0$$

Exemples:

1. $\lambda = 600 \text{ nm}$:

$w_0 = 10 \text{ }\mu\text{m}$, $z_R = 500 \text{ }\mu\text{m}$, $\theta = 0.02 \text{ rad}$

$w_0 = 1 \text{ mm}$, $z_R = 5 \text{ m}$, $\theta = 0.0002 \text{ rad}$

$w_0 = 1 \text{ cm}$, $z_R = 500 \text{ m}$, $\theta = 0.00002 \text{ rad}$

2. $w_0 = 100 \text{ }\mu\text{m}$:

$\lambda = 10.6 \text{ }\mu\text{m}$ (CO₂), $z_R = 3 \text{ mm}$, $\theta = 0.034 \text{ rad}$

$\lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m}$ (He-Ne), $z_R = 5 \text{ cm}$, $\theta = 0.002 \text{ rad}$

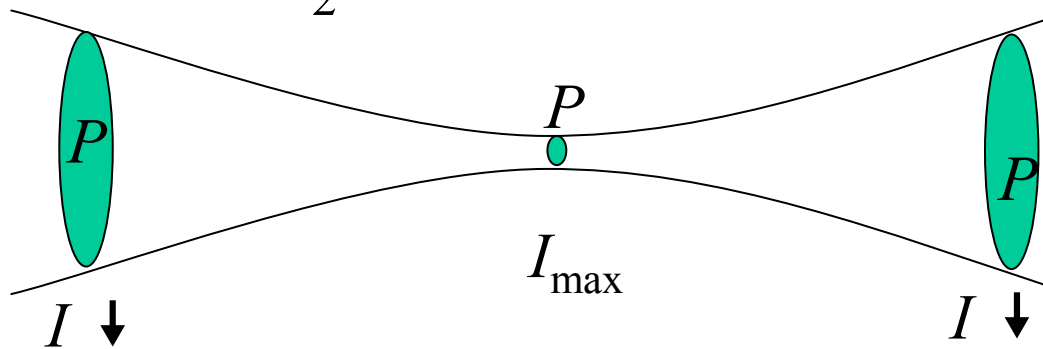
$\lambda = 0.488 \text{ }\mu\text{m}$ (bleu YAG), $z_R = 6.4 \text{ cm}$, $\theta = 0.0015 \text{ rad}$

Caractérisation du faisceau laser

(e). Conservation de puissance

La puissance totale du faisceau (z donné):

$$\begin{aligned} P &= \int I(r, z) dS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} I(r, z) r dr d\theta \\ &= 2\pi I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 \int_0^{\infty} \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2(z)} \right] r dr \\ &= I_0 \frac{\pi w_0^2}{2} \end{aligned}$$



Caractérisation du faisceau laser

(f). Transformation par une lentille

- Formule de conjugaison :

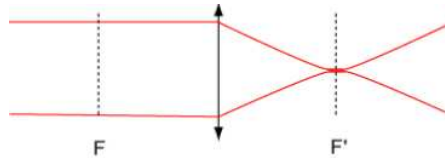
les distances sont algébriques

s : distance lentille-col objet

z_R : distance de Rayleigh objet

s' : distance lentille-col image

$$s' = f' \left[1 - \frac{f'(s + f')}{(s + f')^2 + z_R^2} \right]$$



$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s + \frac{z_R^2}{s + f'}} = \frac{1}{f'}$$

Conséquences :

- pour des faisceaux quasi-parallèles, $z_R \gg$ autres distances, donc $s' = f'$ comportement proche de l'optique géométrique.
- si on place le col d'un faisceau laser au foyer objet d'une lentille, on trouve un col au foyer image de cette lentille. En effet, $s = -f' \Rightarrow s' = f'$: résultat radicalement différent de l'optique géométrique...
- relation de conjugaison entre s et s' dépend non seulement de f' mais aussi de z_R donc de λ et w_0 , différente de l'optique géométrique.

Caractérisation du faisceau laser

- Changement de taille du col :

$$m = \frac{w_0'}{w_0} = \left[\left(1 + \frac{s}{f'} \right)^2 + \left(\frac{z_R}{f'} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad z_R' = m^2 z_R$$

1. Dans le cas où s est infini, alors $m = 0 \rightarrow w' = 0$ (mais non, minimum donc $\sim \lambda/2$)

2. Dans le cas où $s = -f'$ (col objet au foyer objet), alors $m = f/z_R = f\lambda / \pi w_0^2$

Même formule, mais situation très différente !

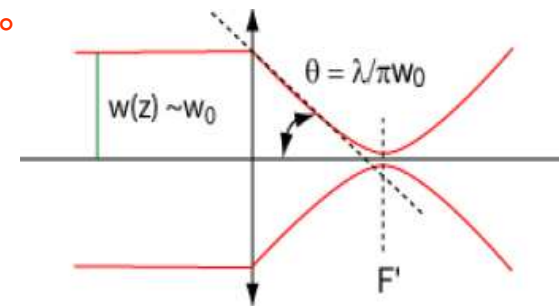
$$\theta' = \lambda / \pi w_0' = w_0 / f'.$$

Exemple: $w_0 = 1 \text{ cm}$, $f' = 0.1 \text{ m}$, $\lambda = 0.6328 \text{ }\mu\text{m} \rightarrow z_R = 500 \text{ m}$, $\theta = 0.001^\circ$

$$s = -f' = -0.1 \text{ m} \rightarrow s' = 0.1 \text{ m}, w_0' = 20 \text{ }\mu\text{m}, \theta' = 5.7^\circ$$

on passe d'un grand col à un petit col ...

En pratique w_0 peut être très petit, et donc w_0' grand, avec tous les intermédiaires...

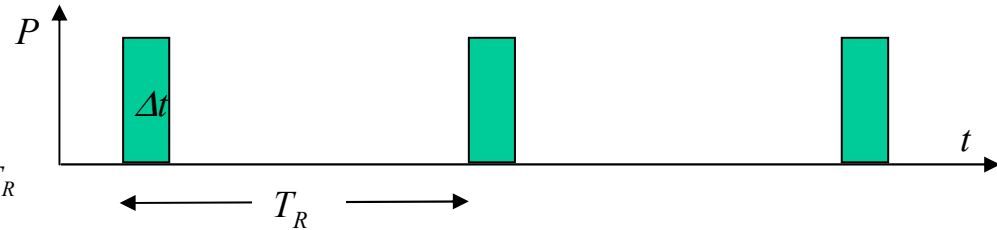


Caractérisation du faisceau laser

2. Impulsions

- Modèle simplifié (intensité homogène temporellement et spatialement):

- Cadence (nombre d'impulsions par seconde): $C_a = 1/T_R$
- Durée d'impulsions: Δt
- Période de répétition: T_R
- Énergie par impulsion: E
- Puissance moyenne: $P_m = E \cdot C_a = E/T_R$
- Puissance crête: $P_c = E/\Delta t$



Exemple: $P_m = 2 \text{ W}$, $C_a = 1 \text{ kHz}$, $\Delta t = 10 \text{ fs}$ $\rightarrow E = 1/1000 = 2 \text{ mJ}$, $P_c = 2 \cdot 10^{-3} / (10 \cdot 10^{-15}) = 0.2 \cdot 10^{12} \text{ W}$

- Modèle gaussien:

L'intensité varie en temps: $I(t) = I_0 e^{-\frac{t^2}{\tau^2}}$

Le spectre est plus large: $I(\omega) = I_0' e^{-\tau^2(\omega - \omega_0)^2}$

Durée à 1/e de l'intensité: $\Delta t_e = 2\tau = 1.44 \Delta t_{DH}$

Exemple : $\Delta t_{DH} = 5 \text{ fs}$, $\Delta t_e = 7.2 \text{ fs}$, $\Delta \nu_{DH} = 8.8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, $\Delta \lambda_{DH} = 0.34 \mu\text{m}$

Largeur demi-hauteur:

$$\Delta t_{DH} = \sqrt{\ln 2} \cdot 2\tau$$

Largeur de bande fréquence :

$$\Delta \nu_{DH} = \Delta \omega_{DH} / 2\pi = \sqrt{\ln 2} / \pi \tau$$

Produit durée et bande de fréquence:

$$\Delta \nu_{DH} \Delta t_{DH} = 0,44$$

Différents types du laser

Les lasers : même principes de base, mais tous tellement différents

- Différents types de milieux amplificateurs :
 - **lasers à gaz**
 - **lasers solides**
 - **lasers à colorant**
 - **lasers à semi-conducteurs**
- Différentes sources de pompage :
 - **pompage électrique**
 - **pompage optique (cohérent ou incohérent)**
 - **réaction chimique**
 -

Différents types du laser

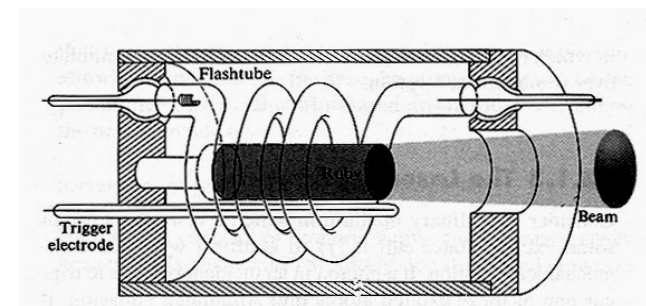
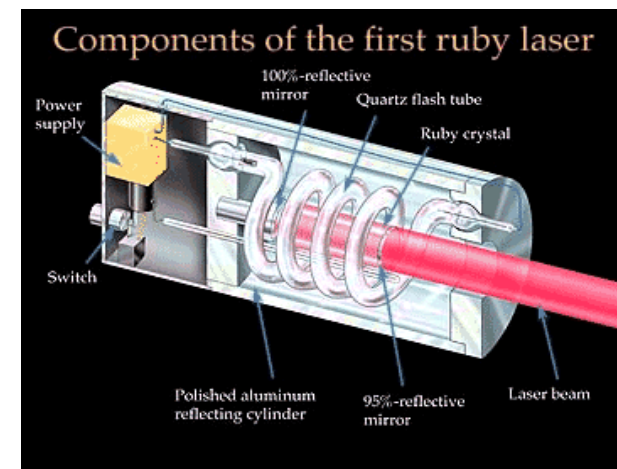
Classés selon les milieux amplificateurs

1. Laser solide

Exemples du solide:

- Cristaux inorganiques dopés (Ti:Al₂O₃, Nd:YAG),
- Verres dopés,
- Polymères dopés,
-

Le **laser Rubis** est inventé en 1960 by Ted Maiman, c'est le premier laser.

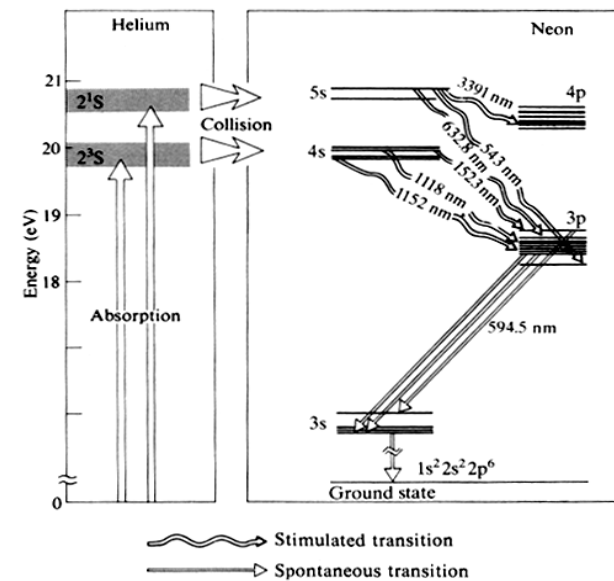


Différents types du laser

2. Laser à gaz

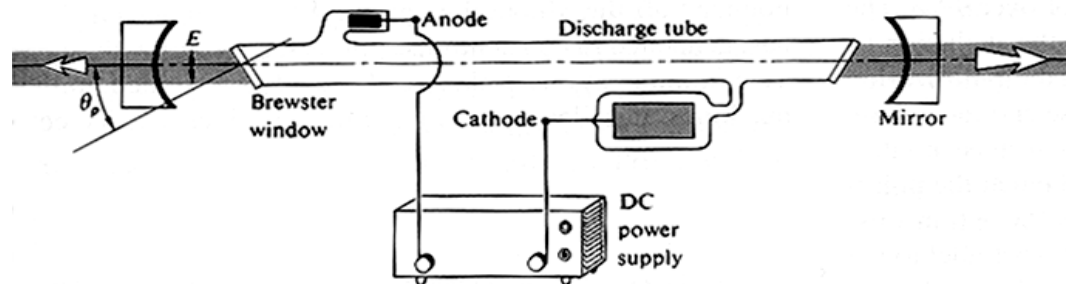
Exemples des gaz:

- Argon,
- Krypton,
- Hélium-Néon
- Dioxine de carbone,
- excimère,
-



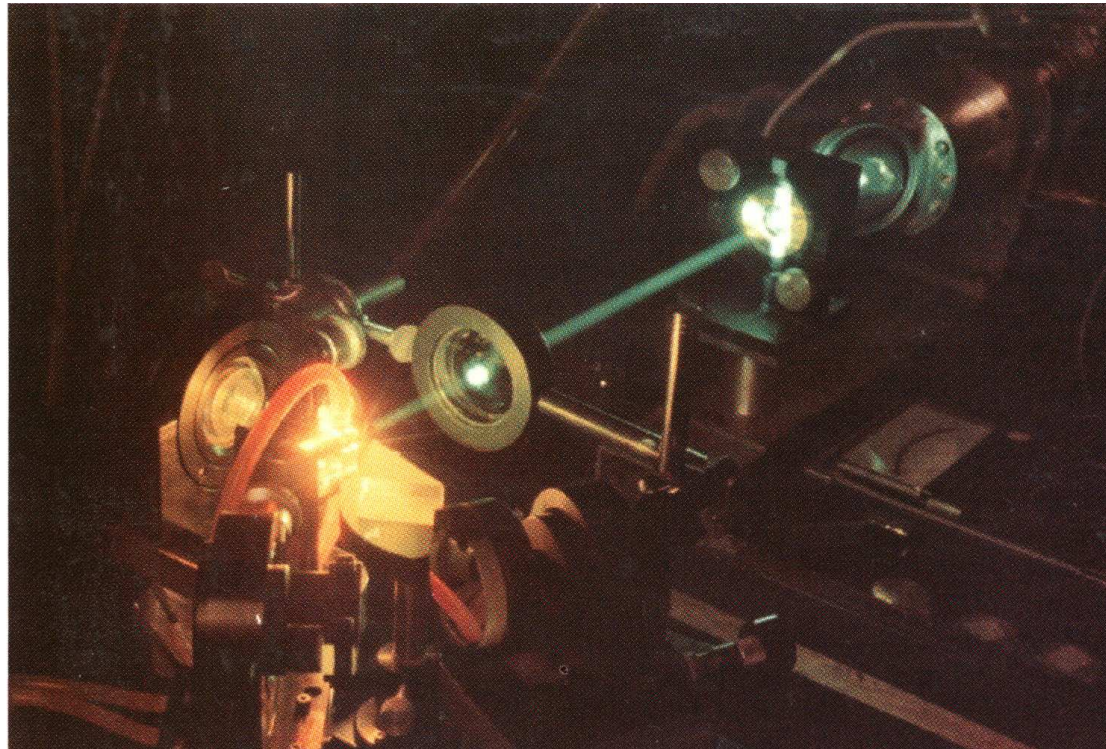
Laser He-Ne:

Des électrons énergétiques obtenus par décharge électrique excitent des atomes d'Hélium par collision qui transfèrent l'excitation à des atomes de Néon qui peuvent émettre à différentes longueurs d'ondes.



Différents types du laser

3. Laser à colorant



Les lasers à colorants sont des systèmes à quatre niveaux idéals et ils peuvent émettre sur une large gamme de plus de 100 nm

Différents types du laser

4. Laser à semi-conducteurs (diode laser)

Milieu amplificateur : jonction p-n pompée électriquement

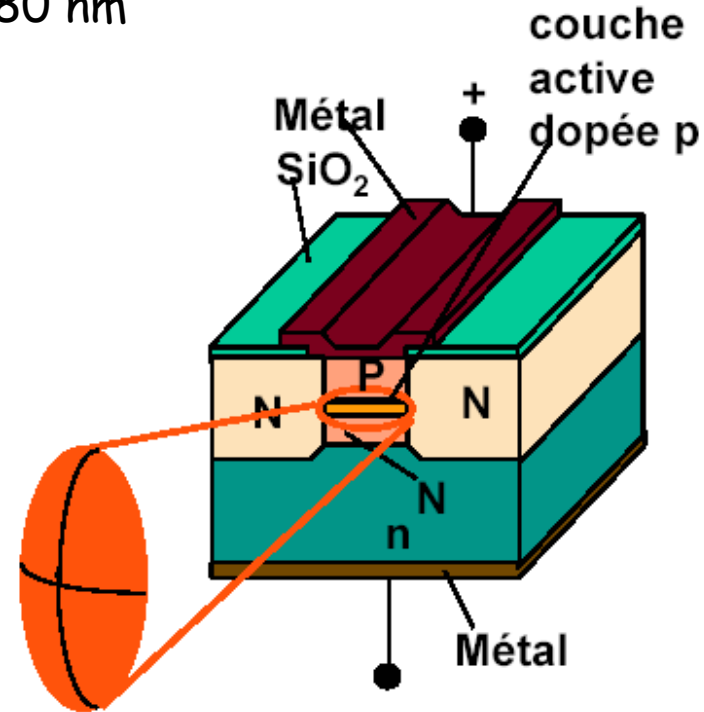
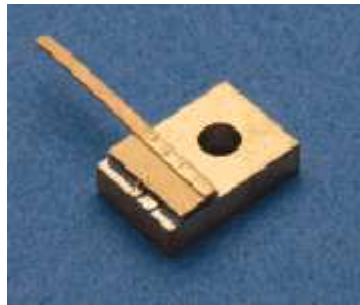
AlGaAs \rightarrow vers 780 - 850 nm

InGaAs \rightarrow vers 900 - 980 nm

AlGaInP \rightarrow vers 630 - 680 nm

Lasers très compacts

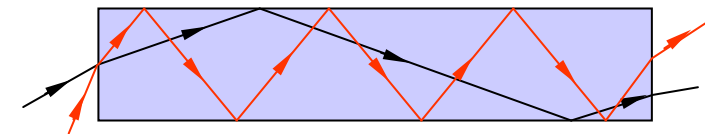
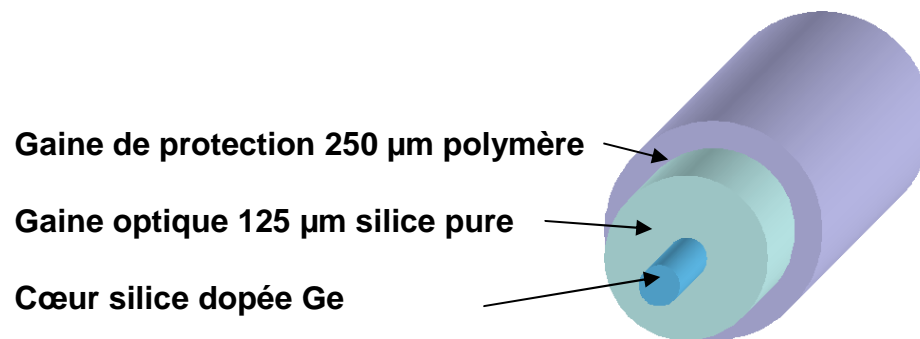
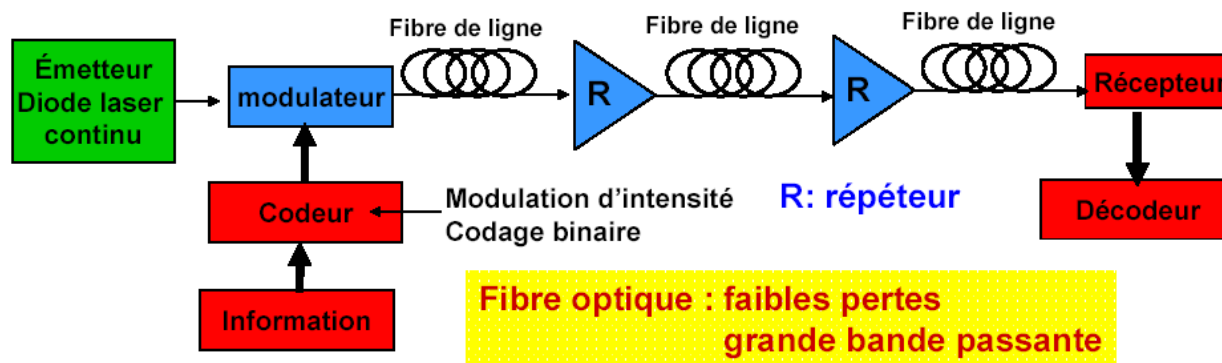
Applications : CD, pointeur ...



Différents types du laser

5. Liaisons optiques longues distances

Utilisation de fibres optiques pour transmettre les informations



Différents types du laser

Classés selon les sources de pompages

1. Décharges électriques

- Décharges électriques parfois très intenses (30 A sous 500 V)
- Technique adaptée au pompage des lasers à gaz, mais pas utilisable dans les liquides ou des solides.

2. Excitation électrique

- Dans les semi-conducteurs, l'injection d'un courant suffisamment intense dans un jonction P-N mène à une inversion de population entre bande de conduction et bande de valence.

3. Excitation optique

L'excitation du milieu amplificateur se fait par d'autres photons issus de lampes flashes ou d'autres lasers.

Différents types du laser

4. Pompage de plasmas

Une impulsion très intense focalisée sur une cible solide y crée un plasma dense capable de générer les impulsions laser en rayons X.

5. Dissociation de molécules

Le principe repose sur la formation d'excimères (Xe_2^* , Ar_2^* , Kr_2^*) ou d'exciplexes (KrF^*) dans un état excité. La désexcitation se fait alors par émission de photons UV.

L'astuce est que l'état fondamental de ces molécules est instable. Elles se dissocient donc très vite après leur formation, donnant lieu à des inversion de population très fortes.

6. Réactions chimiques

Certaines réactions chimiques produisent des espèces directement dans des niveaux excités: l'inversion de population est alors directement réalisée.

Applications

1. Stockage d'informations
2. Usinage athermique
3. Pinces et ciseaux optiques
- Microscopie classique*
4. Microscopie à fluorescence
5. Microscopie confocale
6. Microscopie multi-photonique
7. Génération de troisième harmonique
8. Tomographie optique cohérente