



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



COURS OptoElectronique

Département Mesures Physiques - S4

4-5 séances

Année universitaire 2023/2024



Département Photoniques & Ondes

P. Signoret
Enseignant - Chercheur



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER



l'institut
d'électronique

Institut d'Electronique et des Systemes
Université Montpellier

IUT Mesures Physiques – Année Universitaire 2023/2024

Plan du Cours

Introduction : Contexte de l'OptoElectronique

1) Le LASER : 1917 – 1960 – 2010

1.1 Briques de base d'un émetteur laser – Cours #1

1.2 Conditions sur la cavité – Cours #2

*1.3 Notions de faisceaux Gaussiens - Propagation – Transformation
– Cours #3*

2) Les Guides d'onde Optique – Cours #3 & #4

2.1 Fibre optique passive

2.2 Réseau de Bragg et applications capteurs

2.3 Notions de fibre optique active

3) Détection Optique – Cours #5 ??

3.1 Matériaux semi-conducteurs et photodétection

3.2 Instruments de l'OptoElectronique



Plan du Cours

Introduction : Contexte de l'OptoElectronique

1) Le LASER : 1917 – 1960 – 2010

1.1 Briques de base d'un émetteur laser

1.2 Conditions sur la cavité

1.3 Notions de faisceaux Gaussiens - Propagation - Transformation

2) Les Guides d'onde Optique

2.1 Fibre optique passive

2.2 Réseau de Bragg et applications capteurs

2.3 Notions de fibre optique active

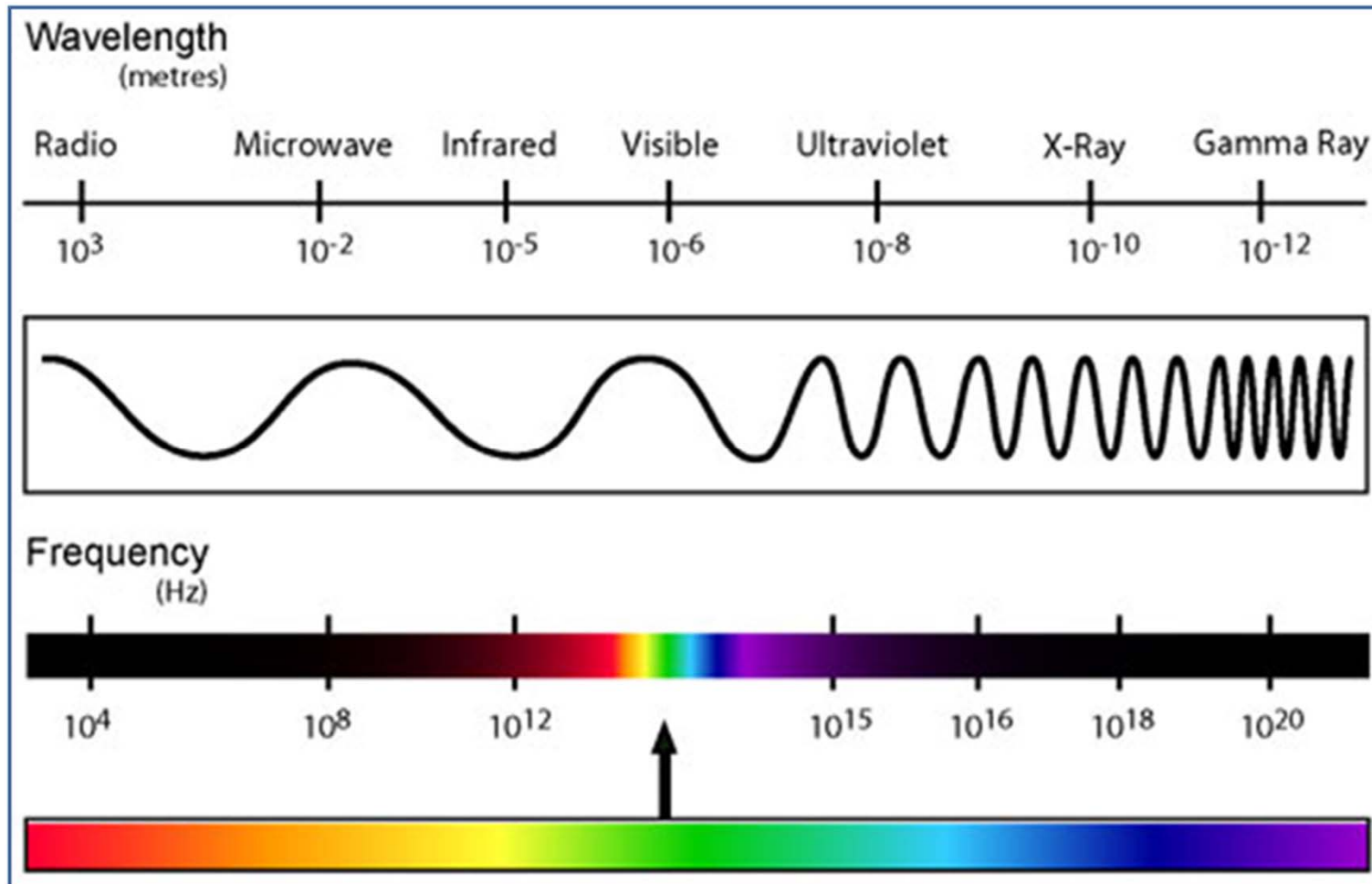
3) Détection Optique

3.1 Matériaux semi-conducteurs et photodétection

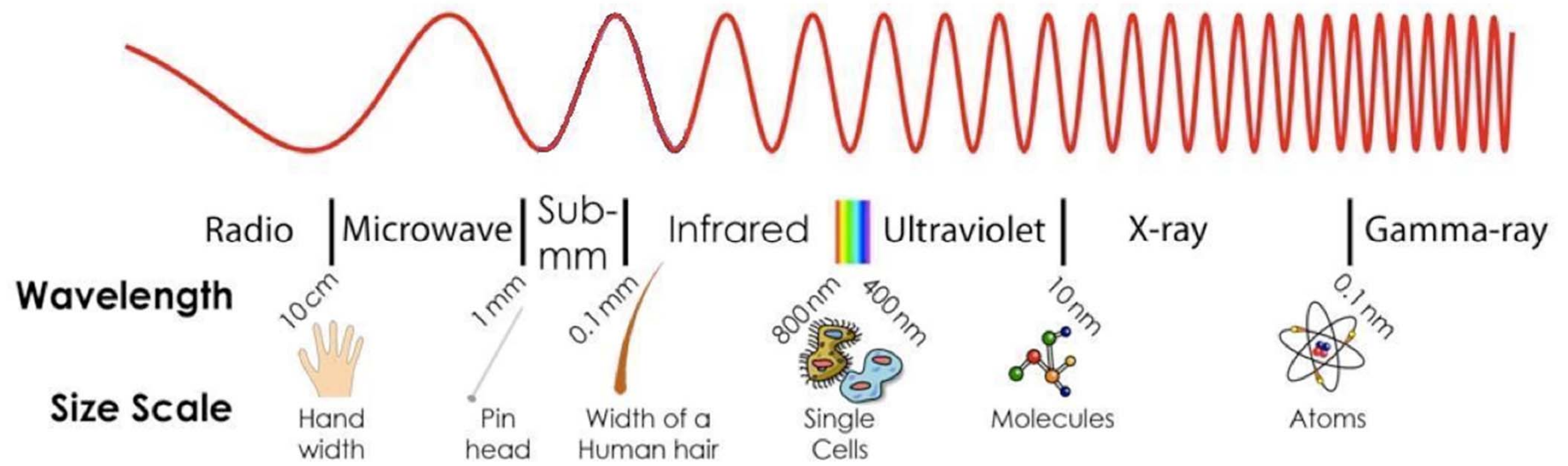
3.2 Instruments de l'OptoElectronique



Spectre Electromagnétique



Spectre Electromagnétique : éléments de comparaison



Imagerie liée au spectre :

a hand holding an iPhone



thermal infrared

reflected infrared

visible

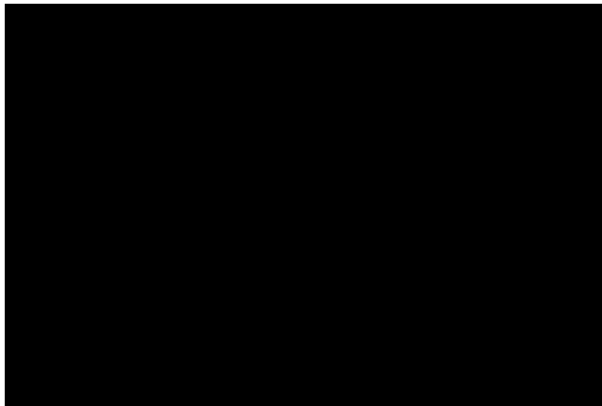
ultraviolet

x-ray

Applications des lasers

Applications industrielles :

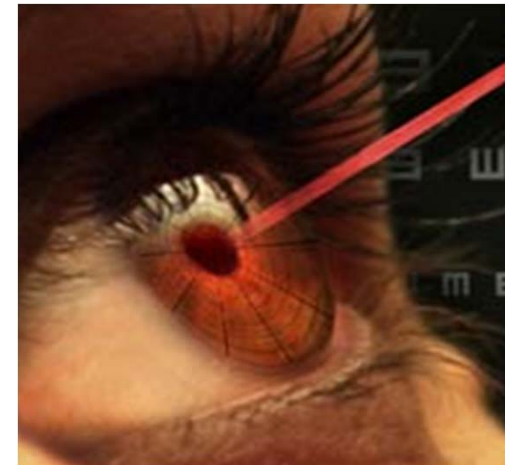
Découpe de matériaux



Nettoyage de surfaces

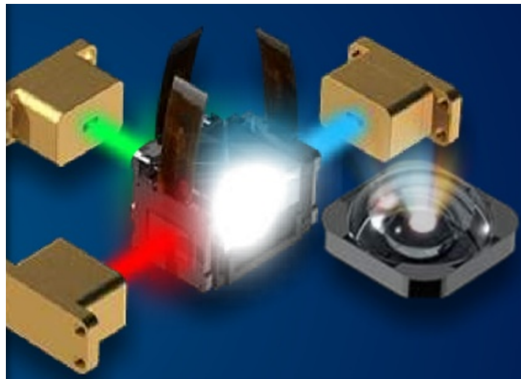


Médecine : Traitement dentaire, Chirurgie, Dermatologie ...



Applications des lasers : grand public

Affichage / projecteur



Lecteur DVD de salon



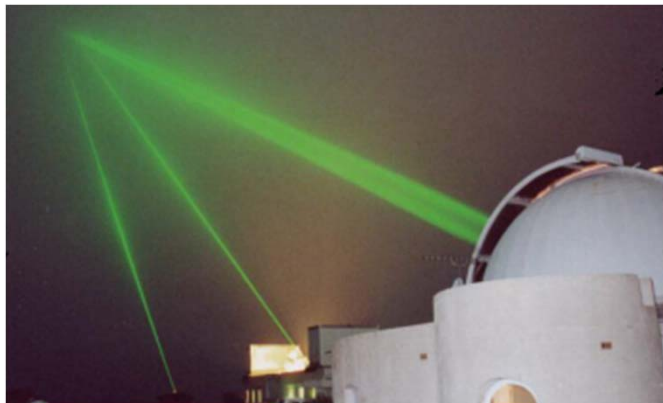
Lecteur code à barres



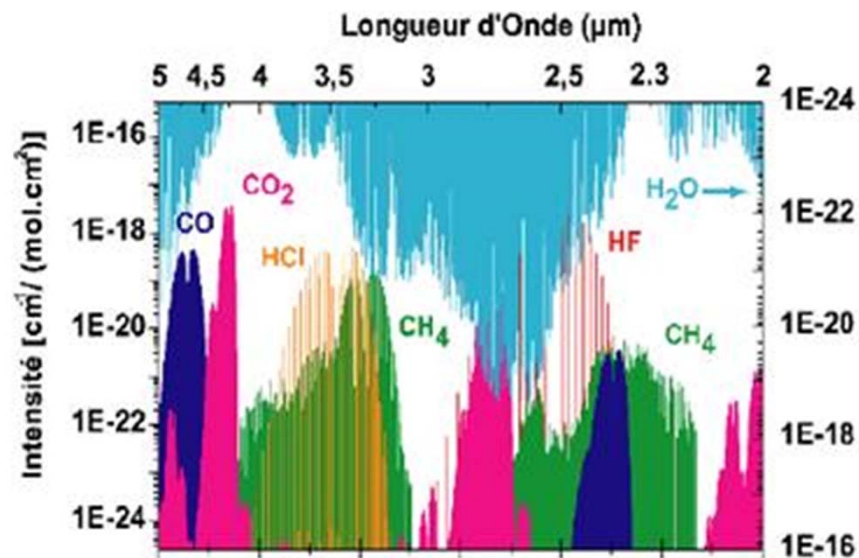
Applications des lasers encore : Métrologie, Spectroscopie ...

Vélocimètre LIDAR

Métrologie : Lune, Satellites ...



Environnement : mesure de traces de gaz

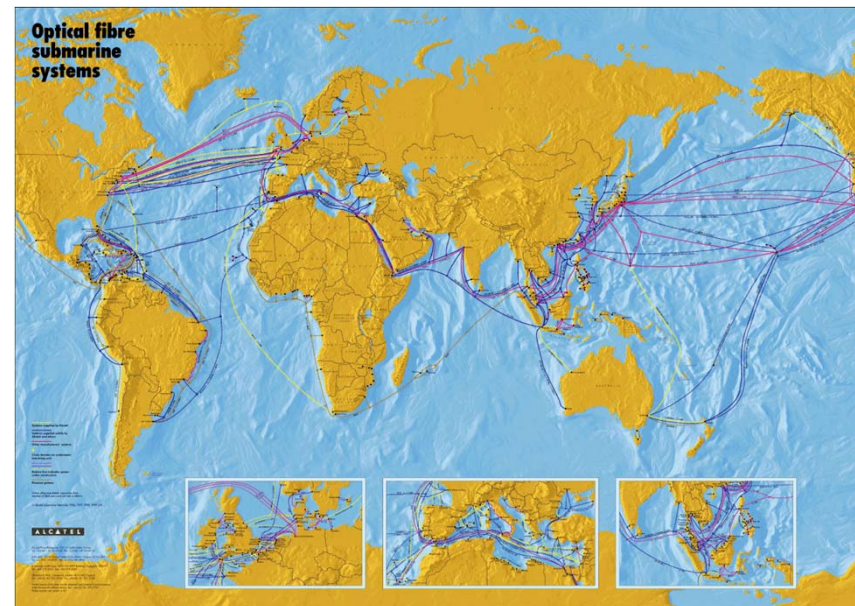


Applications des lasers ... et des fibres ...

Télécommunications spatiales

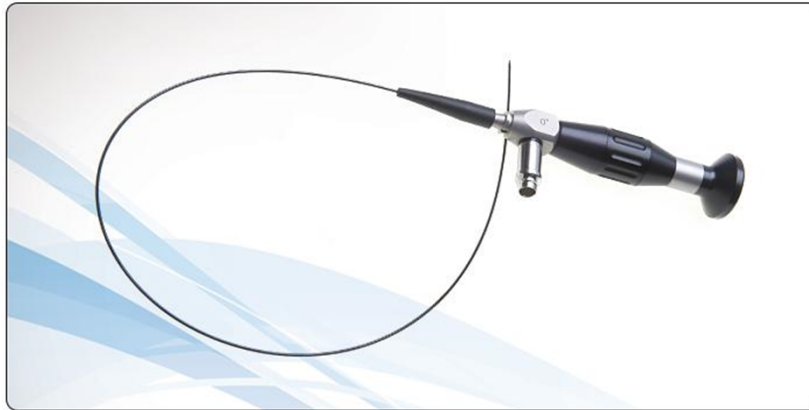


Télécommunications terrestres / sous-marines : fibres passives et fibres actives



Applications des fibres optiques

Endoscopie, gastroscopie



Applications des fibres ...

BTP – Travaux Publics



One FHWA-sponsored advanced research project involved installing fiber-optic sensors along steel rebar in a beam. The sensor systems can be used on "smart" bridges to detect damage and count traffic. Photo: Rola Idriss, New Mexico State University

Capteur de pression, de température ...



Applications des détecteurs optiques ...

Lunettes IR : Visualisation nocturne



Plan du Cours

Introduction : Contexte de l'OptoElectronique

1) Le LASER : 1917 – 1960 – 2010

1.1 Briques de base d'un émetteur laser

1.2 Conditions sur la cavité

1.3 Notions de faisceaux Gaussiens - Propagation - Transformation

2) Les Guides d'onde Optique

2.1 Fibre optique passive

2.2 Réseau de Bragg et applications capteurs

2.3 Notions de fibre optique active

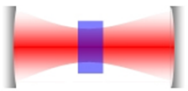

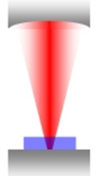
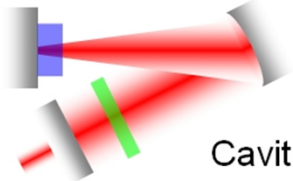
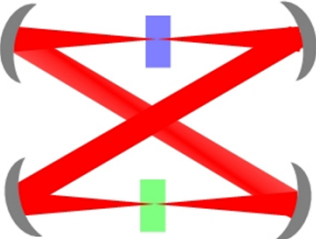
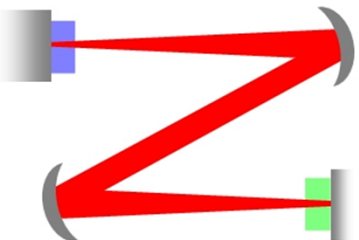
3) Détection Optique

3.1 Matériaux semi-conducteurs et photodétection

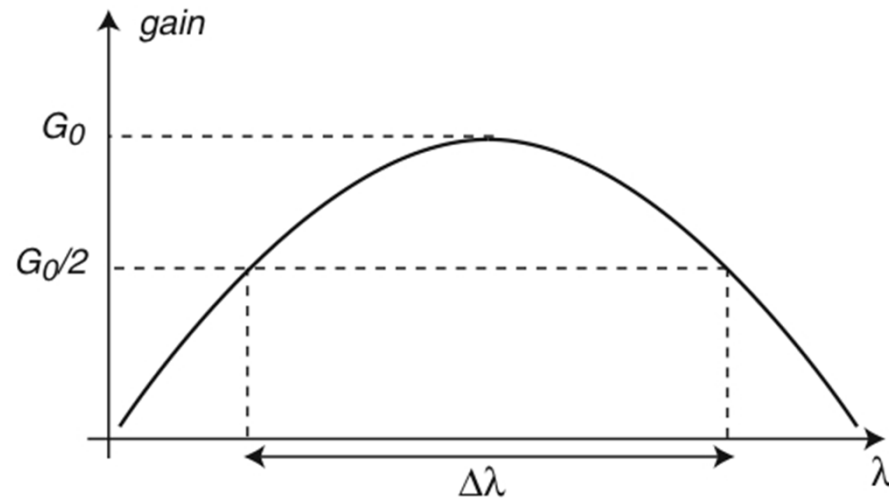
3.2 Instruments de l'OptoElectronique



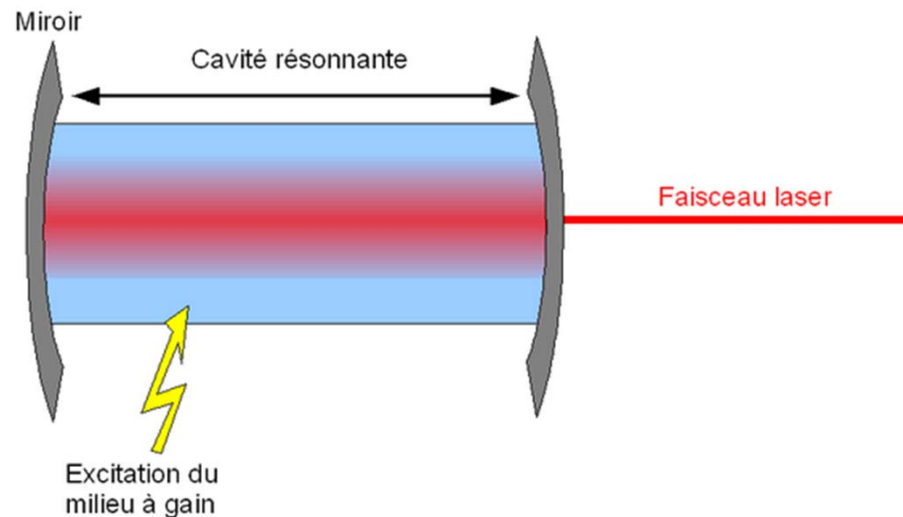
Définition d'une cavité ... divers exemples

<p>Cavités à deux miroirs :</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>a</p>  <p>Confocal</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>b</p>  <p>Microlaser</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>c</p>  <p>Type « VECSEL »</p> </div> </div>
<p>Cavités à trois miroirs :</p>	<div style="text-align: center;">  <p>Cavité « en V »</p> </div>
<p>Cavités à quatre miroirs :</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Cavité « bow-tie » (nœud pap')</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Cavité « en Z »</p> </div> </div>

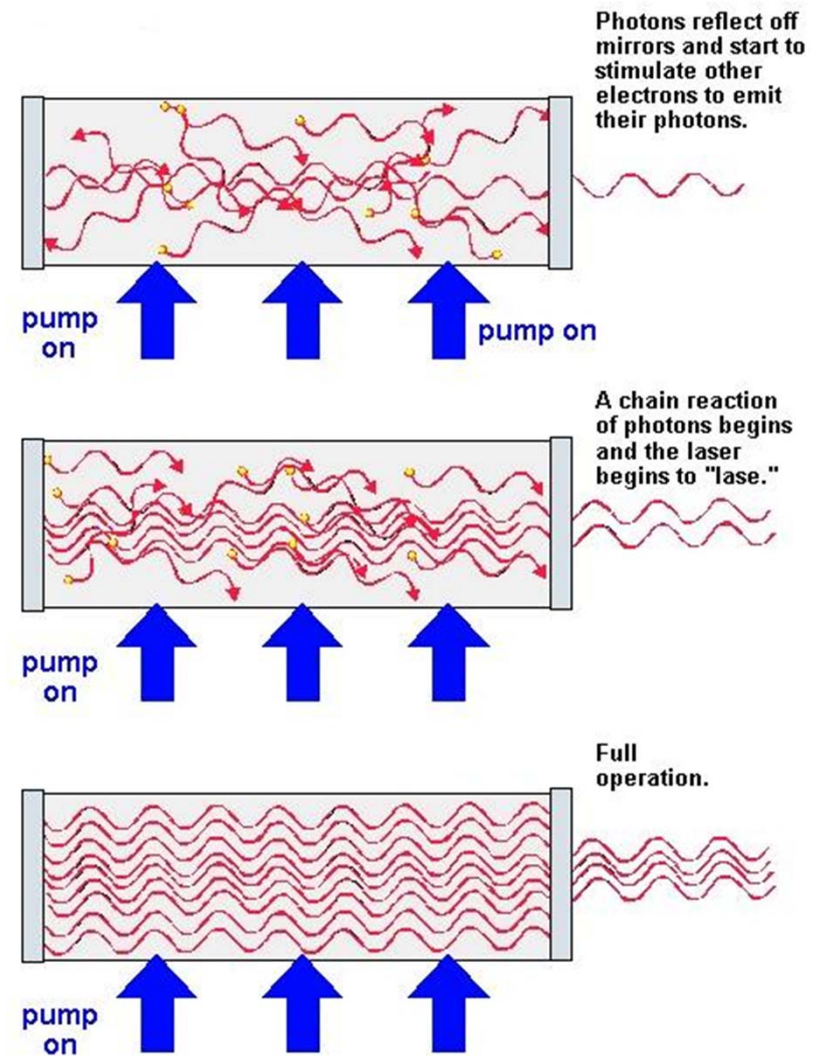
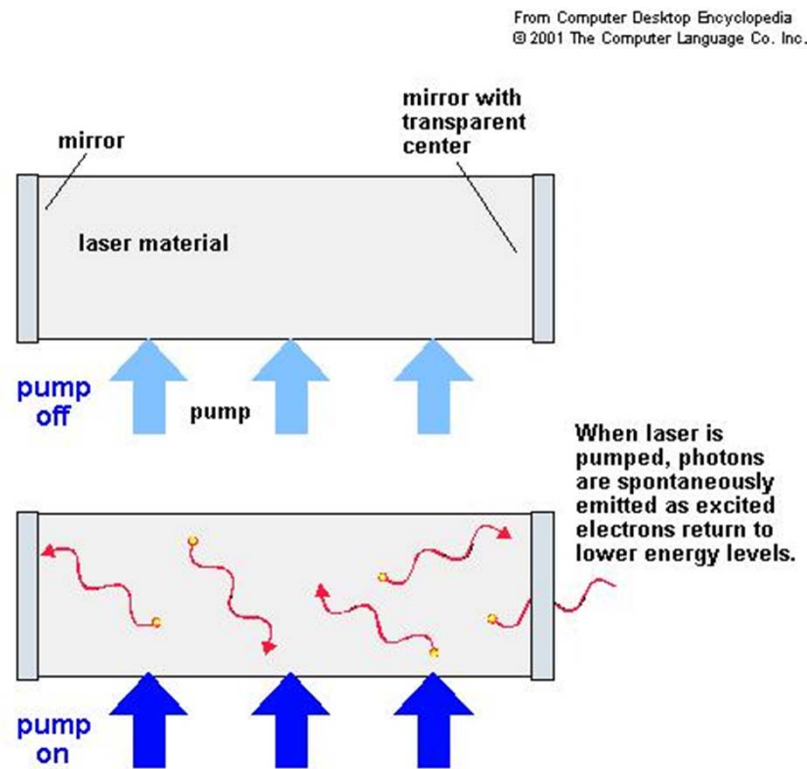
Milieu à gain et cavité



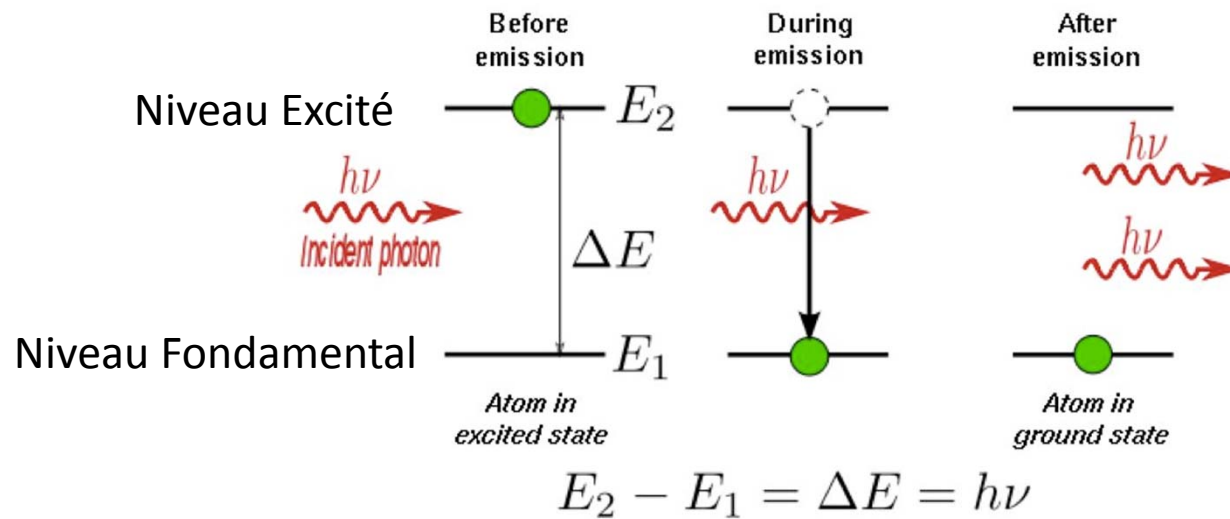
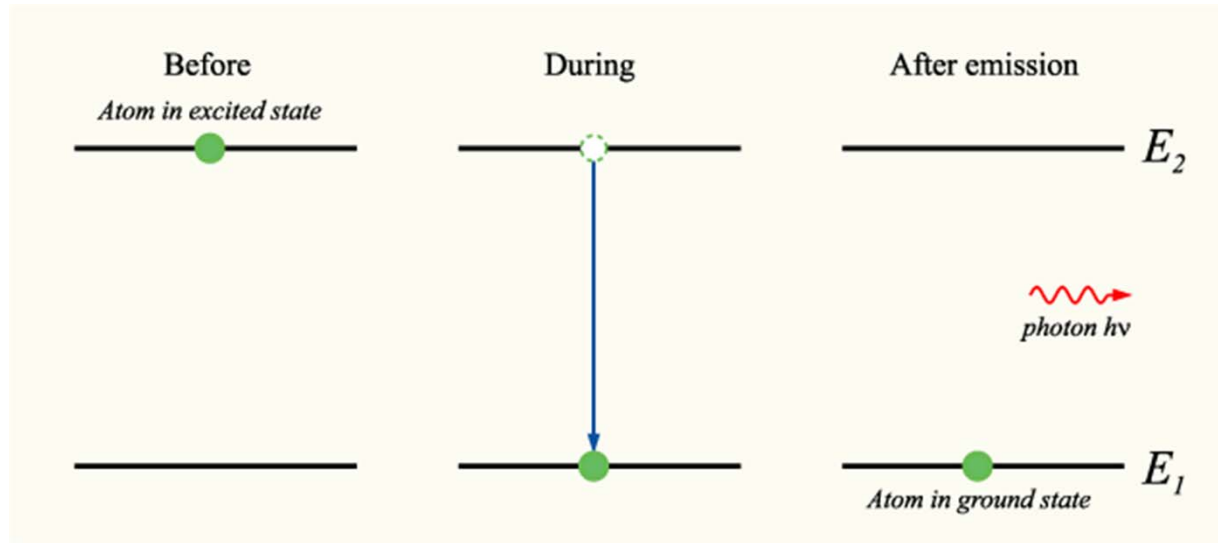
$\Delta\lambda \approx$ qq dizaines de nm
plage dans laquelle le matériau est susceptible d'émettre de la lumière



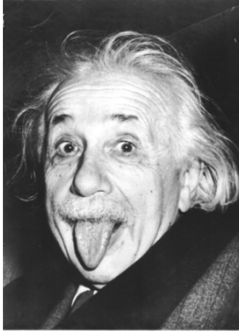
Emission spontanée – émission stimulée



Absorption - Emission spontanée - Emission stimulée



Emission stimulée : quelques dates essentielles



1917 - Allemagne : A. Einstein

Mise en évidence **théorique** du principe d'émission stimulée
Prix Nobel Physique 1921 - Effet photoélectrique

≈ **1950 - FR** : A. Kastler* et J. Brossel

Principe de l'inversion de population des atomes

Pompage optique

*Prix Nobel Physique 1966

1954 - USA : C. Townes

Amplification d'un rayonnement électromagnétique

1^{er} MASER : Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiations

Prix Nobel Physique 1964

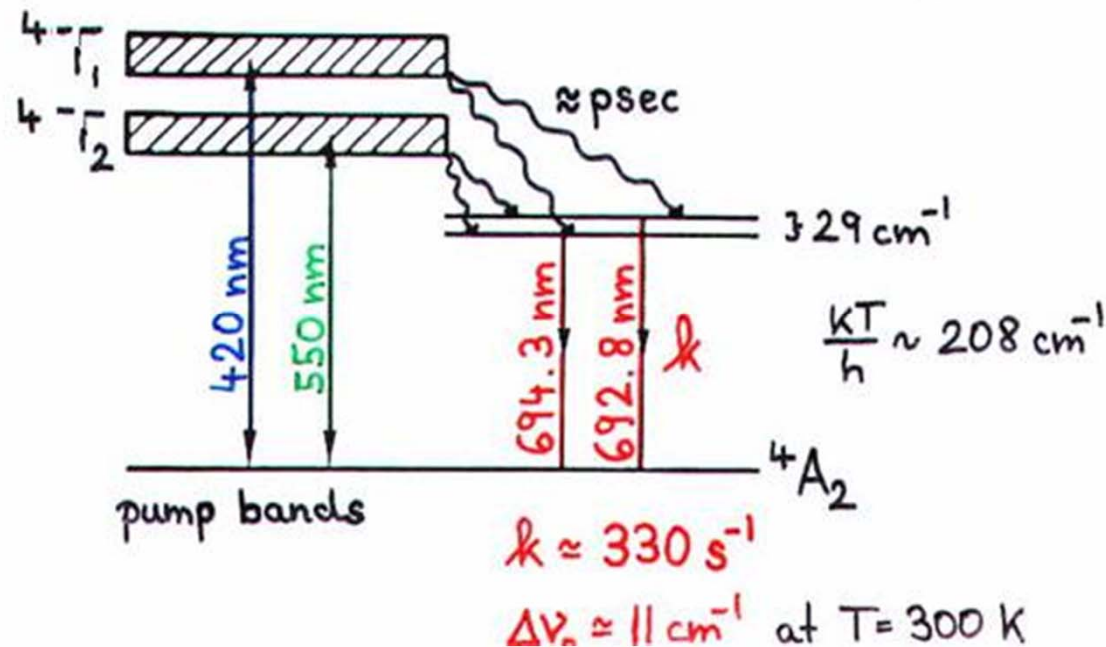
1960... - USA : T. Maiman

1^{er} **LASER** : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations

1^{er} laser solide rubis excité par lampe flash // 1961 : 1^{er} laser à gaz He-Ne

Notions de pompage optique

Pompage à 3 niveaux (en fait ici 2 systèmes à 3 niveaux)

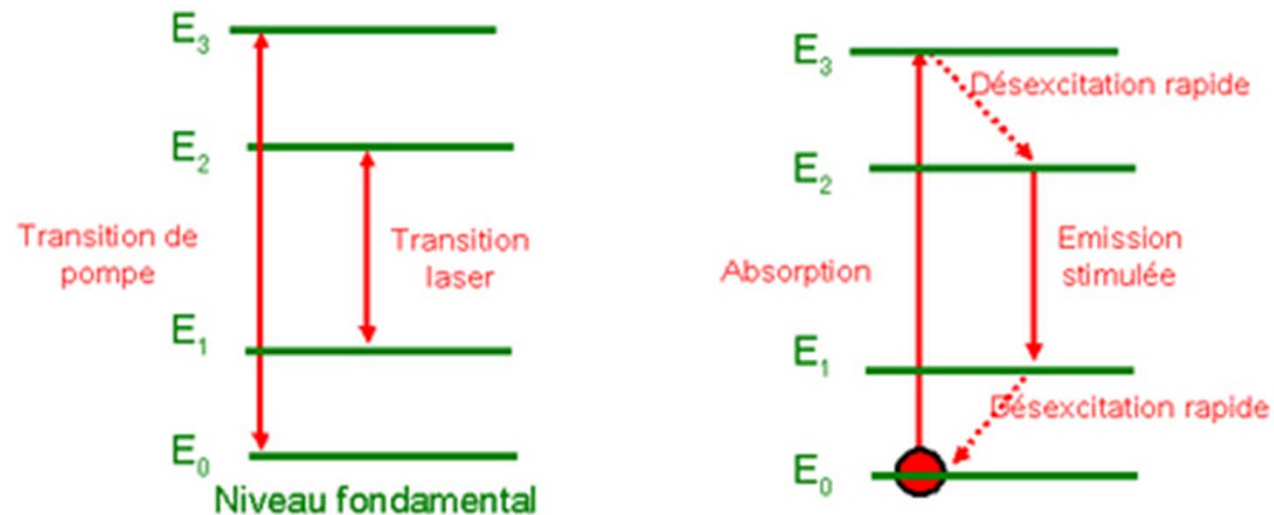


Exemple du laser à rubis - 1960
 Extrait d'un cours UCC Ireland

Remarque : on peut montrer par le calcul que si le milieu actif d'un laser comprenait seulement 2 niveaux, l'inversion de population serait impossible à réaliser par pompage optique

Notions de pompage optique

Pompage à 4 niveaux

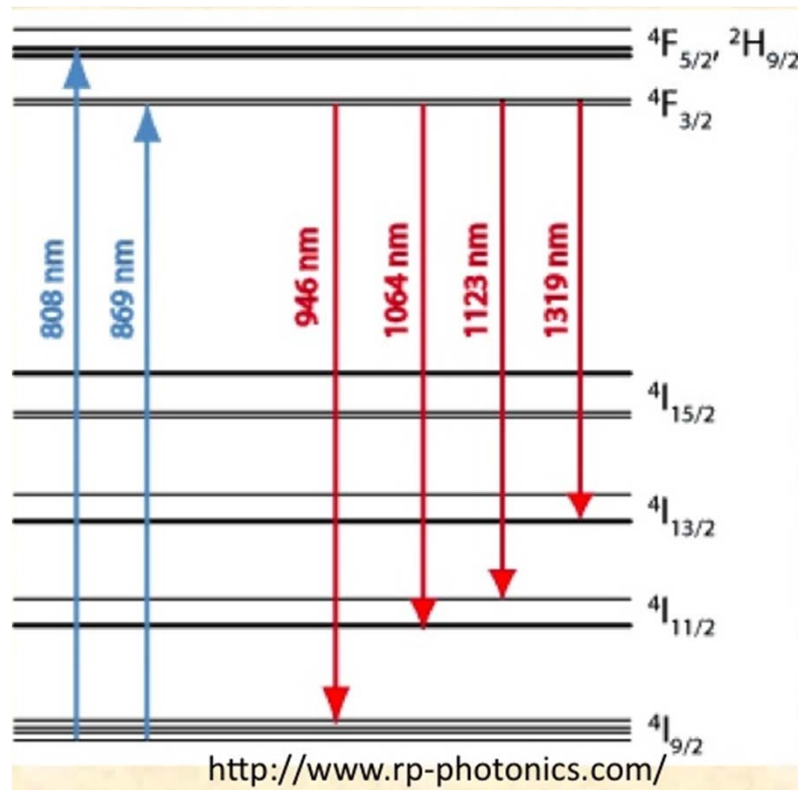


Exemple le plus connu : néodyme YAG $\text{Nd}^{3+} : \text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$

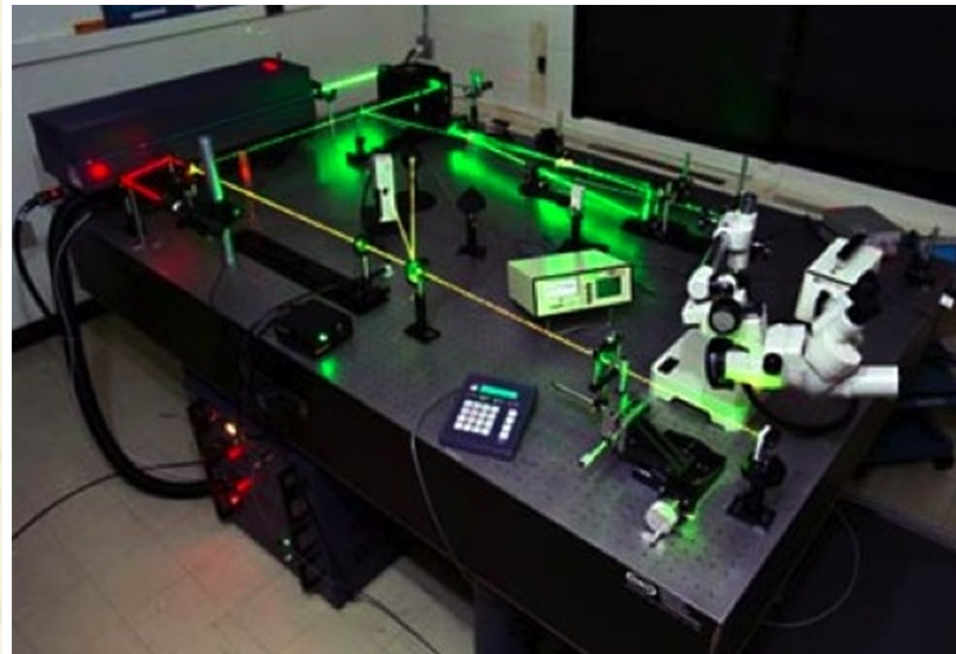
Avantage : le niveau bas E_1 de la transition laser est très faiblement peuplé à l'équilibre thermodynamique.

Notions de pompage optique

Pompage à 4 niveaux

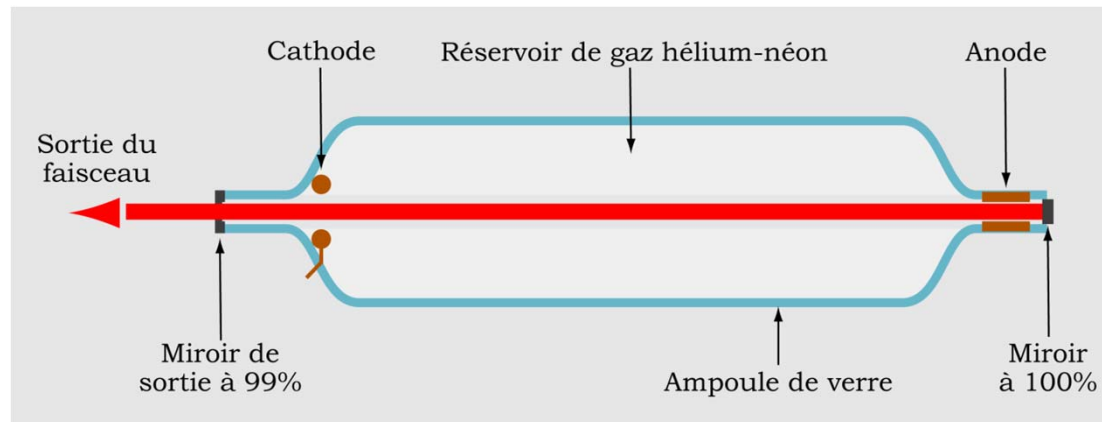
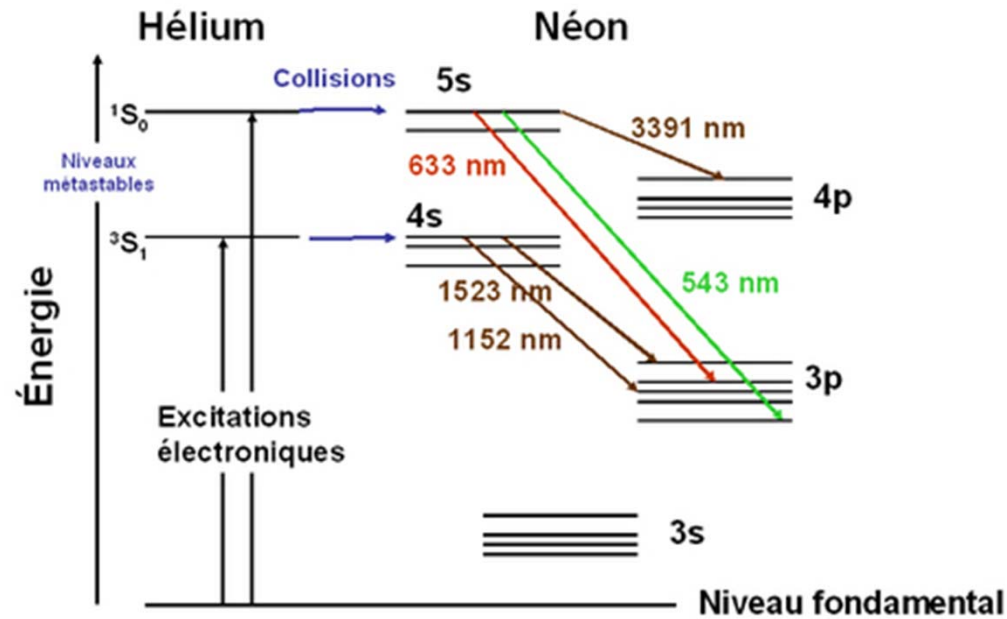


Laser YAG dopé néodyme : YAG Nd³⁺



Notions de pompage électrique

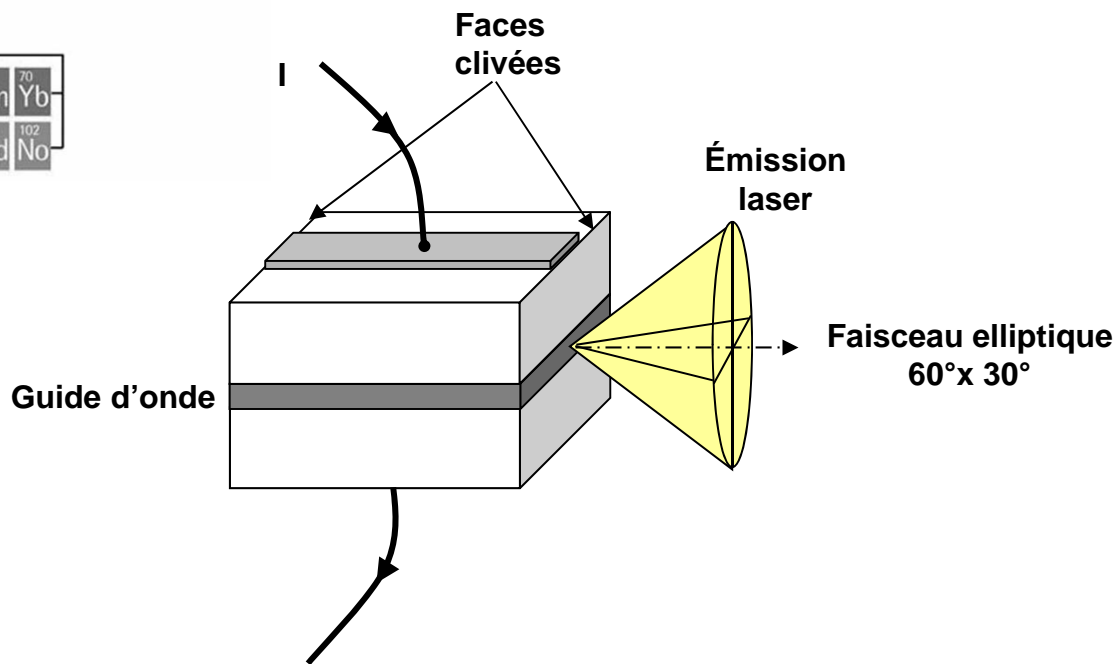
Laser à gaz



Notions de pompage électrique

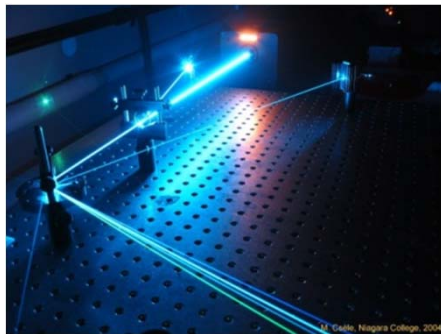
Diode laser à semi-conducteur

1	H									2	He																									
3	Li	4	Be							5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne															
11	Na	12	Mg							13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar															
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr	
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe	
55	Cs	56	Ba	71	Lu	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Pt	78	Au	79	Hg	80		81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn	
87	Fr	88	Ra	103	Lr	104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt																			
57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb									
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No									



Les structures laser

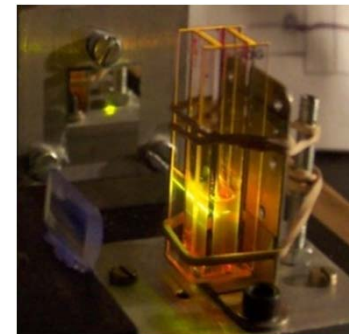
Les lasers à gaz



Argon

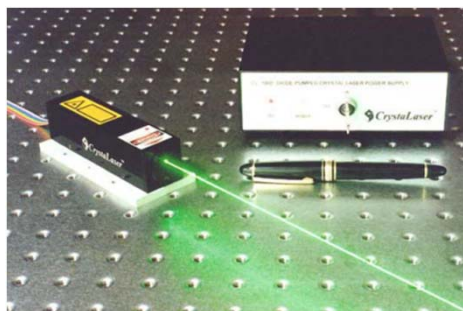
*Pas de flexibilité de λ
Durée de vie/fiabilité
Encombrants*

Les lasers à colorant



rhodamine 6G

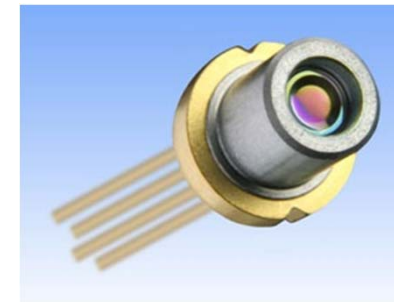
Les lasers solides : cristal ou fibre



YAG

2 Technologies intéressantes

Les lasers à semiconducteur



Diode

Plan du Cours

Introduction : Contexte de l'OptoElectronique

1) Le LASER : 1917 – 1960 – 2010

1.1 Briques de base d'un émetteur laser

1.2 Conditions sur la cavité

1.3 Notions de faisceaux Gaussiens - Propagation - Transformation

2) Les Guides d'onde Optique

2.1 Fibre optique passive

2.2 Réseau de Bragg et applications capteurs

2.3 Notions de fibre optique active

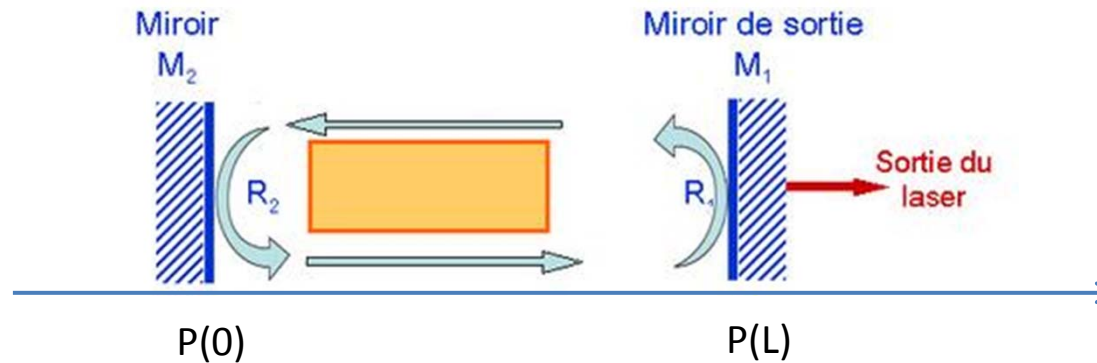
3) Détection Optique

3.1 Matériaux semi-conducteurs et photodétection

3.2 Instruments de l'OptoElectronique



Condition sur le gain



Après 1 aller : $P(L) = P(0) \cdot \exp\{(g - \alpha_i) \cdot L\}$

Après réflexion : $R_1 \cdot P(L)$

Après le retour : $R_1 \cdot P(L) \cdot \exp\{(g - \alpha_i) \cdot L\}$

Après 2^{ème} réflexion : $R_2 \cdot R_1 \cdot P(L) \cdot \exp(g - \alpha_i) \cdot L = R_1 \cdot R_2 \cdot P(0) \cdot \exp 2(g - \alpha_i) \cdot L$

Démarrage effet laser si : $R_1 \cdot R_2 \cdot P(0) \cdot \exp 2(g - \alpha_i) \cdot L \geq P(0)$

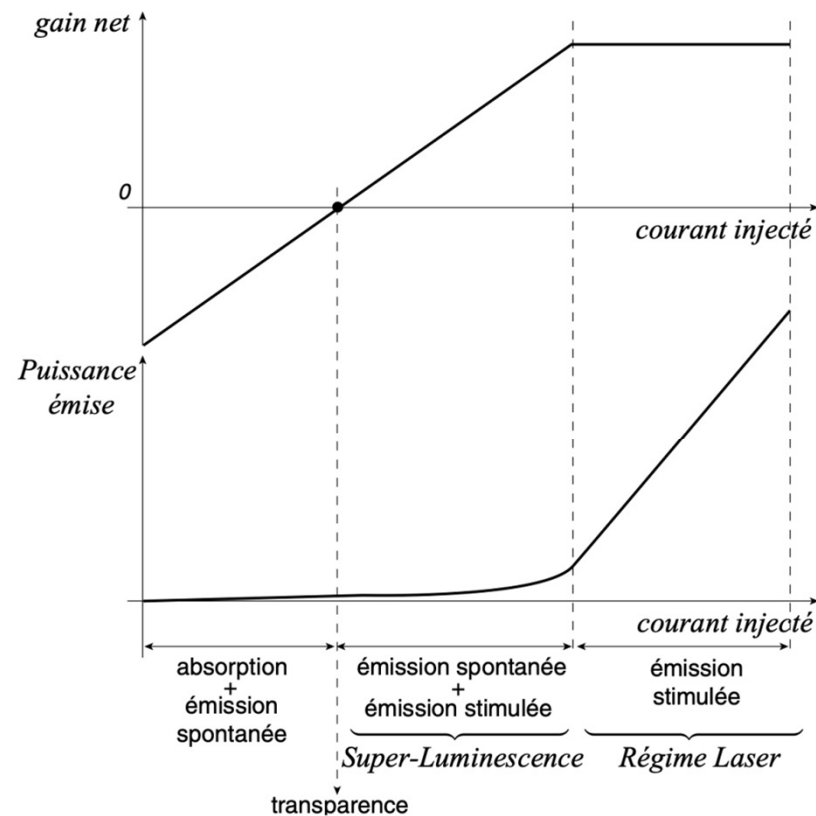
soit : $\exp\{2(g - \alpha_i) \cdot L\} \geq 1/(R_1 \cdot R_2)$ soit encore : $g \geq \alpha_i + \alpha_{\text{miroir}}$ avec $\alpha_{\text{miroir}} = (-1/2L) \cdot \ln(R_1 \cdot R_2)$

On définit alors le gain net : $g_{\text{net}} = g - \alpha_i - \alpha_{\text{miroir}}$

En régime laser établi, ce gain net devient indépendant du pompage
... cf illustration sur planche suivante

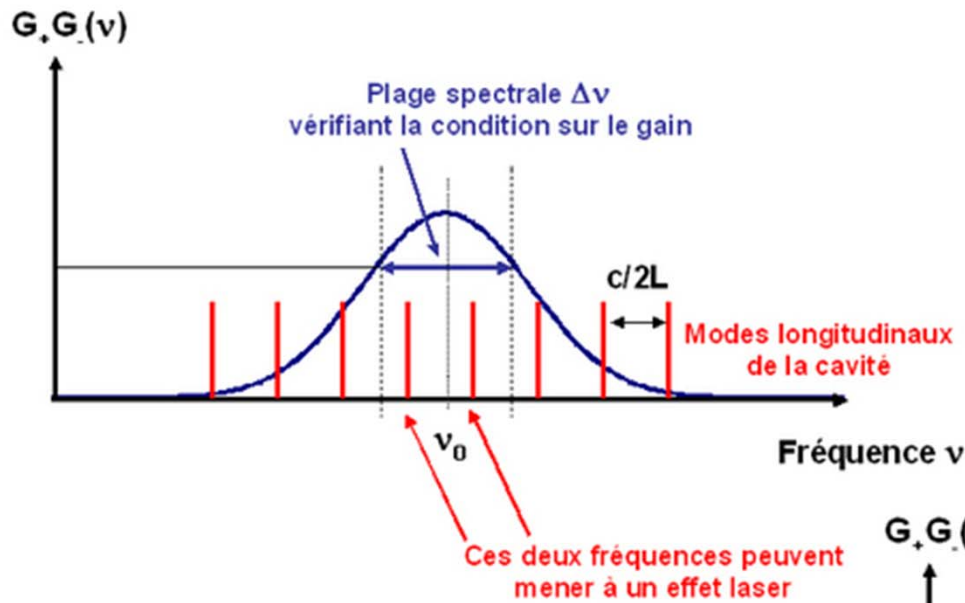
Condition sur le gain

Le gain net représenté ci-dessous en fonction du courant de pompage est la différence entre le gain du milieu amplificateur et les pertes de la cavité, dans laquelle se situe ce milieu à gain

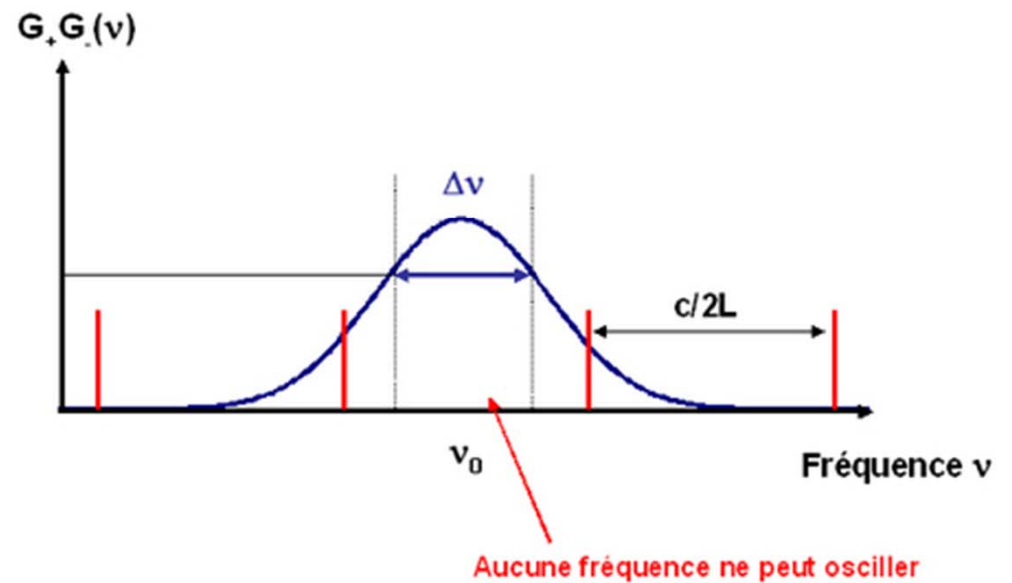


Condition de gain d'un laser Fabry-Perot

Condition sur les fréquences



Traité en TD n°1



Plan du Cours

Introduction : Contexte de l'OptoElectronique

1) Le LASER : 1917 – 1960 – 2010

1.1 Briques de base d'un émetteur laser

1.2 Conditions sur la cavité

1.3 Notions de faisceaux Gaussiens - Propagation - Transformation

2) Les Guides d'onde Optique

2.1 Fibre optique passive

2.2 Réseau de Bragg et applications capteurs

2.3 Notions de fibre optique active

3) Détection Optique

3.1 Matériaux semi-conducteurs et photodétection

3.2 Instruments de l'OptoElectronique



Rappels optique ondulatoire : ν , λ

Traversée d'un matériau d'indice de réfraction n :

ν paramètre temporel donc inchangé ; par contre λ période spatiale modifiée

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} \quad \lambda_{matériau} = \frac{v}{\nu} = \frac{c}{n \nu} = \frac{c}{\nu n} = \frac{\lambda_0}{n}$$

l'onde avance moins vite dans le matériau que dans l'air

→ pendant une période temporelle, la distance parcourue est donc + petite

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{v} \nu = \frac{\omega}{v} \quad \begin{array}{l} v : \text{vitesse de l'onde} \\ \nu : \text{fréquence de l'onde} \end{array}$$

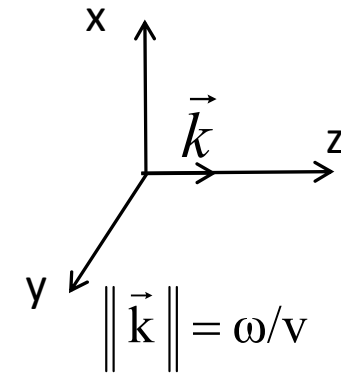
Rappels optique ondulatoire

Equation de d'Alembert (France, 18^{ème} S)
équation des cordes vibrantes → 3D

$$\vec{\Delta} \vec{E} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

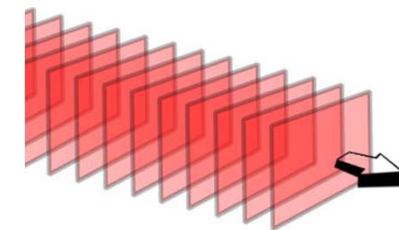
Equation de propagation d'Helmholtz (Allemagne, 19^{ème} S)

$$\Delta E(x, y, z) + k^2 E(x, y, z) = 0$$



➤ Onde plane

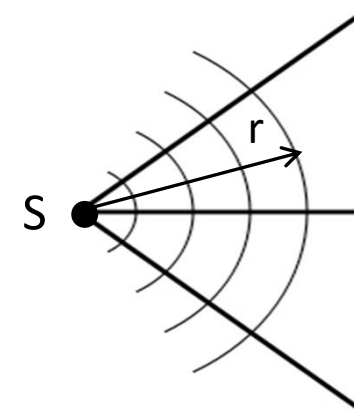
$$E(x, y, z) = \varepsilon \exp(-ikz)$$



➤ Onde sphérique

$$E(x, y, z) = \frac{\varepsilon}{r} \exp(-ikr)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$



➔ Notions de chemin optique et de surface équiphasse

Solutions de l'équation de propagation

➤ Onde sphérique Gaussienne

$$E(x, y, z) = \varepsilon(x, y, z) \cdot \exp(-ikz)$$

$\varepsilon(x, y, z)$ fonction d'essai basée sur des observations empiriques :

$$\varepsilon(x, y, z) = f \left\{ r, A(z), R(z), w(z) \right\}$$

$$R(z) = z \left\{ 1 + \left(\frac{z_R}{z} \right)^2 \right\}$$

Rayon de courbure

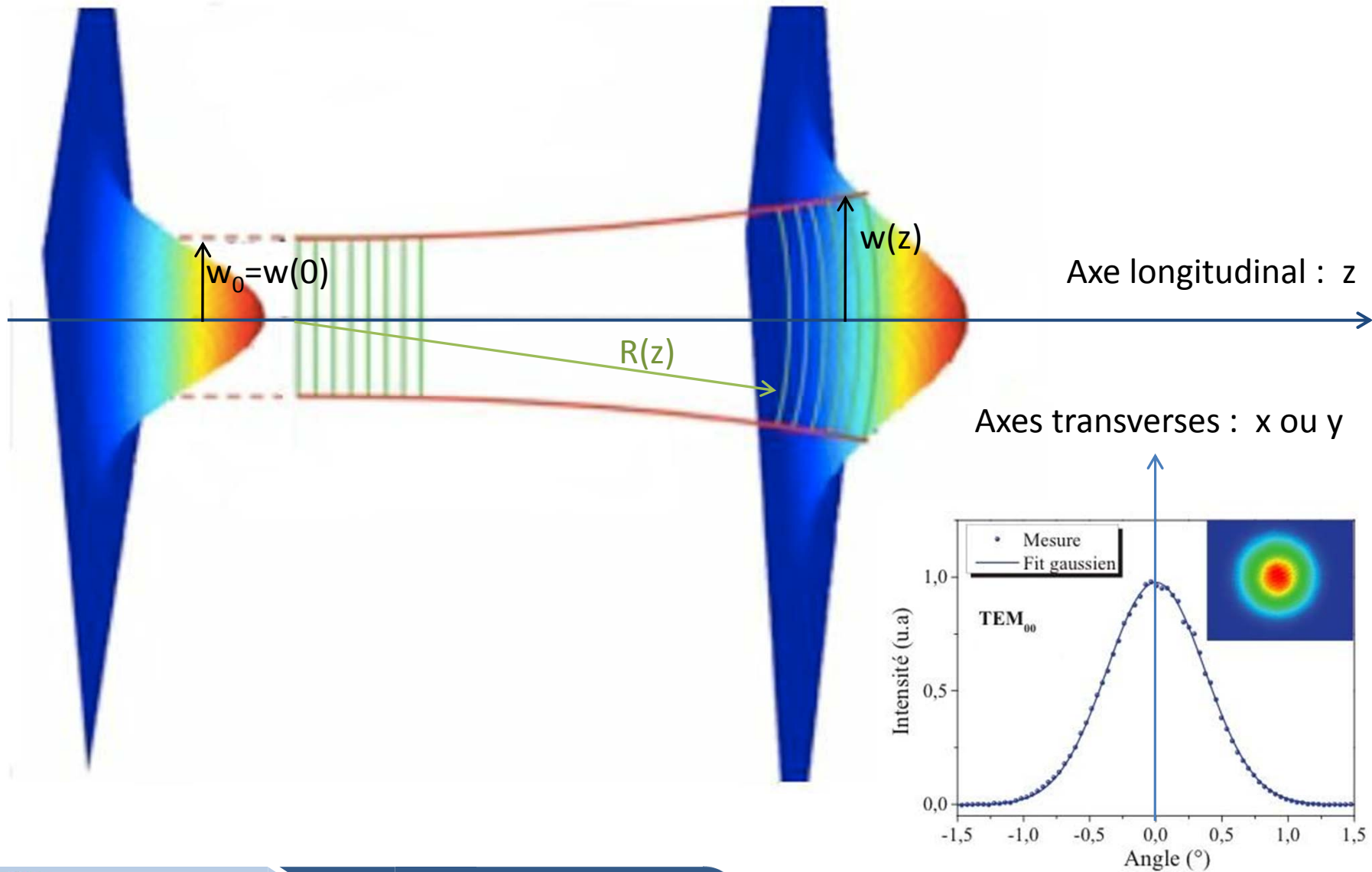
$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2}$$

Waist

mesuré @1/e (champ) ou 1/e² (intensité)

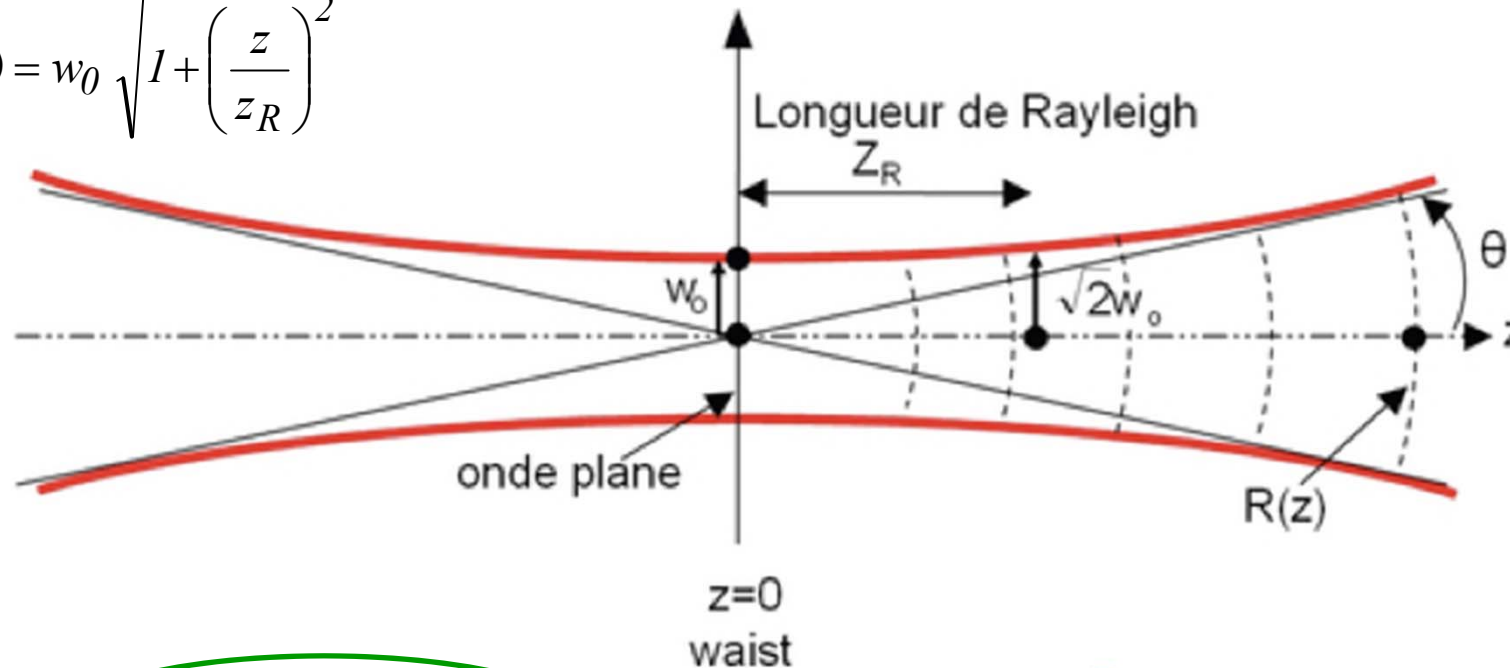
z_R délimite 2 zones physiquement bien distinctes : « champ proche » et « champ lointain »

Onde sphérique Gaussienne : propagation



Propriétés d'un faisceau Gaussien

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



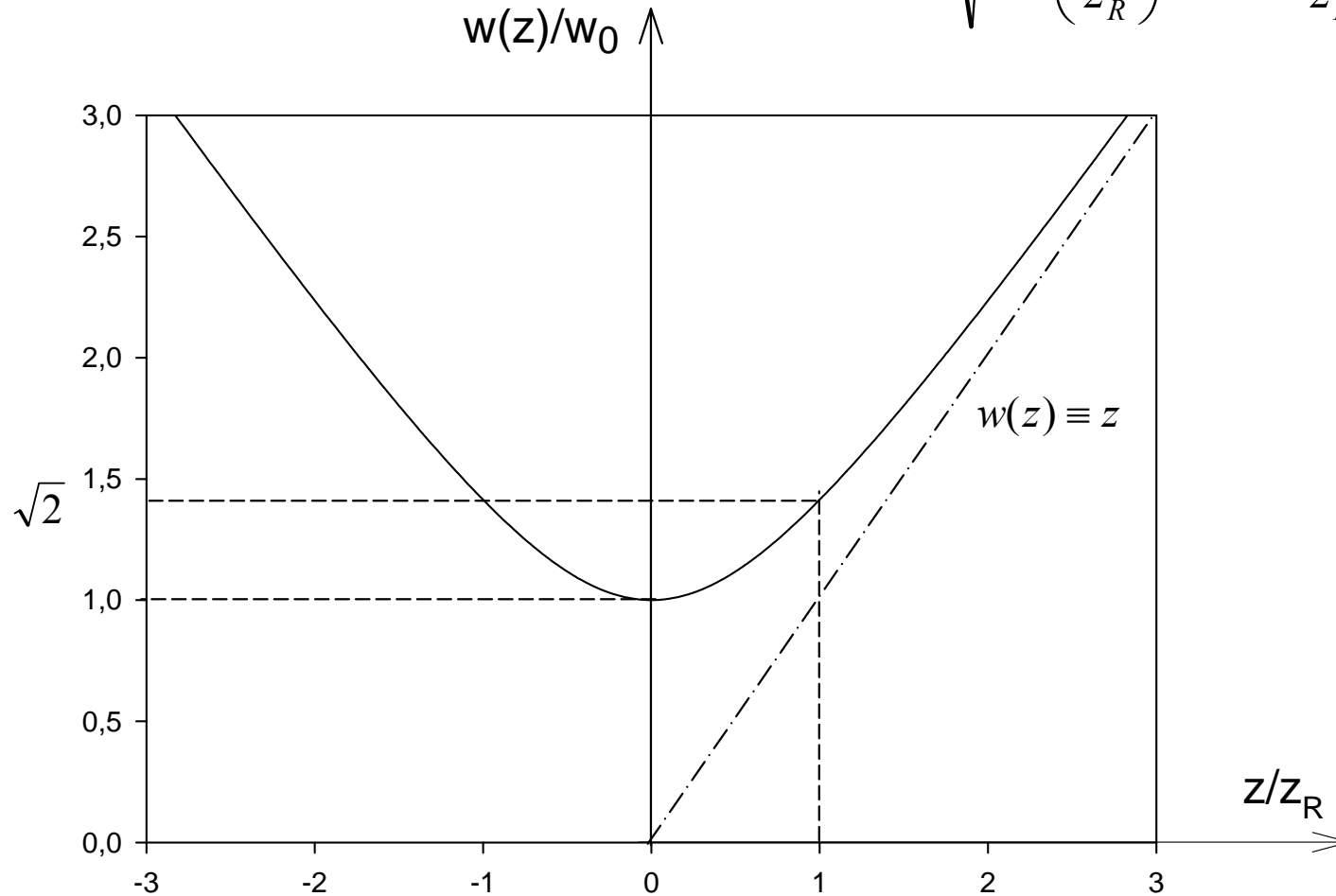
$$w(z) = w_0 \text{ quand } z = 0$$

$$w(z) \approx w_0 \frac{z}{z_R} \text{ quand } z \rightarrow \infty$$

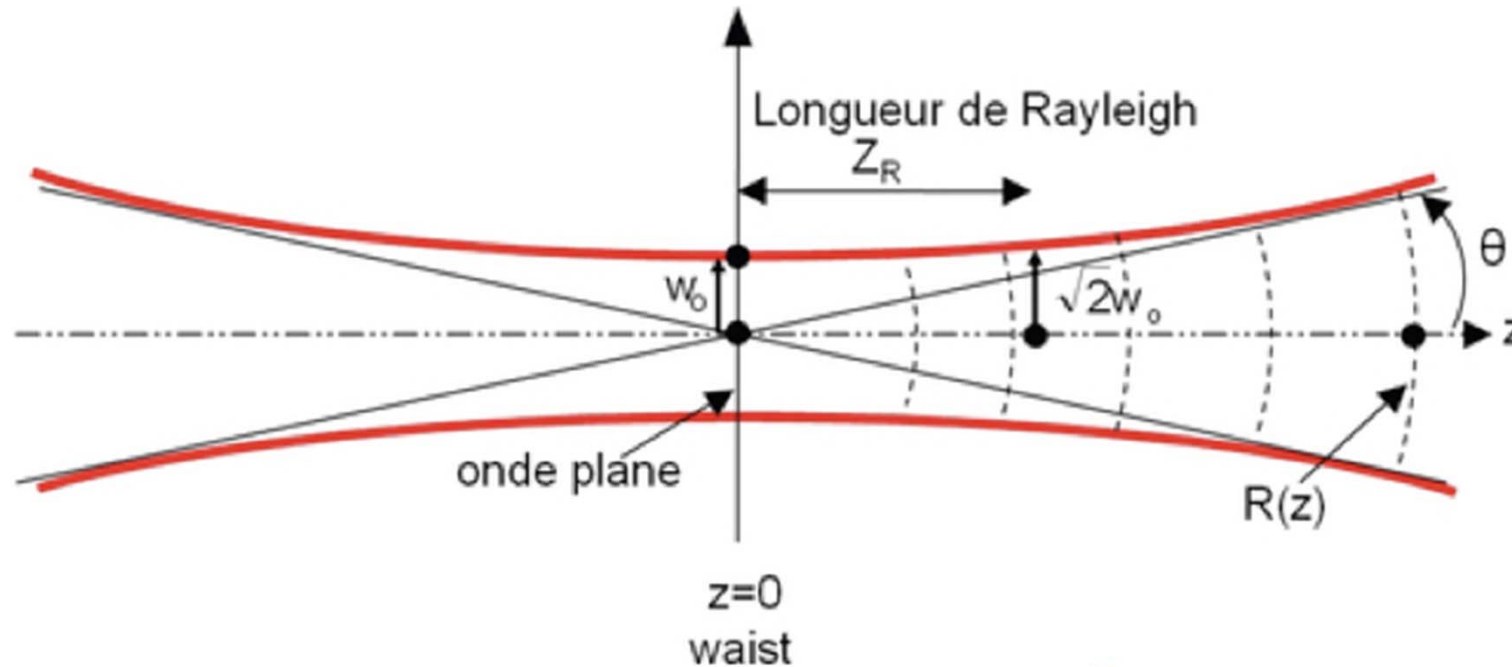
$$\text{Ainsi : } \operatorname{tg} \theta = \frac{w}{z} \approx \frac{w_0}{z_R} = w_0 \frac{\lambda}{\pi w_0^2} = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Waist fonction de z

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \approx w_0 \frac{z}{z_R} \text{ quand } z \rightarrow \infty$$

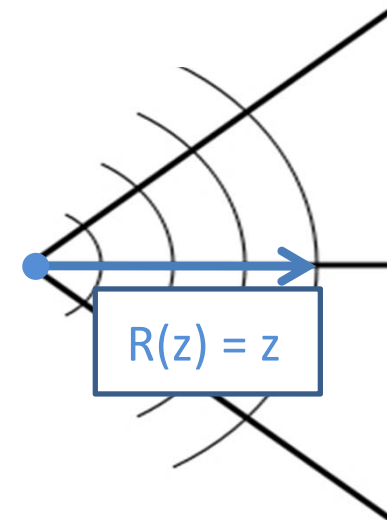


Propriétés d'un faisceau Gaussien

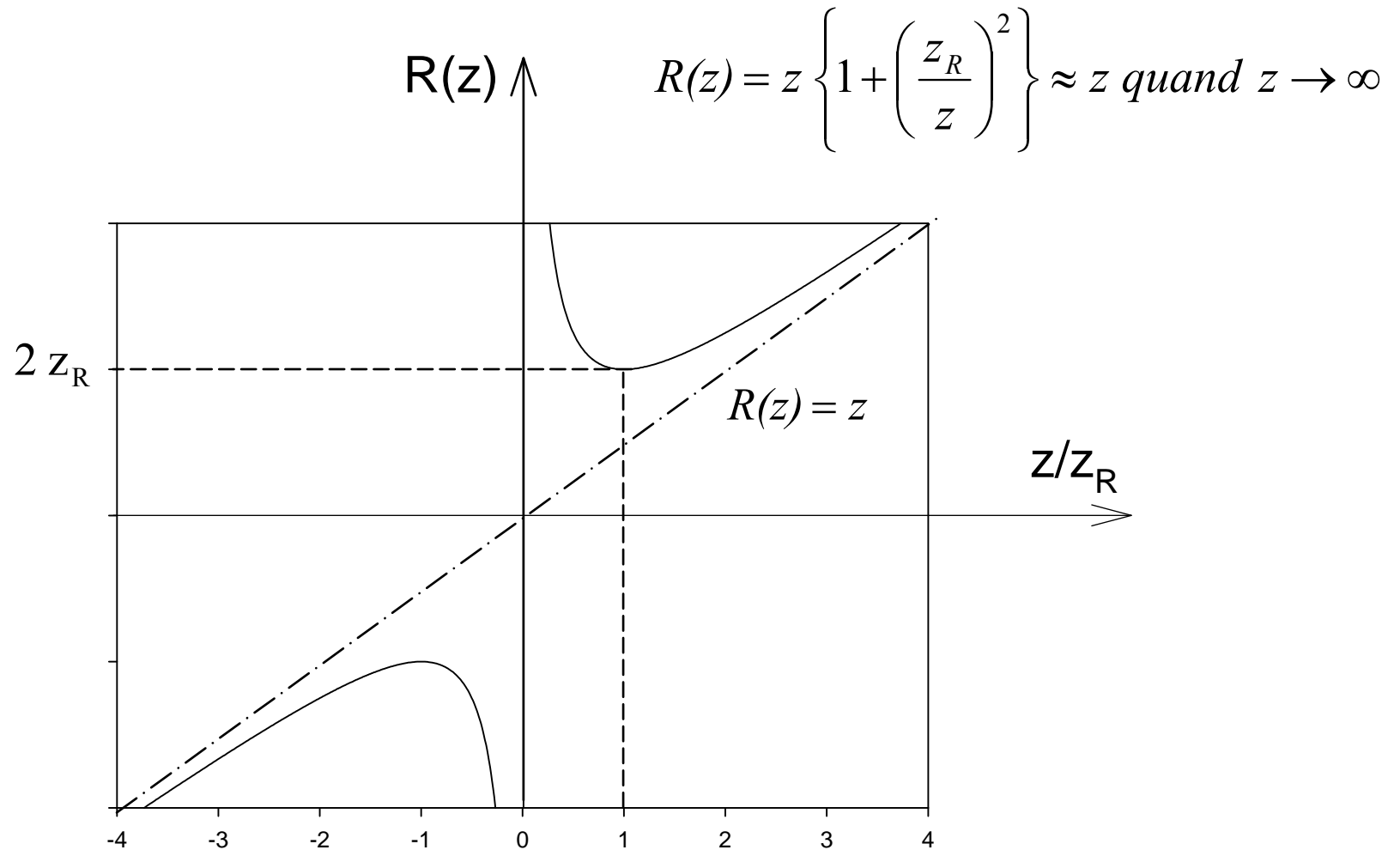


$$R(z) = z \left\{ 1 + \left(\frac{z_R}{z} \right)^2 \right\} = z + \frac{z_R^2}{z} \rightarrow \infty \text{ quand } z \rightarrow 0$$

$$R(z) \approx z \text{ quand } z \rightarrow \infty \Rightarrow \text{onde sphérique}$$

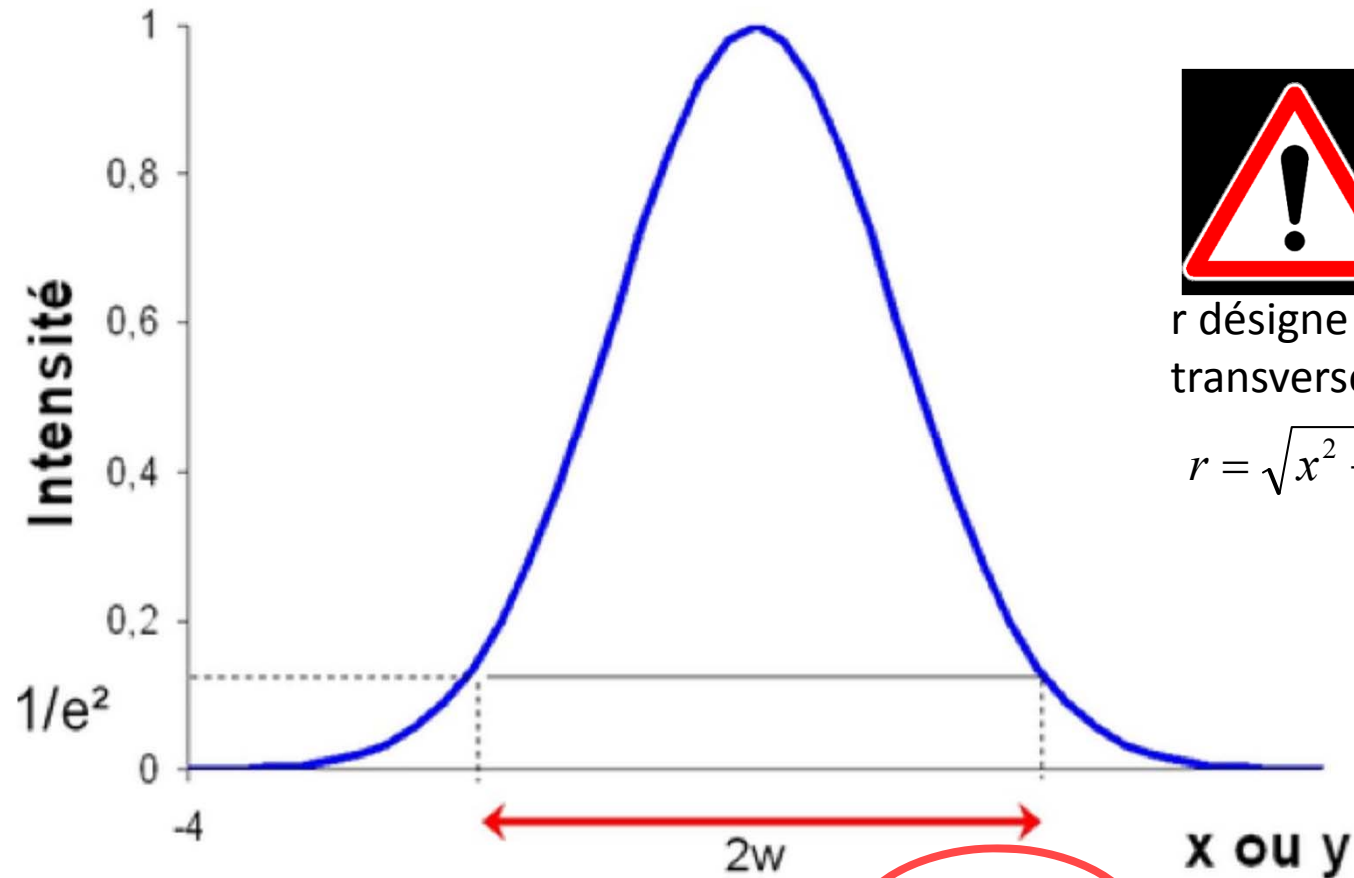


Rayon de courbure fonction de z



Propriétés d'un faisceau Gaussien

$$I(r, z) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2x^2}{4\sigma^2}\right) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$



r désigne ici la coordonnée transverse radiale :

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$w = 2\sigma$$

Propriétés d'un faisceau Gaussien : extraits MathCad

$$G := \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\sigma}^{\sigma} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx$$

G = 0.683

x := sigma

$$A := e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

A = 0.607

$$G := \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-2 \cdot \sigma}^{2 \cdot \sigma} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx$$

G = 0.954

x := 2 · sigma

$$A := e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

A = 0.135

$$G := \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-3 \cdot \sigma}^{3 \cdot \sigma} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx$$

G = 0.997

x := 3 · sigma

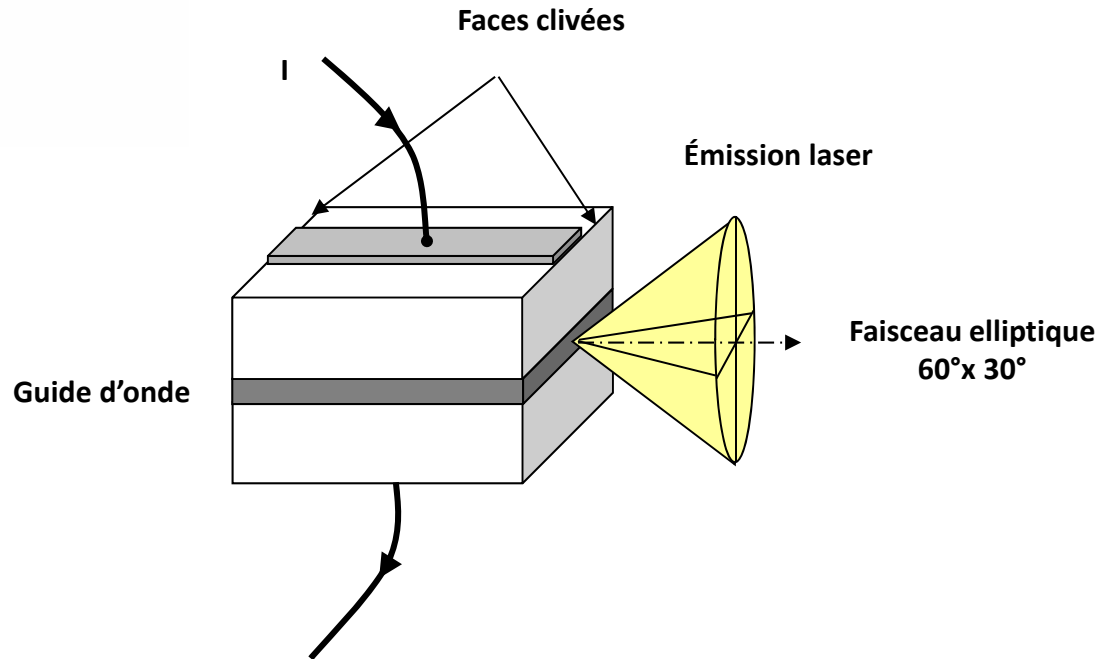
$$A := e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

A = 0.011

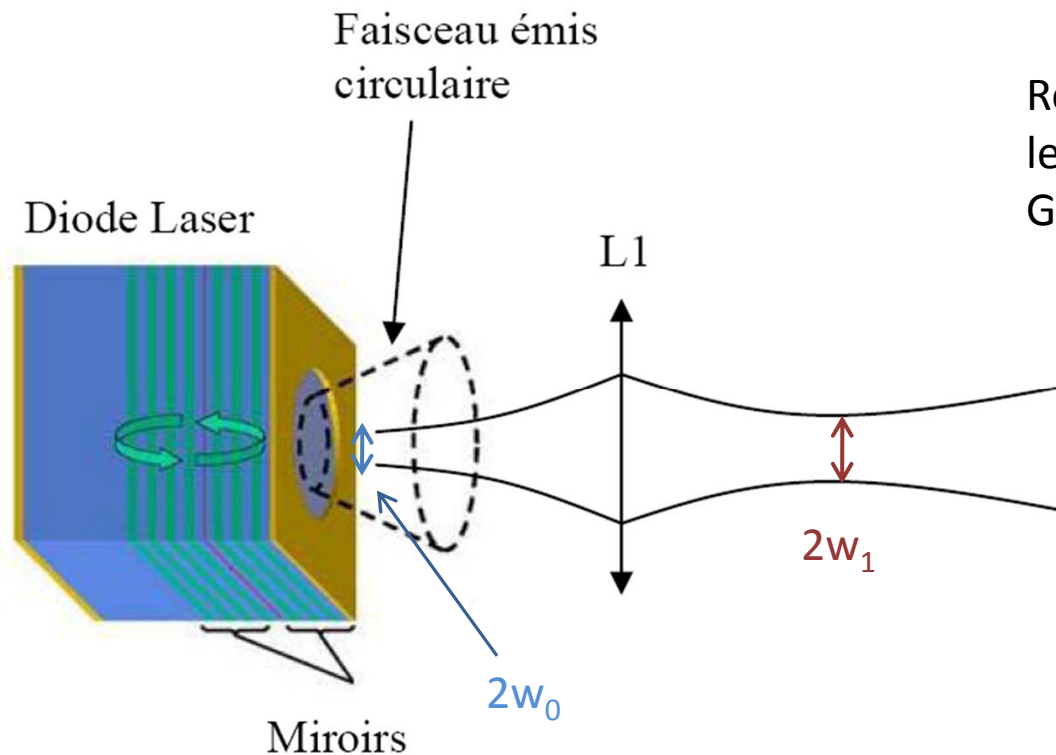
Rappel : diffraction en sortie de cavité, fonction de la géométrie du guide d'onde

A periodic table of elements where each element's cell is color-coded. The colors include black, blue, red, orange, green, purple, and grey. The elements are arranged in their standard periodic layout, including the lanthanide and actinide series at the bottom.

Diode laser à semi-conducteur



Collimation d'un faisceau Gaussien

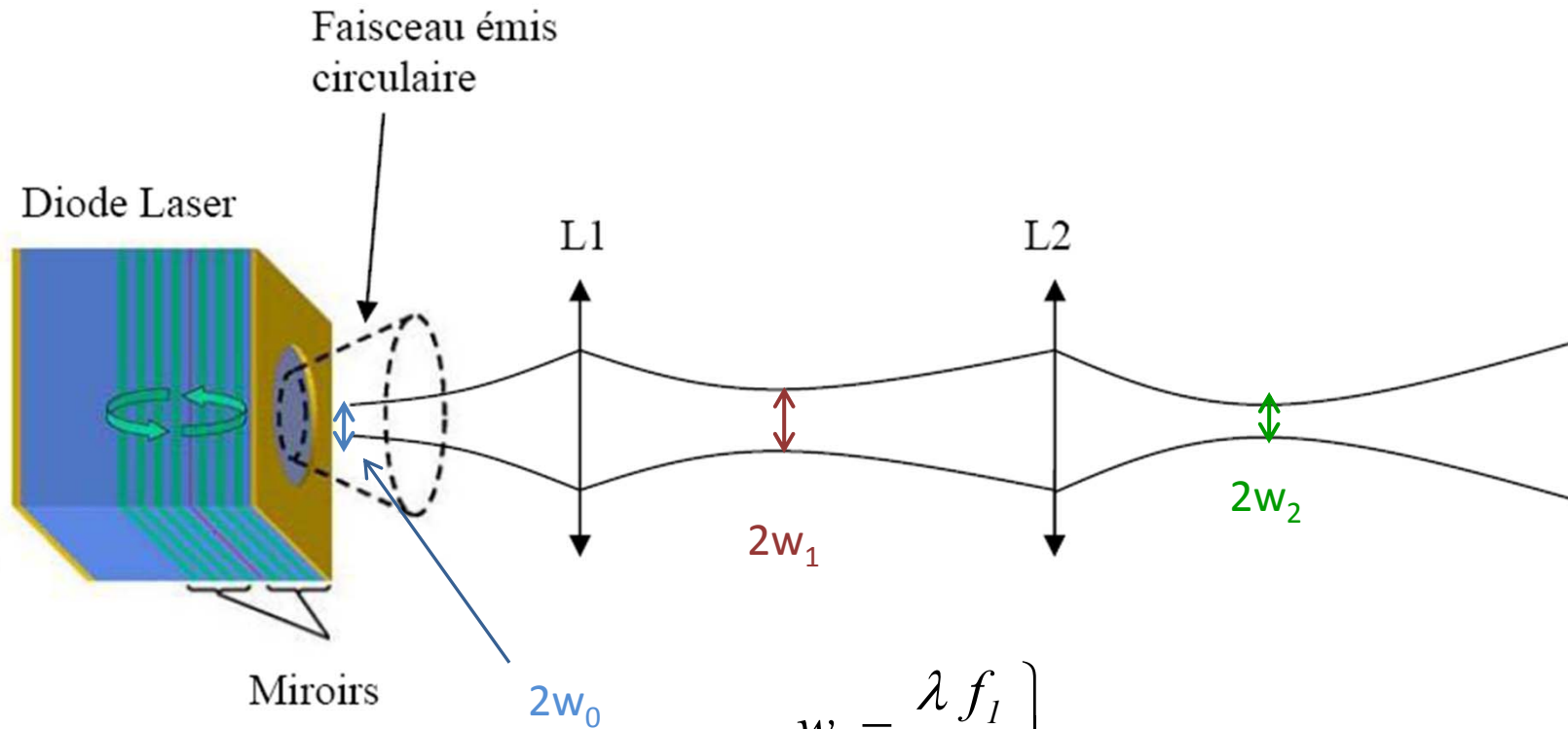


Relation de conjugaison des lentilles minces pour l'optique Gaussienne :

$$\Downarrow$$

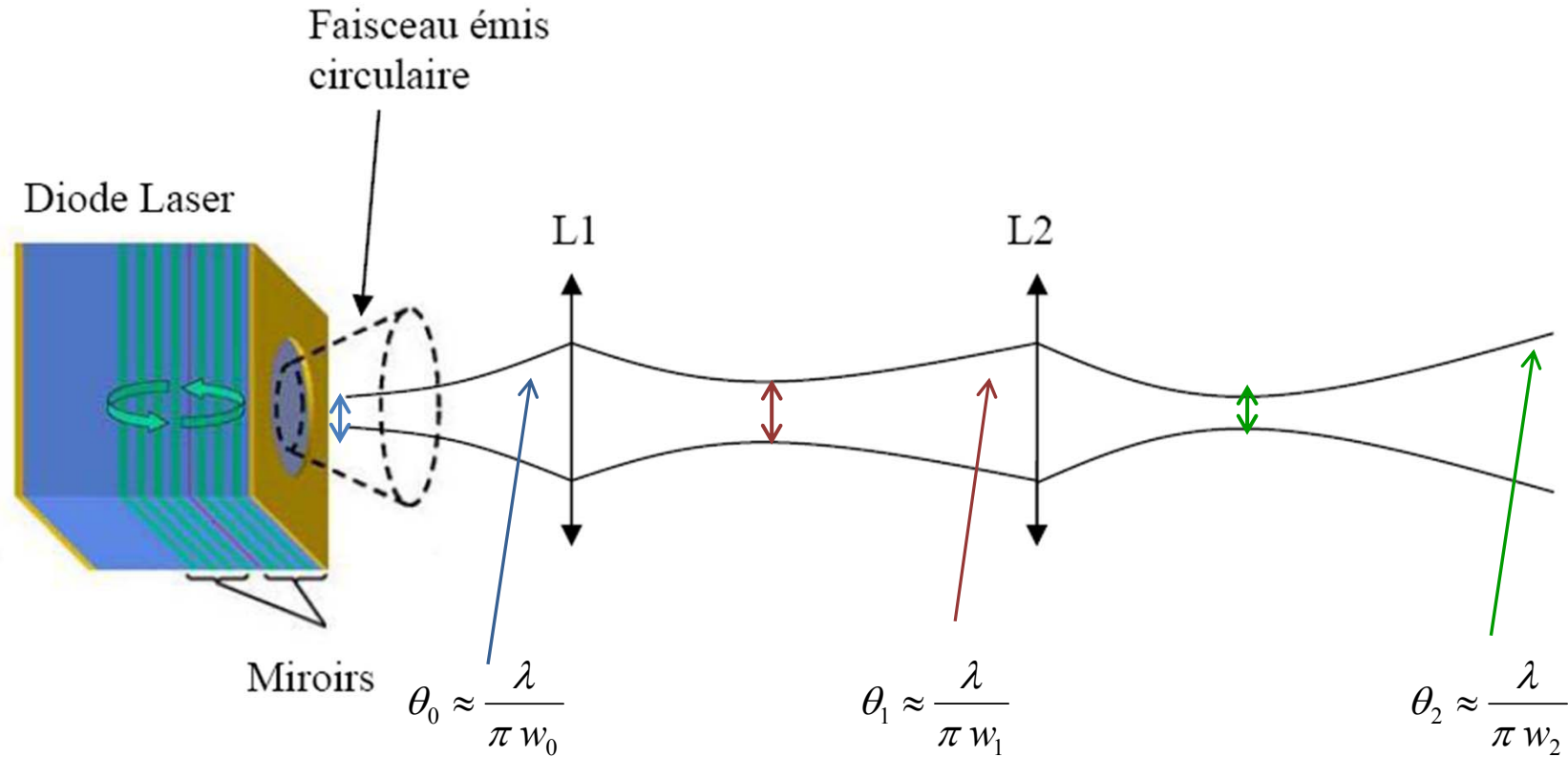
$$w_1 = \frac{\lambda f}{\pi w_0}$$

Focalisation d'un faisceau Gaussien



$$\left. \begin{aligned} w_1 &= \frac{\lambda f_1}{\pi w_0} \\ w_2 &= \frac{\lambda f_2}{\pi w_1} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{w_2}{w_0} = \frac{f_2}{f_1}$$

Invariant optique



$$\Rightarrow \text{INVARIANT OPTIQUE} : \theta_i w_i = \frac{\lambda}{\pi}$$