

**Le laser :  
un principe de fonctionnement,  
des réalisations multiples**

**Lucile JULIEN**

Commission cosmologie de la SAF  
6 juin 2015, Paris

lucile.julien@lkb.upmc.fr

professeure émérite

Université Pierre et Marie Curie  
UPMC, campus de Jussieu, Paris

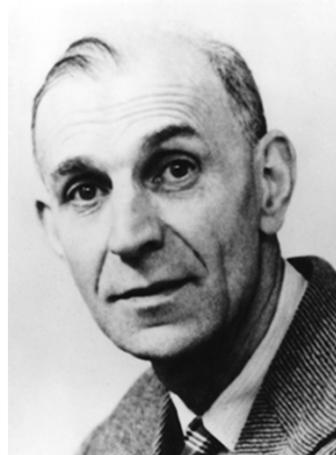


Laboratoire Kastler Brossel  
équipe de métrologie



**La spécialité du laboratoire : l'interaction entre les atomes et la lumière**

Trois prix Nobel  
de Physique



1966

Alfred Kastler



1997

Claude  
Cohen Tannoudji



2012

Serge Haroche

# Plan de la présentation

- **Principe de fonctionnement d'un laser**
- Milieux amplificateurs, pompage, cavités, cristaux non-linéaires
- Les propriétés du rayonnement émis et quelques applications
- Du laser monochromatique au laser blanc :  
des impulsions de plus en plus courtes

Le mot **LASER** est un acronyme :

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

**A**mplification de **L**umière par **E**mission **S**timulée de **R**ayonnement

**L'émission stimulée est l'un des processus d'interaction  
entre les atomes et le rayonnement**

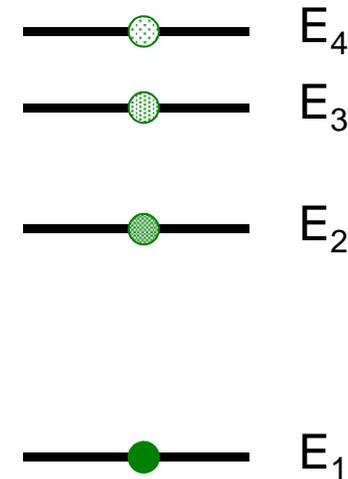
# L'interaction atome - rayonnement



Prix Nobel 1922

## Niels Bohr (1913)

- L'énergie de l'atome est quantifiée :  
il possède des niveaux d'énergie



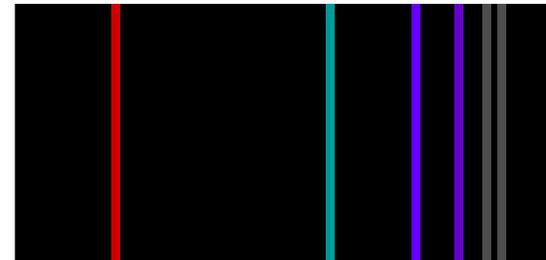
- L'atome ne peut absorber ou émettre la lumière qu'à des fréquences bien particulières telles que :

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

- Il le fait lors de "sauts quantiques" (condition de résonance)

On décrira dans la suite le rayonnement en termes de photons

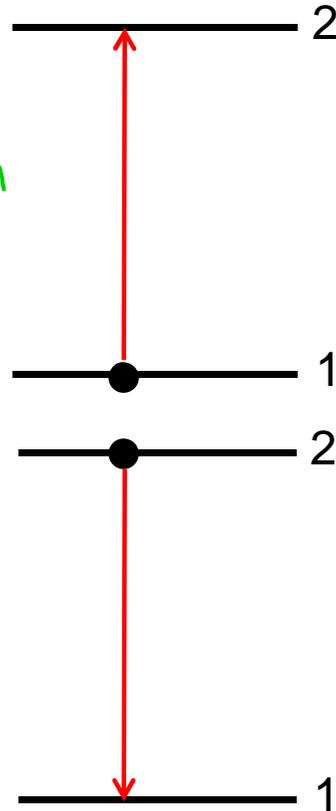
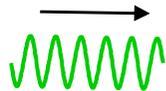
Bohr explique le spectre d'émission de l'atome d'hydrogène



# Deux processus d'interaction résonnante

(connus à cette époque)

**L'absorption**



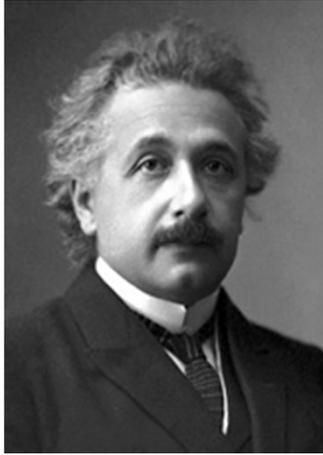
Un photon disparaît  
du faisceau incident

**L'émission spontanée**

Un photon est émis  
dans une direction  
aléatoire

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

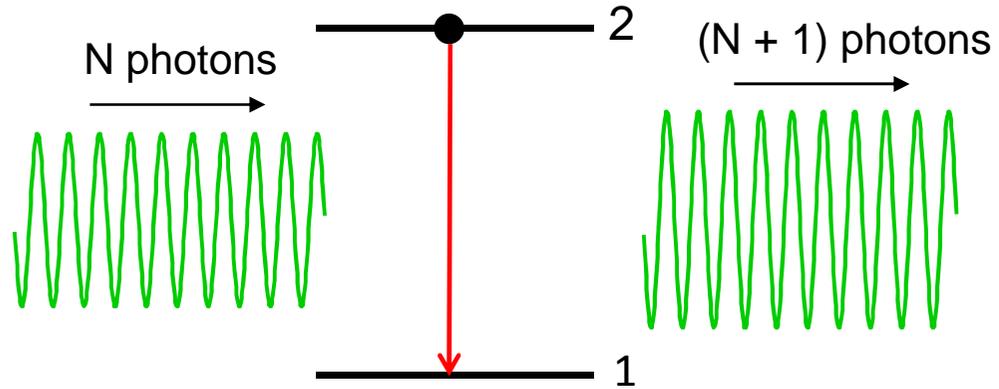
- l'énergie du photon est  $h\nu$
- lors du processus d'interaction atome + photon, il y a conservation de l'énergie comme pour tout système isolé (loi de la physique)



# Un troisième processus : l'émission stimulée

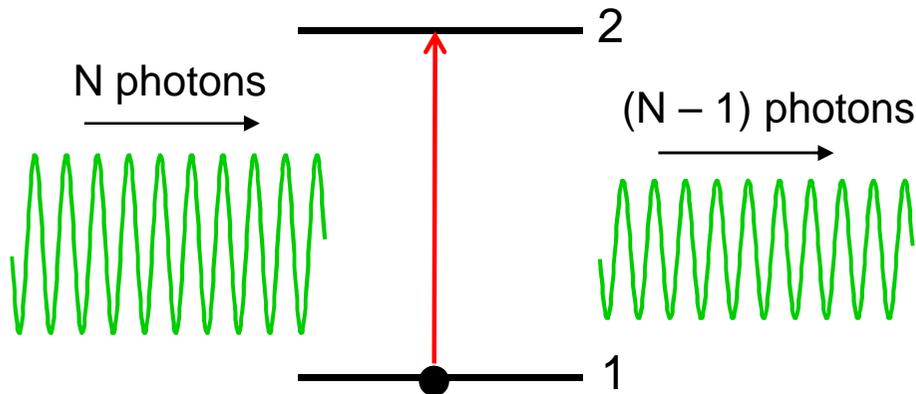
découvert par Einstein en 1916

**L'émission stimulée**



Le photon émis est dans le même mode du champ que les photons incidents :  
l'onde est amplifiée

**L'absorption**



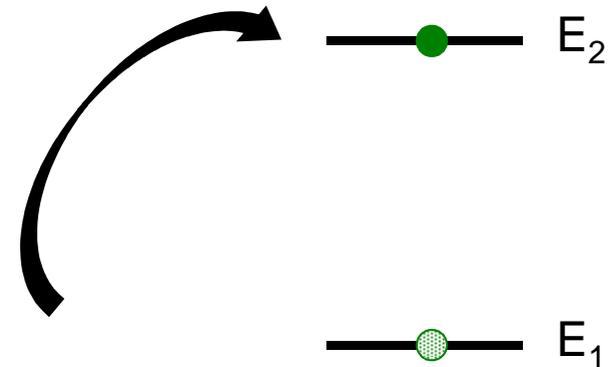
# Comment amplifier la lumière avec l'émission stimulée ?

En présence de rayonnement incident résonnant, les deux processus ont lieu simultanément :

- l'absorption atténue la lumière  
elle est proportionnelle à la population du niveau  $E_1$
- l'émission stimulée l'amplifie  
elle est proportionnelle à la population du niveau  $E_2$

Il faut avoir plus d'atomes dans l'état  $E_2$  que dans l'état  $E_1$  :  
c'est ce qu'on appelle réaliser  
une **inversion de population**.

Pour cela il faut pomper l'atome,  
c'est-à-dire lui fournir de l'énergie

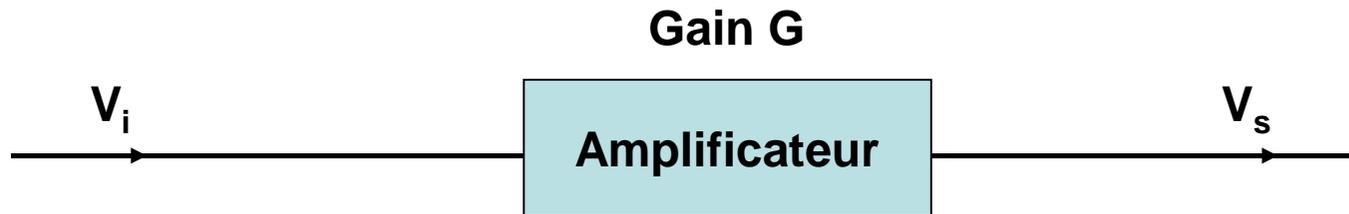


Différents types de pompage : électrique, optique, chimique, ...

**Le milieu contenant les atomes devient un amplificateur de lumière**

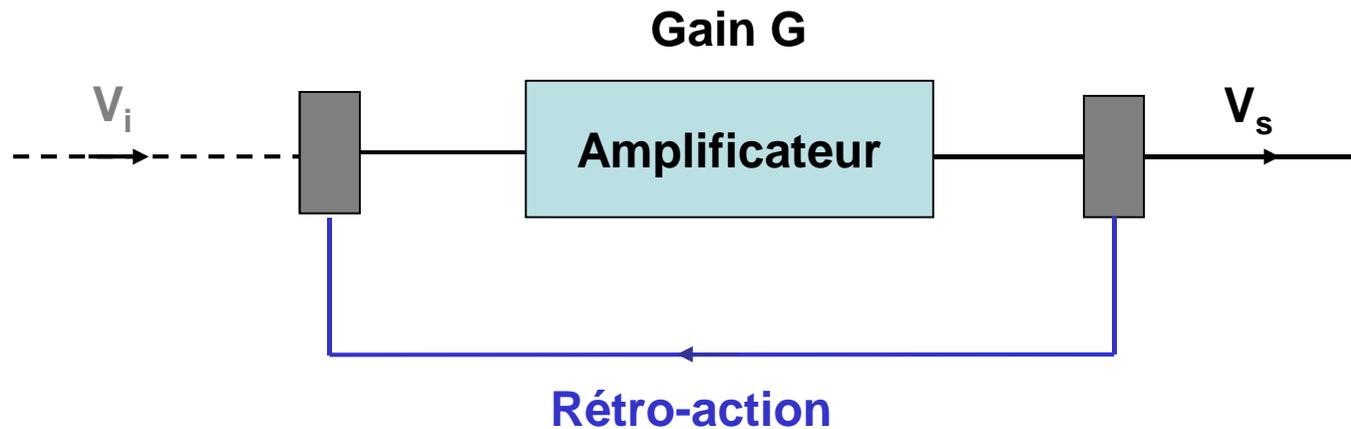
# Transformer un amplificateur en oscillateur

On sait le faire en électronique en bouclant le système sur lui-même ...



# Transformer un amplificateur en oscillateur

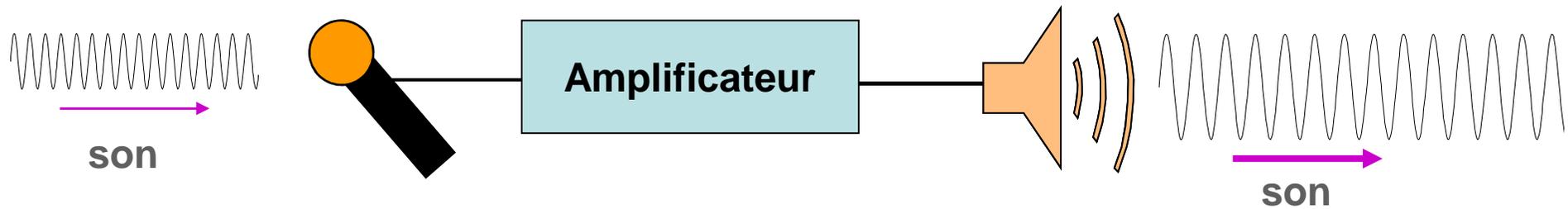
On sait le faire en électronique en bouclant le système sur lui-même ...



... mais aussi en (électro) acoustique et en optique

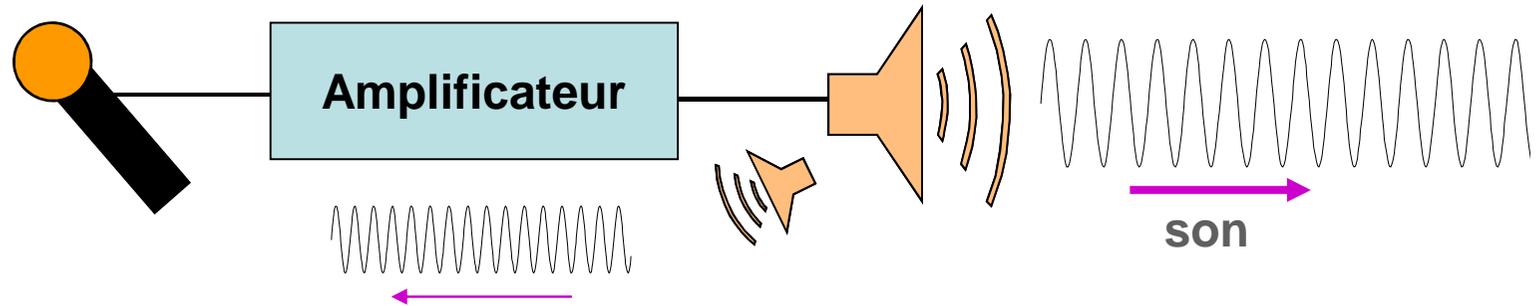
# Transformer un amplificateur en oscillateur

## Un amplificateur de son



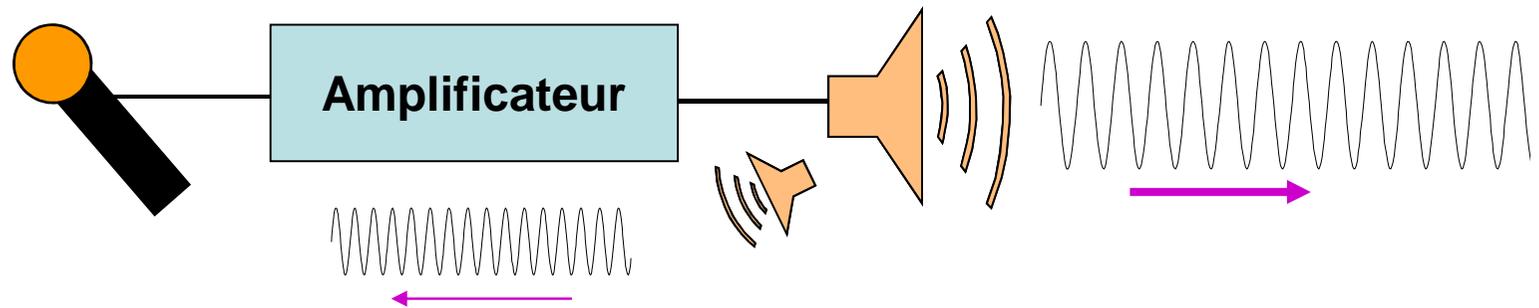
# Transformer un amplificateur en oscillateur

L'effet Larsen : un oscillateur qui produit du son

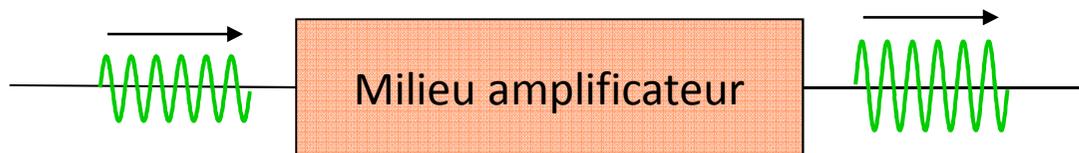


# Transformer un amplificateur en oscillateur

L'effet Larsen : un oscillateur qui produit du son

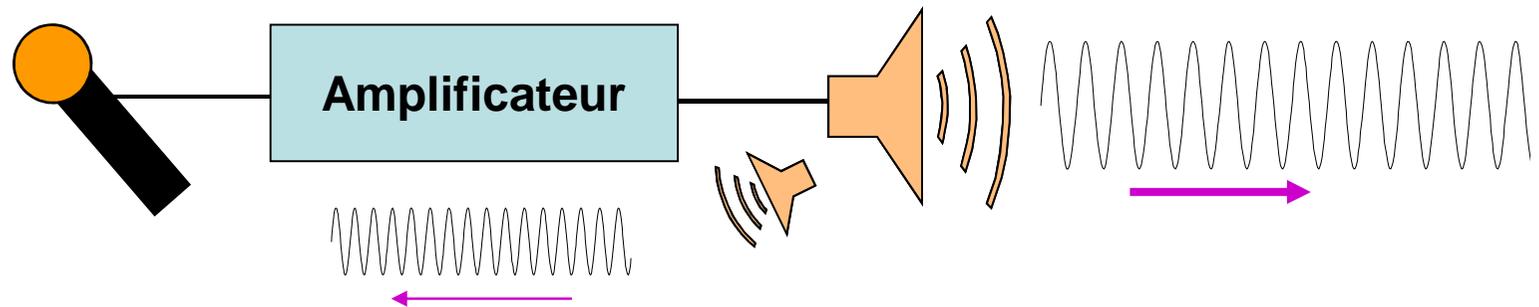


Un amplificateur de lumière

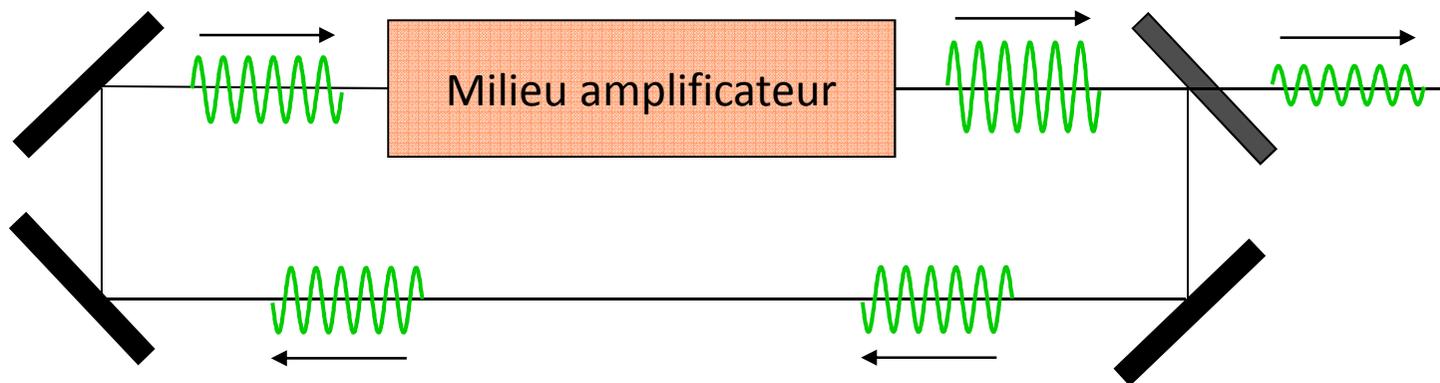


# Transformer un amplificateur en oscillateur

L'effet Larsen : un oscillateur qui produit du son

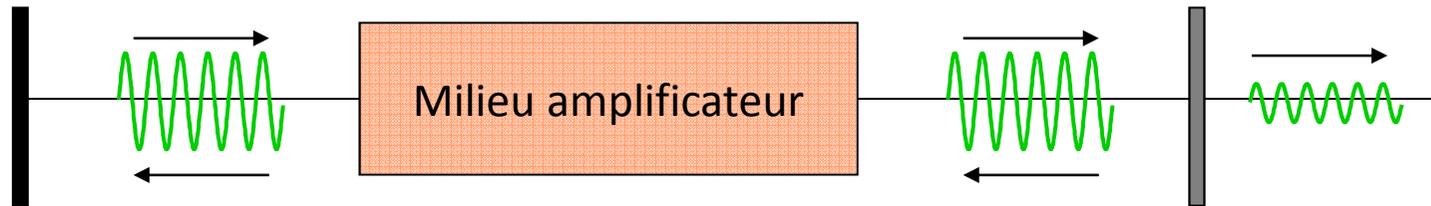


Le laser : un oscillateur qui produit de la lumière

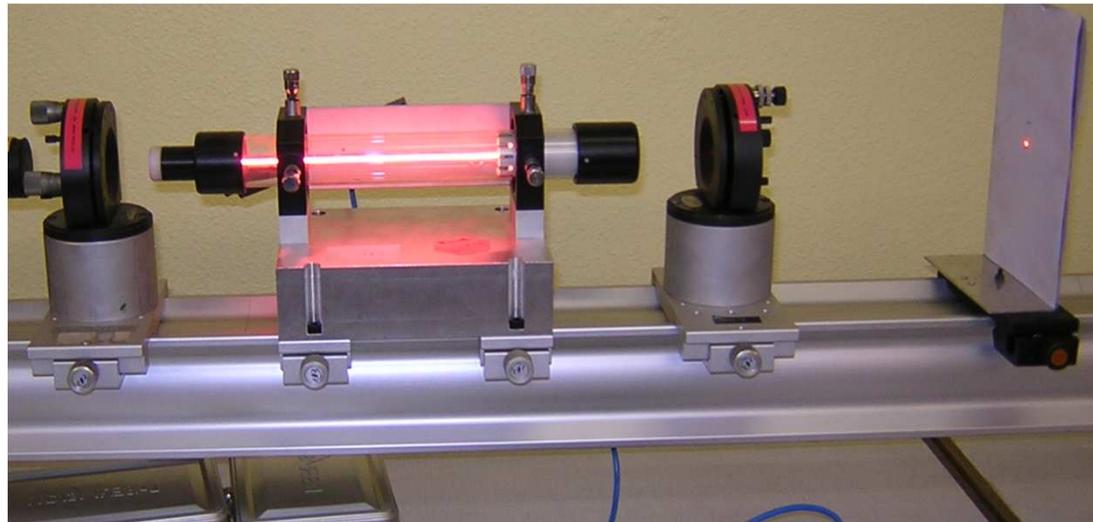


## Encore plus simple : deux miroirs seulement

On a une cavité Fabry-Perot

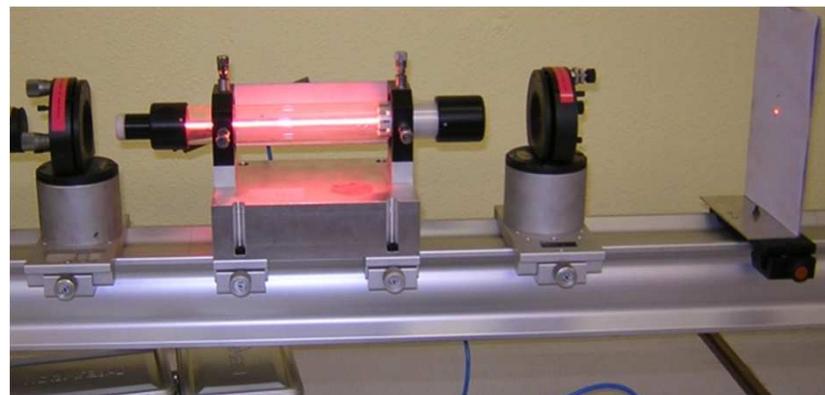


La lumière fait des allers-retours entre les deux miroirs et sort par le miroir de sortie qui ne réfléchit pas à 100%



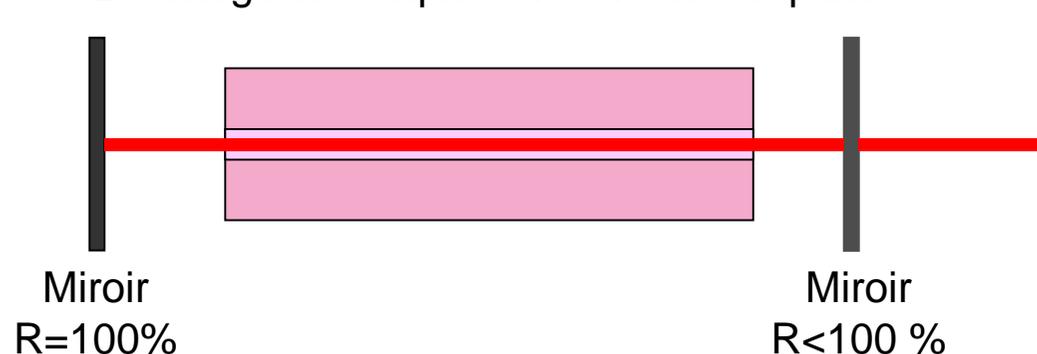
## Quelques expériences ...

On ne "voit" le faisceau laser que quand il est intercepté par un obstacle (ici la feuille de papier)

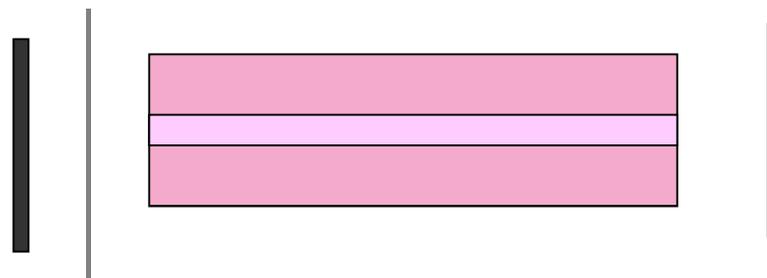


Décharge électrique dans un tube capillaire

Le laser fonctionne :  
on voit une tache lumineuse  
sur le papier ou sur le mur



On place une feuille de papier  
entre les deux miroirs :  
le laser ne fonctionne plus

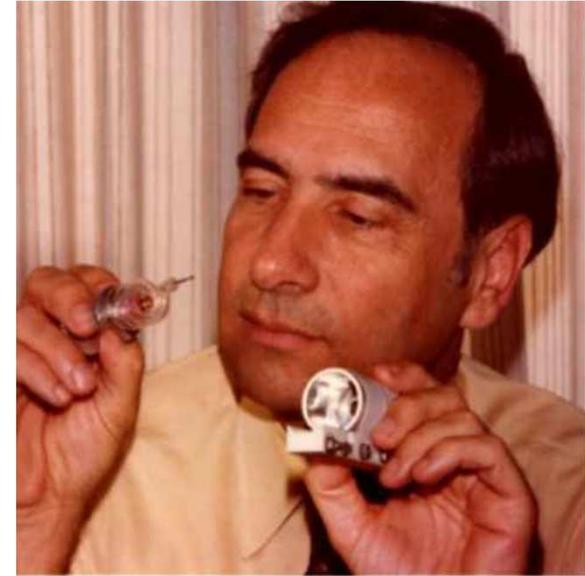


Si l'on enlève l'un des deux miroirs ou si on l'incline : le laser ne fonctionne plus.  
**il faut que la lumière puisse faire des allers-retours dans le milieu amplificateur.**

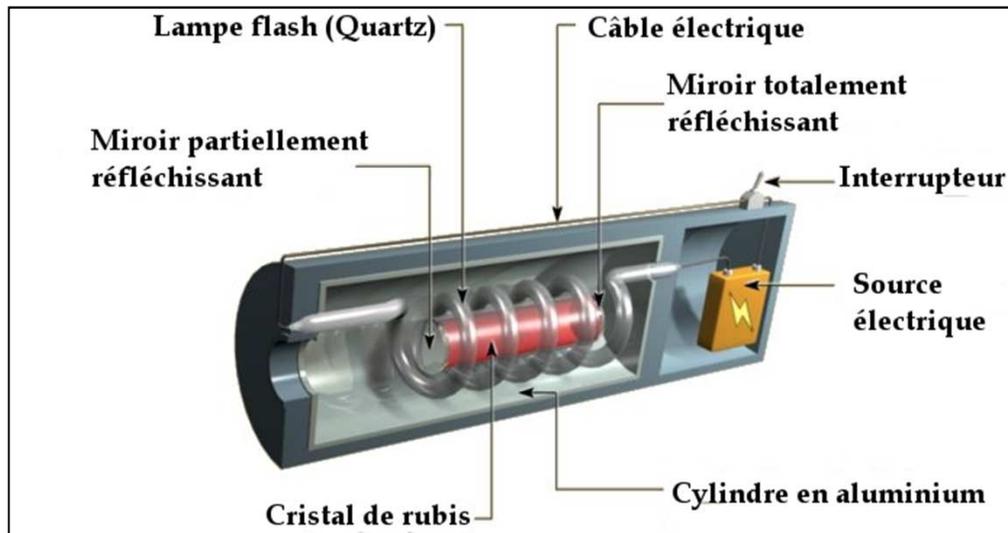
# Le premier laser, il y a plus de 50 ans

16 mai 1960

Theodore H. Maiman  
Hughes Research  
Laboratories  
Malibu, Californie



laser à solide (rubis) pompé par flash



Le cylindre de rubis(\*) est entouré d'un serpentín de verre dans lequel on allume une décharge électrique

(\*) rubis :  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dopé au  $\text{Cr}^{3+}$

Il émettait des impulsions rouges à 694 nm

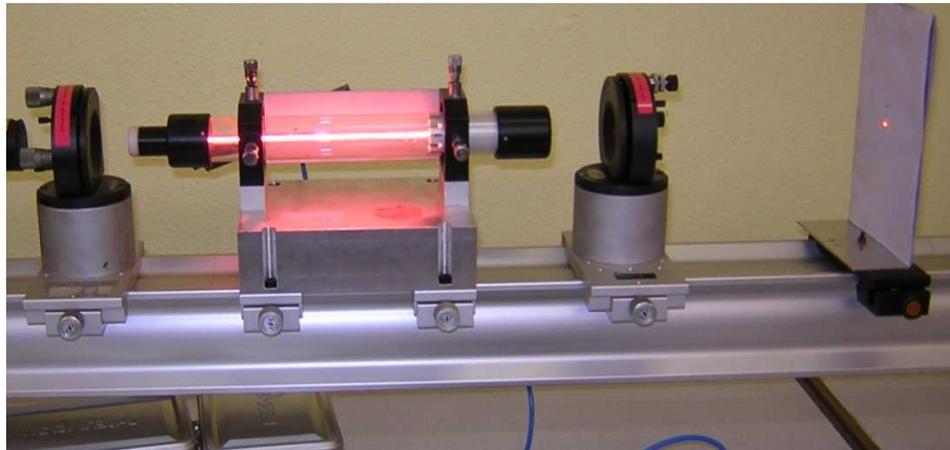
# Le premier laser à gaz : le laser hélium-néon

Ali Javan (1961)  
Bell Labs

Longueur d'onde  
1,15  $\mu\text{m}$  ...

... puis 633 nm

A.D. White et J.D. Rigden  
(1962)



**Lasers les plus répandus  
pendant plus de 20 ans**

## Plan de la présentation

- L'émission stimulée et le principe de fonctionnement d'un laser
- **Milieux amplificateurs, pompage, cavités, cristaux non-linéaires**
- Les propriétés du rayonnement émis et quelques applications
- Du laser monochromatique au laser blanc :  
des impulsions de plus en plus courtes

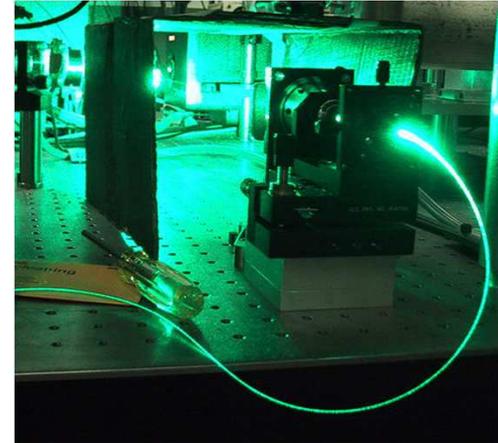
# Des milieux amplificateurs et des longueurs d'onde variées

## Lasers à gaz

(atomes, molécules, ions)

- laser He-Ne (1961)  
1,15  $\mu\text{m}$  - 3,39  $\mu\text{m}$  - 633 nm
- laser CO<sub>2</sub>, (1962) autour de 10  $\mu\text{m}$
- lasers ioniques  
Hg<sup>+</sup> (1963) IR  
Ar<sup>+</sup> (1964), nombreuses raies : 514 nm ...

Raies d'émission isolées



laser  
à Ar<sup>+</sup>

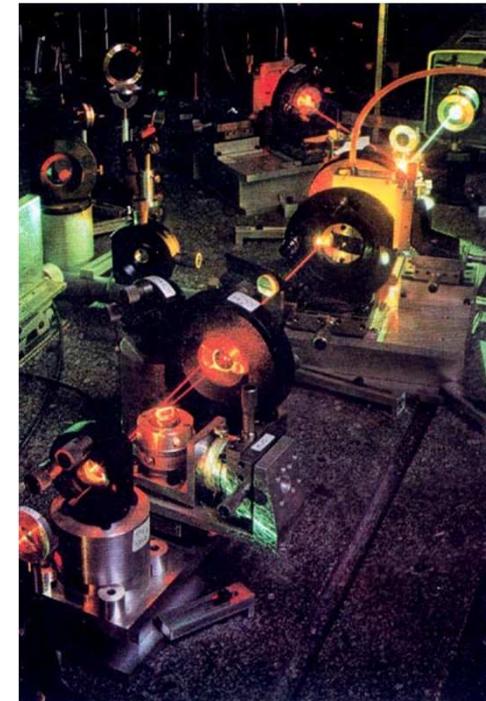
## Lasers à liquides

Lasers à colorants (1966)

Visible et proche infrarouge

Possibilité d'accorder la fréquence  
sur une large plage dépendant du colorant

Dans un milieu dense, on peut avoir de l'amplification  
sur un domaine de fréquence plus large que dans un gaz



laser  
à colorant

# Lasers à solides

- **laser à rubis** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  dopé au  $\text{Cr}^{3+}$ )
- **laser à YAG** (**G**renat d'**Y**ttrium et d'**A**luminium  $\text{Y}_3^{3+}\text{Al}_5^{3+}\text{O}_{12}^{2-}$ ) (1964)

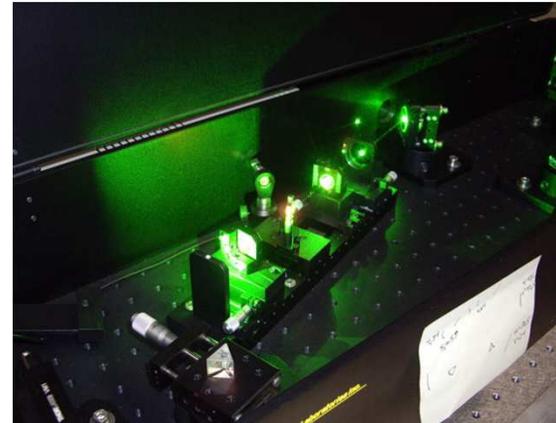
Nd:YAG des ions  $\text{Nd}^{3+}$  sont substitués aux ions  $\text{Y}^{3+}$  "dopage "

1064 nm, proche infrarouge

- **lasers Ti : saphir** (1986)

$\text{Al}_2\text{O}_3$  (corindon) dopé au  $\text{Ti}^{3+}$

large spectre de 700 à 1100 nm  
accordable



laser  
Ti:saphir

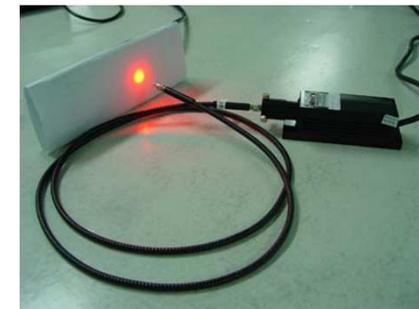
- **lasers à fibres optiques**

La lumière est guidée dans le milieu amplificateur qui peut être très long

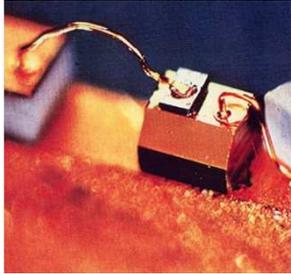
$\text{Er}^{3+}$ : verre, IR 1550 nm

La longueur d'onde dépend non seulement de l'ion dopant  
(ex. rubis et saphir), mais aussi de la matrice  
(ex. verre dopé au Nd 1053 nm, YAG dopé au Nd 1064 nm)

laser  
à fibre



- **lasers à semi-conducteurs (diodes lasers)**



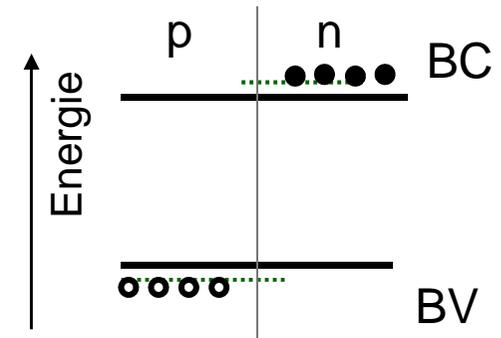
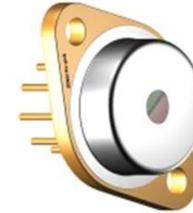
Ce sont les plus vendus actuellement

Très faible coût, petite taille,  
grande durée de vie, robustes

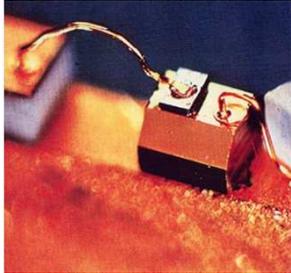
Une diode laser est une jonction entre :

- un semi-conducteur dopé n qui a un excès d'électrons
- et un semi-conducteur dopé p qui a un défaut d'électrons

exemple de semi-conducteur GaAs



- **lasers à semi-conducteurs (diodes lasers)**



Ce sont les plus vendus actuellement

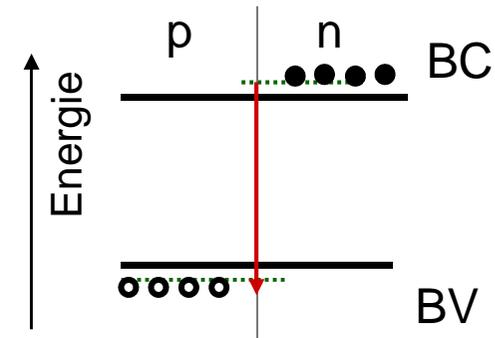
Très faible coût, petite taille,  
grande durée de vie, robustes



Une diode laser est une jonction entre :

- un semi-conducteur dopé n qui a un excès d'électrons
- et un semi-conducteur dopé p qui a un défaut d'électrons

exemple de semi-conducteur GaAs



L'application d'un courant électrique contraint

les électrons à migrer du matériau de type n vers le matériau de type p  
et les trous du matériau de type p au matériau de type n semi-conducteur

La recombinaison " interbande " d'une paire électron-trou s'accompagne de l'émission  
d'un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie  
entre la bande de valence et la bande de conduction  
C'est le principe des diodes électroluminescentes (LED)

Les faces du matériau peuvent être utilisées comme miroirs (indice élevé)

On fait maintenant des **hétérostructures**  
de plus en plus complexes  
(Prix Nobel de physique 2000 : Z.I. Alferov et H. Kroemer)

On sait contrôler monocouche par monocouche  
le dépôt de semi-conducteurs sur un substrat

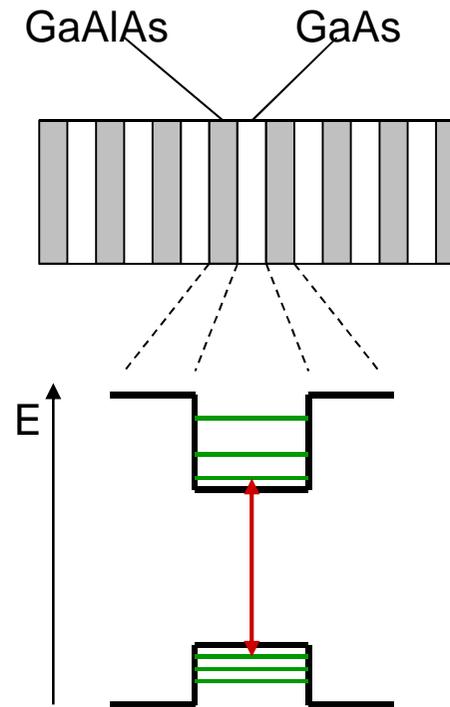
Le gap dépend du semi-conducteur

Dans un puits quantique les électrons  
sont confinés entre deux plans (2D)

On peut aussi faire des fils quantiques  
ou des boîtes quantiques (« atomes artificiels »)

On peut obtenir un guidage de la lumière  
dans la zone active en encadrant celle-ci  
de couches d'indice plus faible

En jouant sur les **matériaux** et la **géométrie**,  
on peut ajuster la longueur d'onde d'émission  
et les propriétés du faisceau émis



Structure à multi-puits quantiques

## Jouer avec la géométrie et les structures

- Laser à semi-conducteur de type ruban : émission latérale

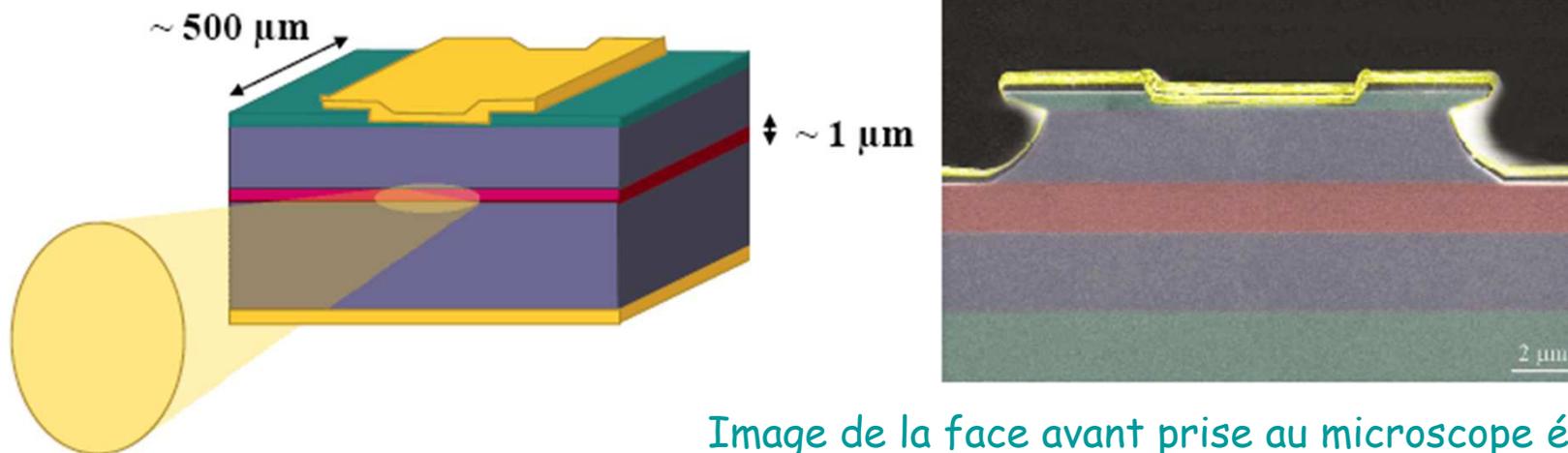


Image de la face avant prise au microscope électronique  
(photothèque du CNRS, IES Montpellier)

en rouge : la couche active émettrice

les deux faces (avant et arrière) forment les miroirs de la cavité

en jaune (en haut et en bas) : les contacts électriques

## Jouer avec la géométrie et les structures

- Laser à semi-conducteur de type VECSEL : émission par la surface (Vertical cavity surface emitting laser, 1979)

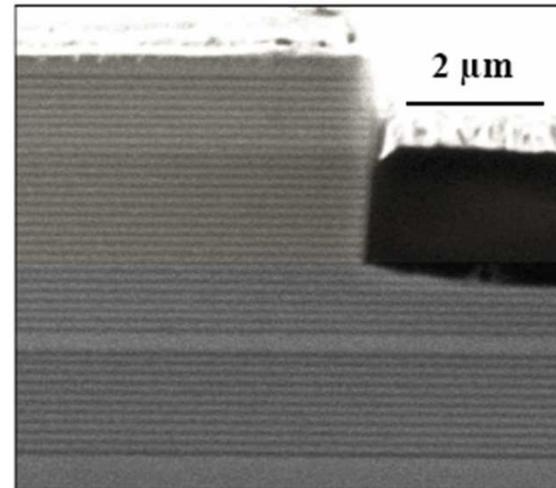
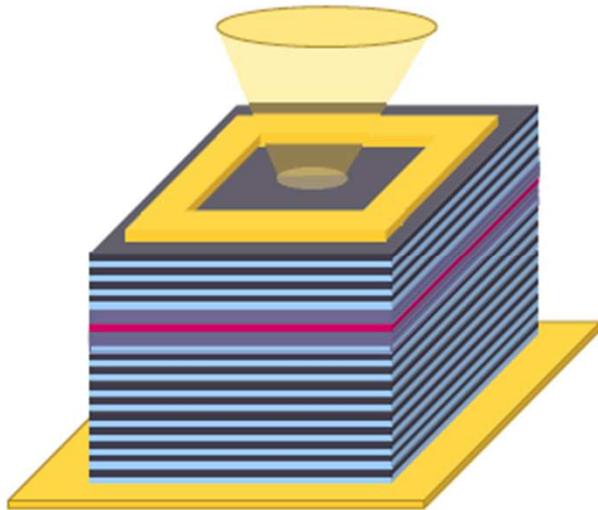


Image en coupe du laser prise au microscope électronique (CNRS, LPN Marcoussis)

Les miroirs (au-dessus et en dessous de la couche active) sont ici des empilements alternés de couches de semi-conducteurs (miroirs de Bragg)  
La longueur de la cavité laser est de l'ordre de la longueur d'onde

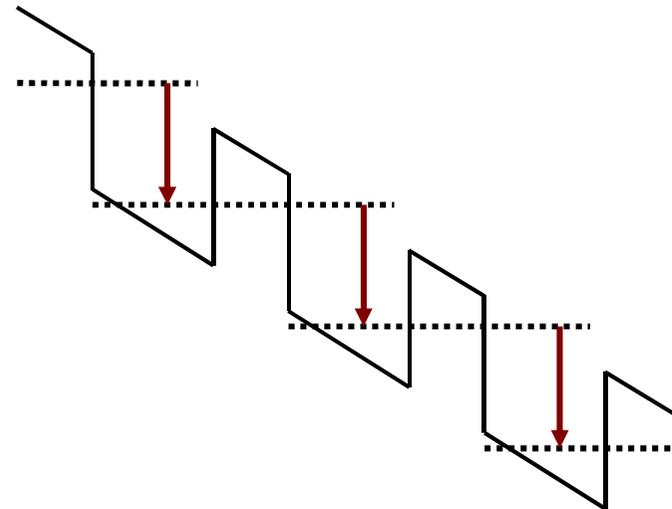
## Nombreux développements également dans les matériaux

Extension des gammes de longueurs d'onde vers le bleu et l'UV ...

- GaAs / GaAlAs / GaAsP 635 nm - 870 nm
- InP / InGaAs 1,55  $\mu\text{m}$  (télécommunications)
- ZnCdSe / ZnSSe 460 nm - 520 nm
- Nitrures GaN, AlN (1993) bleu et UV

... et également vers l'IR lointain et le domaine des THz  
grâce aux lasers à cascade quantique (QCL, 1994)

Puits quantiques multiples  
Transitions intrabande puis effet tunnel  
Emission dans l'IR (3 - 24  $\mu\text{m}$ )



# Les différents types de pompage

Le pompage consiste à fournir de l'énergie au milieu amplificateur pour réaliser l'inversion de population.

Le rendement est le rapport entre l'énergie lumineuse émise par le laser et l'énergie fournie par le pompage : il peut varier de 0,1% à 50%.

## Le pompage électrique

Utilisé dans les diodes laser

Les électrons injectés permettent de peupler la bande de conduction du semiconducteur (rendement élevé).

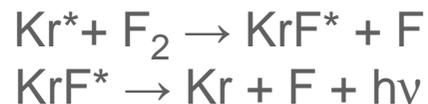
## Le pompage chimique

Utilisé dans les lasers à excimères (1965)

Excimère : dimère de gaz rare excité produit par décharge électrique

C'est une réaction chimique qui fournit l'énergie

Ultraviolet : KrF (248 nm), XeBr (282 nm), etc. (exciplexes)



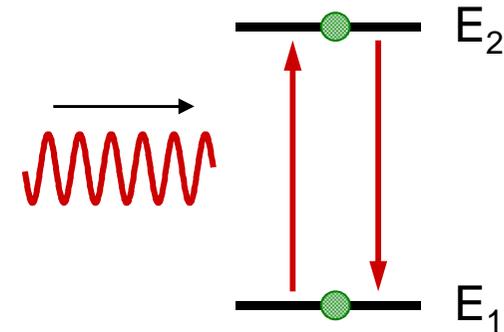
La molécule n'existe que dans son état excité  
Elle se dissocie instantanément dans son état fondamental

## Le pompage optique

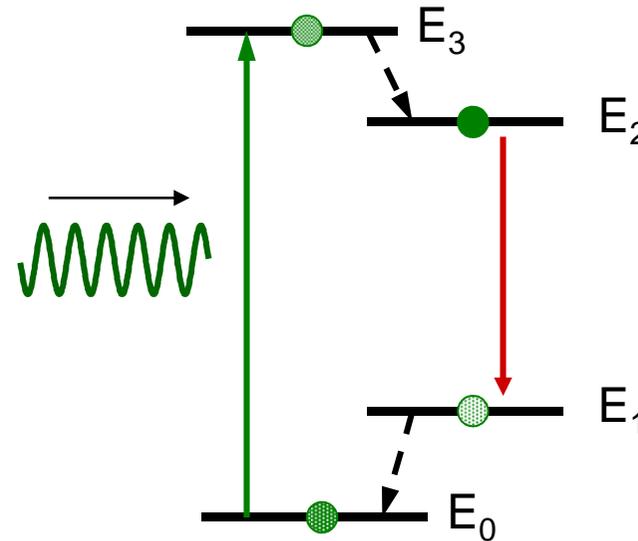
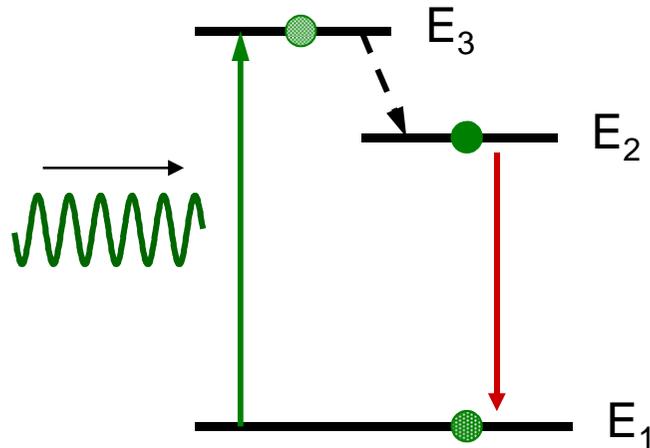
avec une lampe flash, une diode laser ou un autre laser

Avec seulement **deux niveaux**, on ne peut pas créer d'inversion de population

Pour un faisceau résonnant intense, il y a autant d'absorption que d'émission induite et on crée une égalité des populations



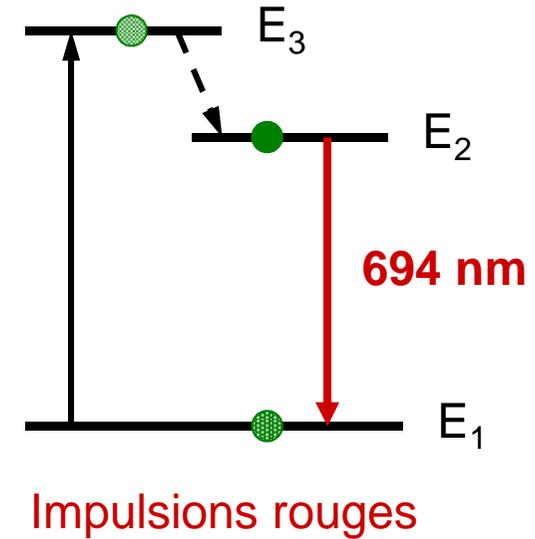
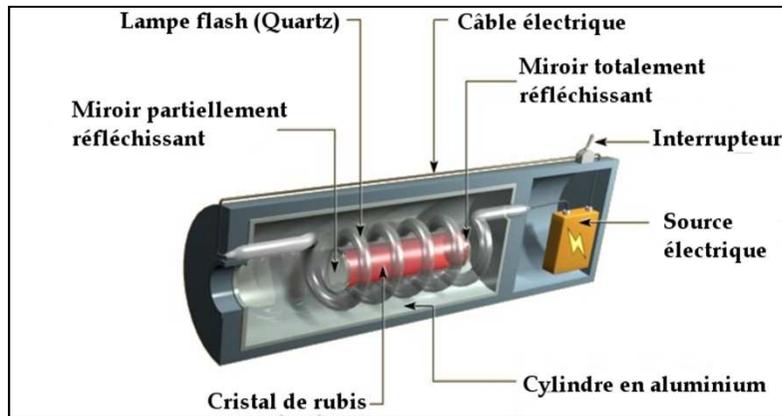
Mais on peut le faire avec **trois ou quatre niveaux**



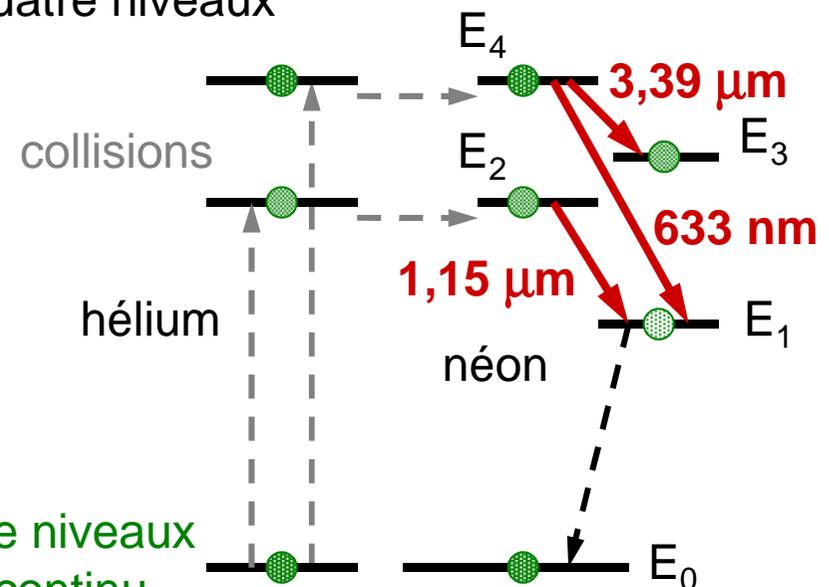
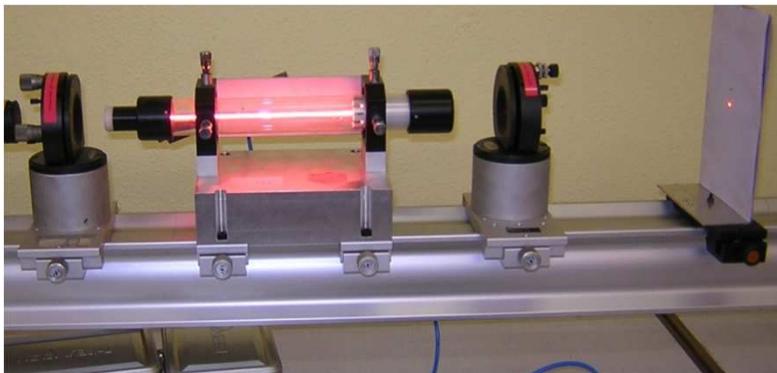
La fréquence du photon laser émis est toujours inférieure à celle du photon de pompage

## Exemples

- Laser à rubis : pompage par flash, trois niveaux



- Laser He-Ne : pompage par collisions, quatre niveaux

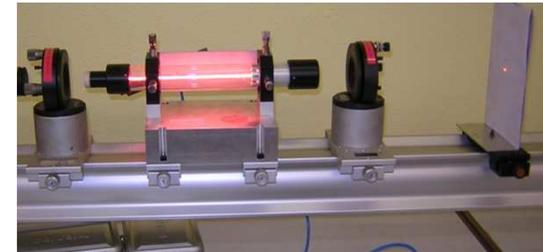
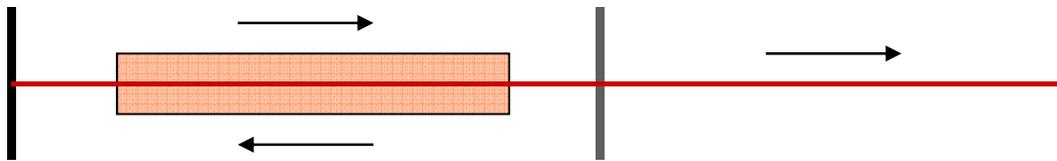


Qu'il soit optique ou non, le pompage à quatre niveaux est plus efficace et permet de fonctionner en continu

# Les différents types de cavités

Nous avons vu que les milieux amplificateurs, les types de pompage et les longueurs d'onde des lasers sont variés ;  
les géométries des cavités lasers également.

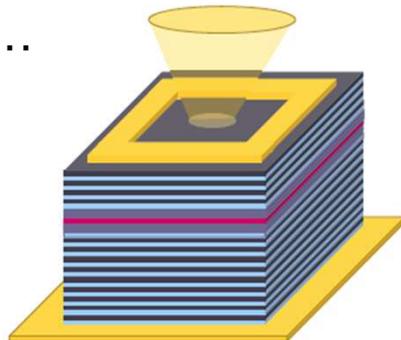
- Cavités linéaires (Fabry- Perot)



Les cavités peuvent être :

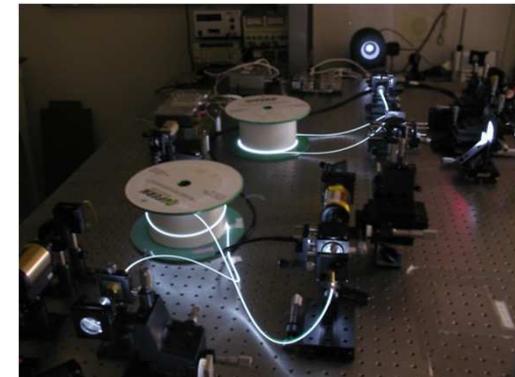
très courtes ...

VECSEL



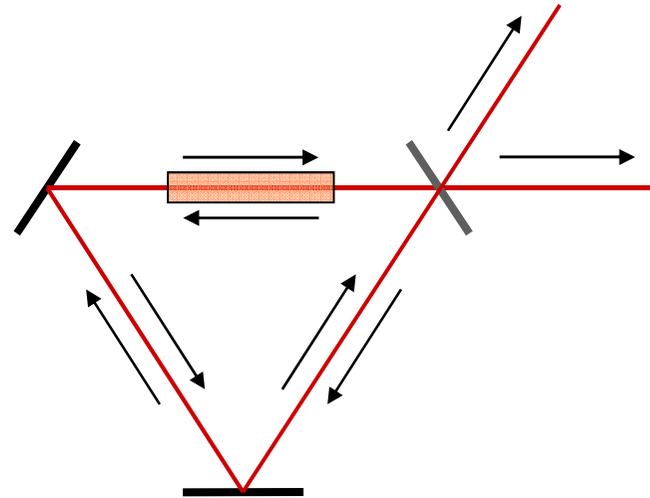
... ou très longues

laser à fibre

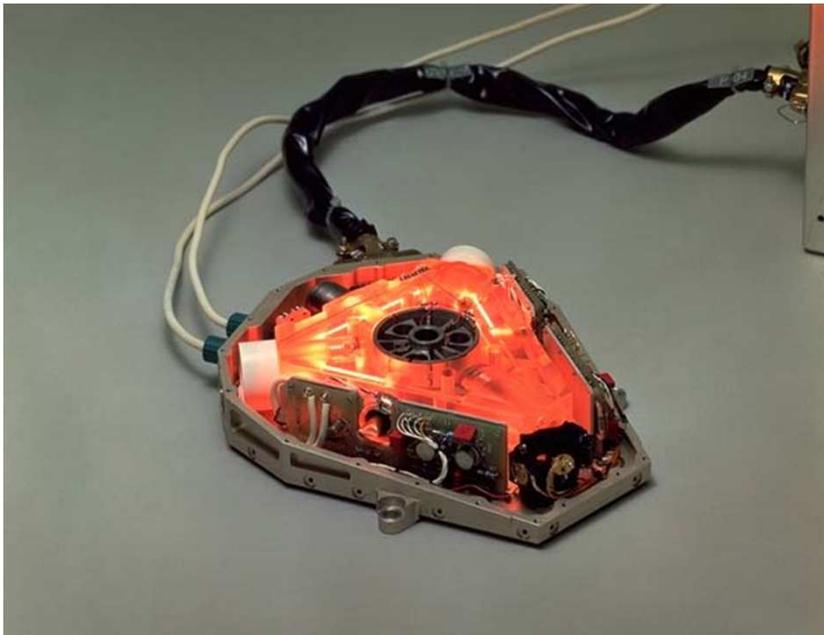


- Cavités en anneau

à 3 miroirs



Exemple : le gyrolaser



Effet Sagnac : si le référentiel du laser est en rotation à  $\Omega$ , les deux ondes se contre-propageant dans le laser ont des fréquences différentes.

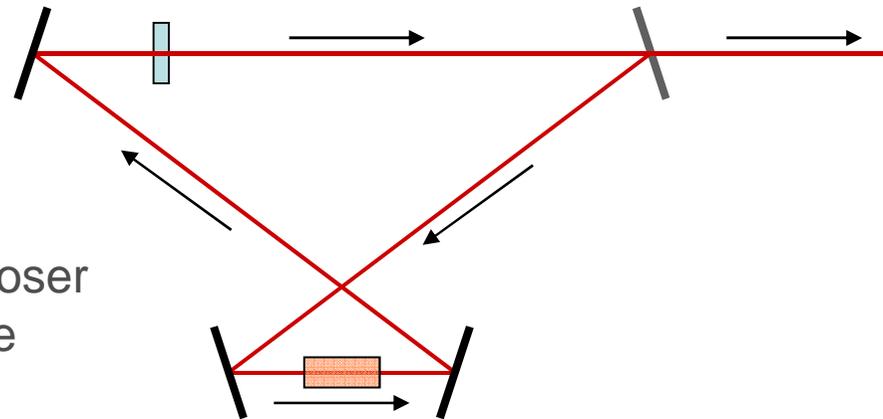
$$\Delta \nu = \frac{4S}{\lambda L} \Omega$$

Couplé à un accéléromètre, il permet le positionnement des fusées, missiles, avions, sous-marins ...

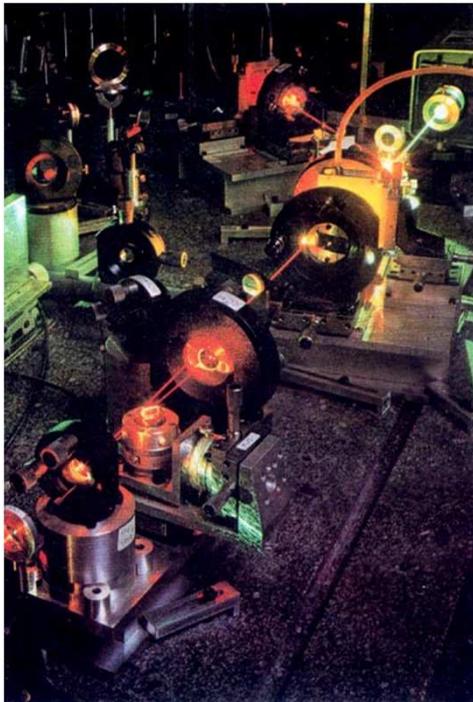
## Cavités en anneau (suite)

à 4 miroirs ou plus

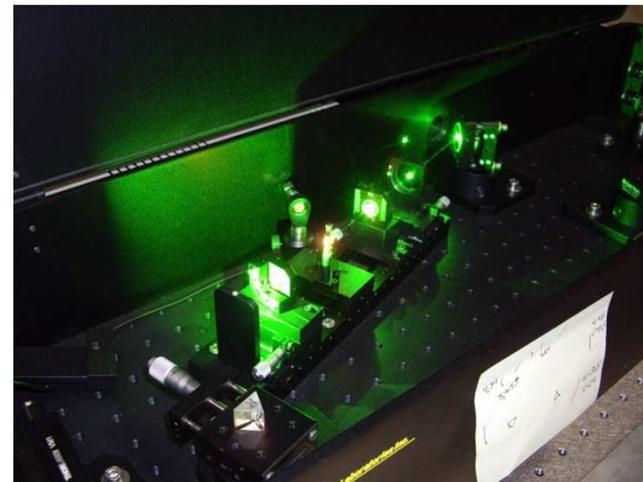
avec une diode optique on peut imposer  
un sens de rotation de la lumière



onde progressive dans le milieu amplificateur



laser à colorant



laser Ti-saphir

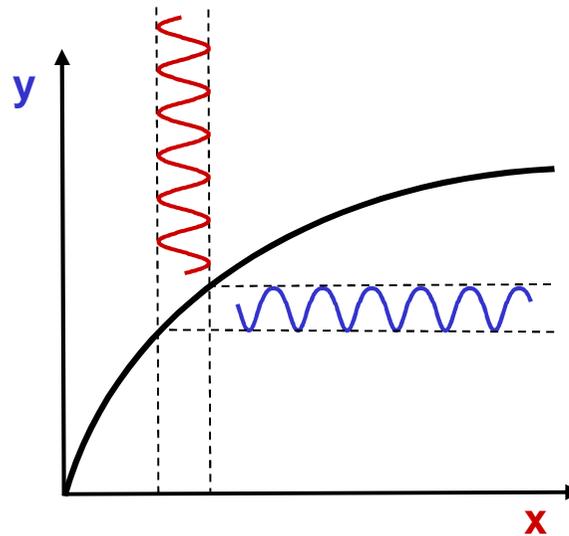
# Cristaux non linéaires

Ils permettent de générer de nouvelles fréquences

Quand le champ électromagnétique est très intense, le nuage électronique ne peut plus “suivre” le champ.

La réponse des atomes est non linéaire : il y a un effet de saturation.

$$y = a x + b x^2 + c x^3 + \dots$$



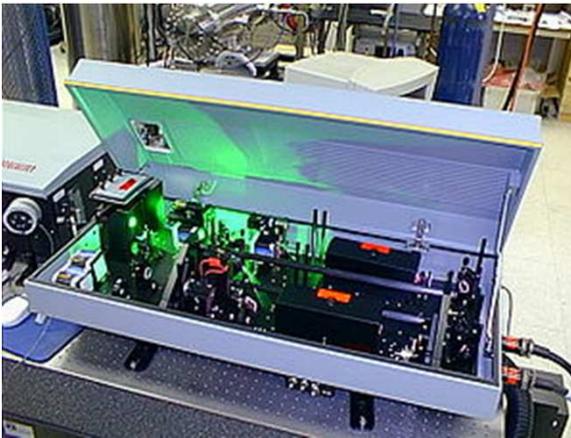
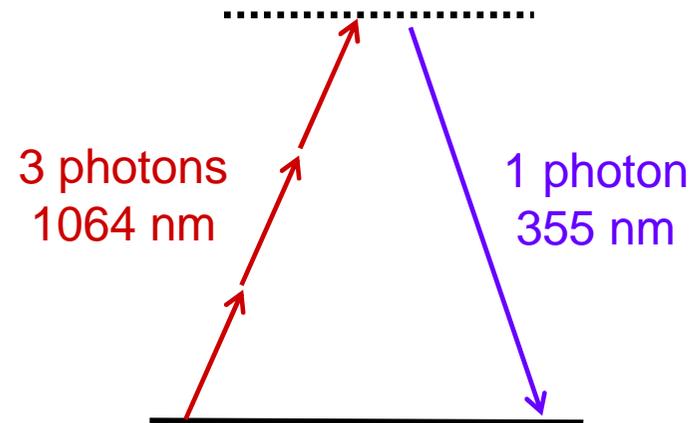
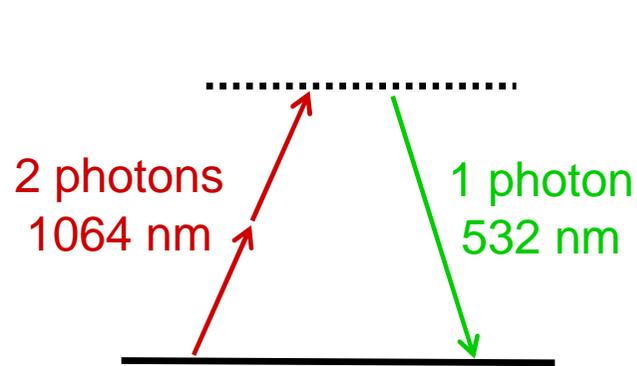
$$\omega = 2\pi\nu$$

Pour une onde incidente à  $\omega$ , la réponse de l'atome n'est pas sinusoïdale et contient des fréquences harmoniques à  $2\omega$ ,  $3\omega$ , etc.

En effet  $\sin^2(\omega t)$  contient  $\sin(2\omega t)$   
 $\sin^3(\omega t)$  contient  $\sin(3\omega t)$  ...

## Application : doublage ou triplage de fréquence

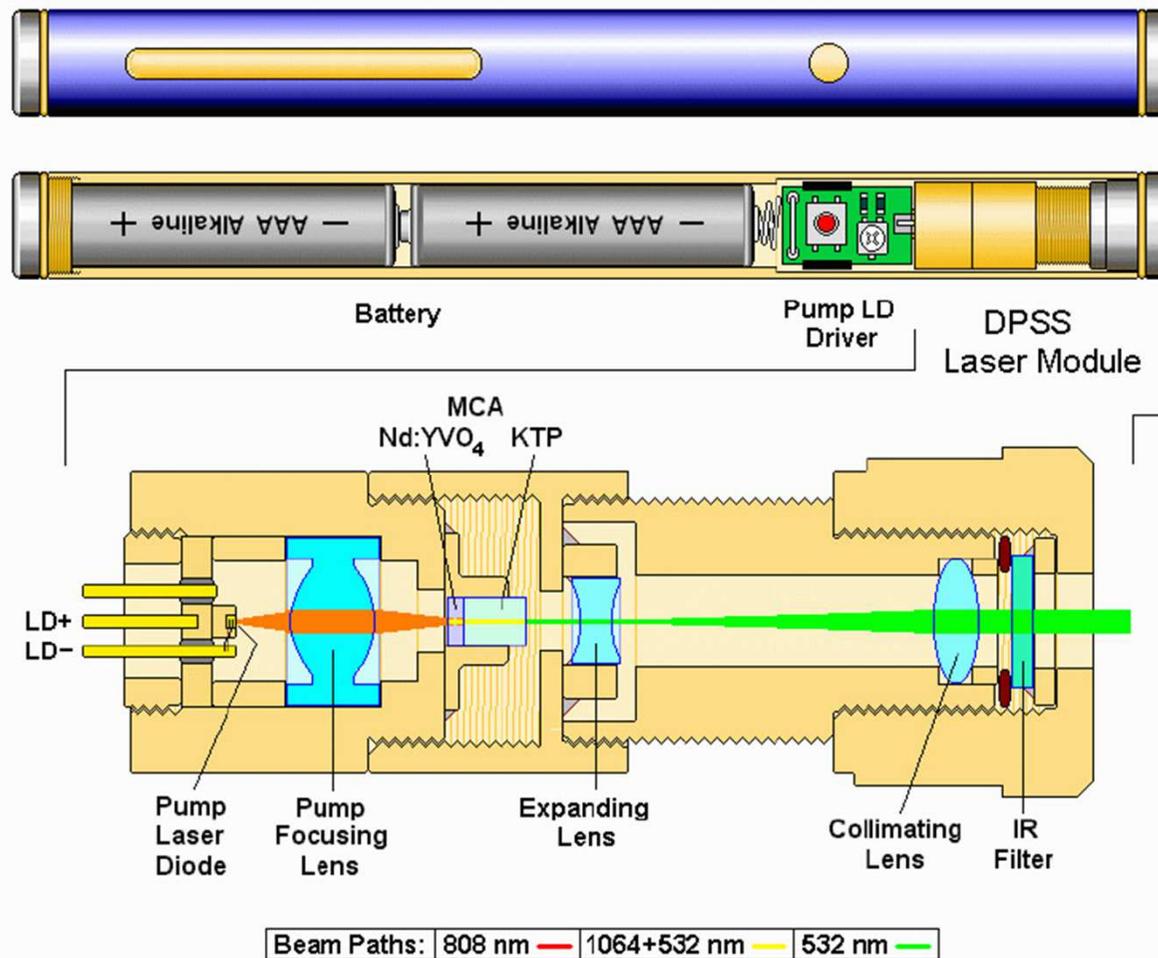
Si l'on éclaire un cristal non-linéaire par un laser IR à 1064 nm (d'intensité  $I$ ), on peut générer de la lumière à la fréquence double à 532 nm (effet en  $I^2$ ), ou triple à 355 nm (effet en  $I^3$ ).



C'est ce qu'on fait pour réaliser un pointeur laser vert

Le cristal peut être placé  
soit à l'extérieur de la cavité  
soit à l'intérieur (doublage "intra-cavité")

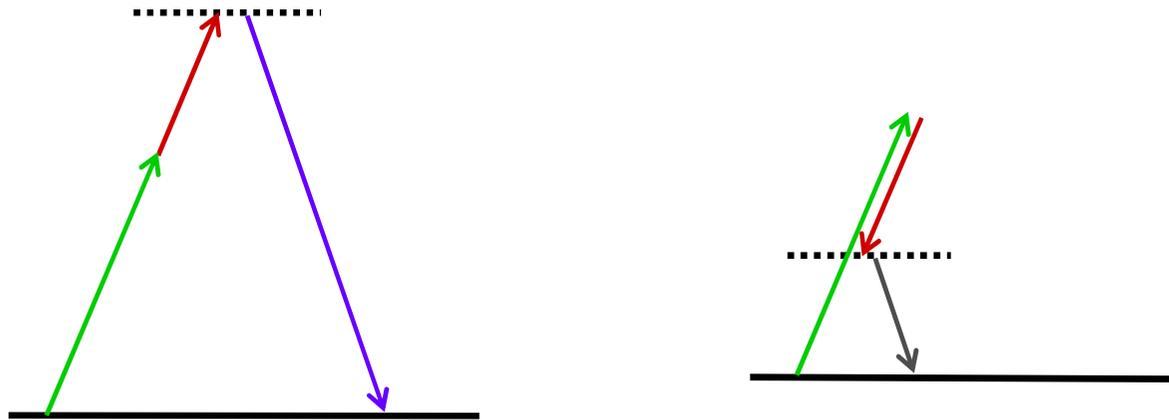
## Qu'y a-t-il dans un pointeur vert à 532 nm ?



- Des piles
- Une diode laser à 808 nm
- Un laser Nd:YAG ou Nd: YVO<sub>4</sub> à 1064 nm
- Un cristal doubleur de KTP (KTiOPO<sub>4</sub>) Potassium Titanyl Phosphate
- Des lentilles et un filtre de sortie (les miroirs sont les faces traitées des deux cristaux)

## Autre application des cristaux non linéaires : le mélange de fréquences

On peut aussi observer des effets croisés entre deux faisceaux lumineux d'intensité  $I_1$  et  $I_2$  : ils sont proportionnels au produit  $I_1 \times I_2$ .



On peut générer la fréquence somme ou la fréquence différence

En effet  $\sin(\omega_1 t) \times \sin(\omega_2 t)$  contient à la fois  
 $\sin[(\omega_1 + \omega_2) t]$  et  $\sin[(\omega_1 - \omega_2) t]$

## Plan de la présentation

- L'émission stimulée et le principe de fonctionnement d'un laser
- Milieux amplificateurs, pompage, cavités, cristaux non-linéaires
- **Les propriétés du rayonnement émis et quelques applications**
- Du laser monochromatique au laser blanc :  
des impulsions de plus en plus courtes



Photo Nicolas Treps

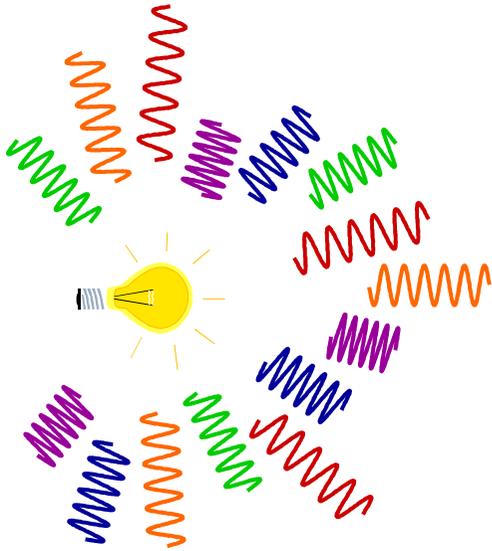
en 2005  
à Paris

**Un faisceau fin et directif : cohérence spatiale**

**Un faisceau monochromatique : cohérence temporelle**

En langage « grand public » :

un faisceau laser, c'est de la lumière concentrée et bien ordonnée



Les photons émis par une lampe ont des directions de propagation et des couleurs variées



les photons émis par un laser sont tous identiques entre eux

- en direction : **cohérence spatiale**
- et en couleur : **cohérence temporelle**

(en réalité, nous verrons que ce n'est pas si simple ...)

# Les applications de la cohérence spatiale

un faisceau fin et directif

Deux types d'applications :

- Matérialiser une ligne droite

Pointeur laser



photo non contractuelle

Spectacles



"show laser"



Laser de canalisation

Chantiers



Niveau laser

• Concentrer l'énergie sur une petite surface (1)



Découper

métal

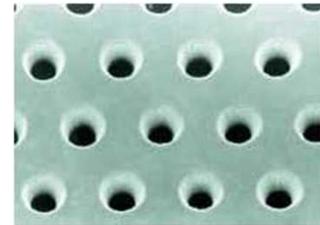


tissu



bois

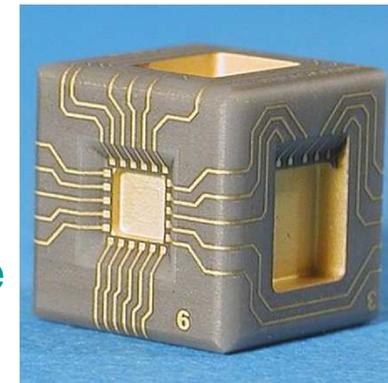
Industrie



plastique



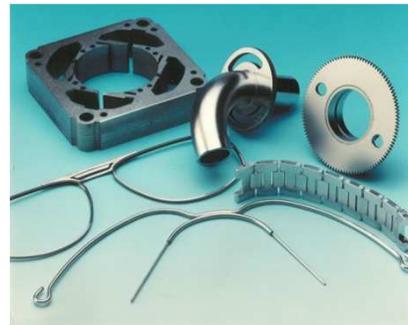
Percer



Usiner  
céramique



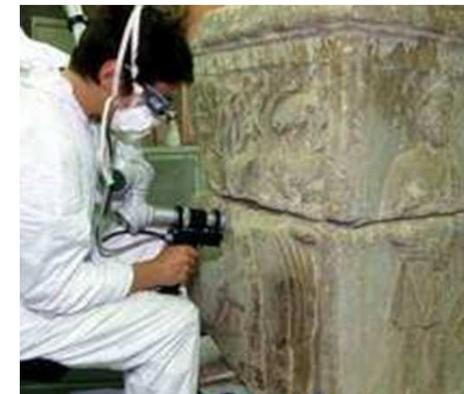
Souder



Nettoyer

pierre

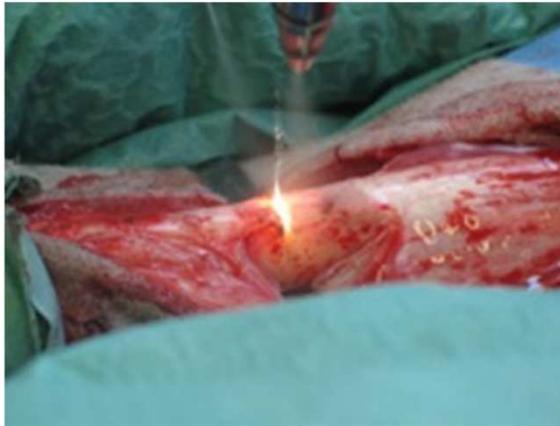
Restauration



- **Concentrer l'énergie sur une petite surface (2)**

Médecine et esthétique

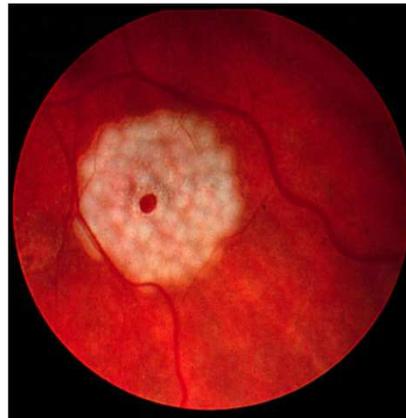
Chirurgie



Dermatologie



décollement de la rétine



Ophtalmologie

**La profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde et du tissu  
Pour chaque usage, un laser différent**

## Les effets d'un laser sur un milieu biologique

- Effet électromécanique : claquage électrique dû à un champ électrique élevé

Impulsions de 10 ps à 10 ns

- Effet photoablatif : liaisons chimiques cassées par des photons énergétiques

Impulsions UV de 10 ns à 100 ns

- Effet thermique

Lasers continus ou impulsionnels

- Effet photochimique : administration d'un photosensibilisant  
puis destruction par une activation lumineuse sélective

Irradiations faibles dans le rouge ou l'infrarouge

- **Concentrer l'énergie sur une petite surface (3)**

Lecture et transmission de l'information

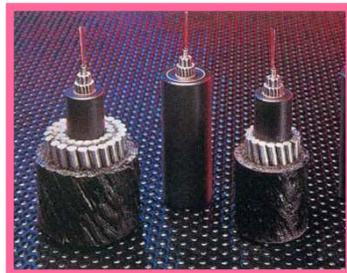


CD et DVD

Imprimante laser



Lecture de code-barres



Réseau sous-marin de fibres optiques



# La cohérence spatiale : un faisceau fin et directif ?

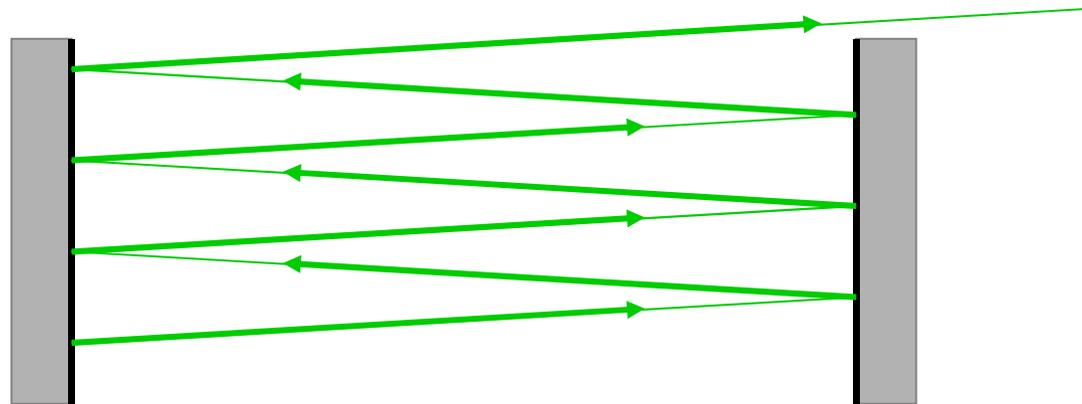
## Le faisceau

Un faisceau lumineux ne peut pas à la fois être fin et de direction parfaitement définie

Quand on réduit la section d'un faisceau, il se met à diverger : c'est la diffraction

Une onde vraiment plane aurait une extension latérale infinie ...

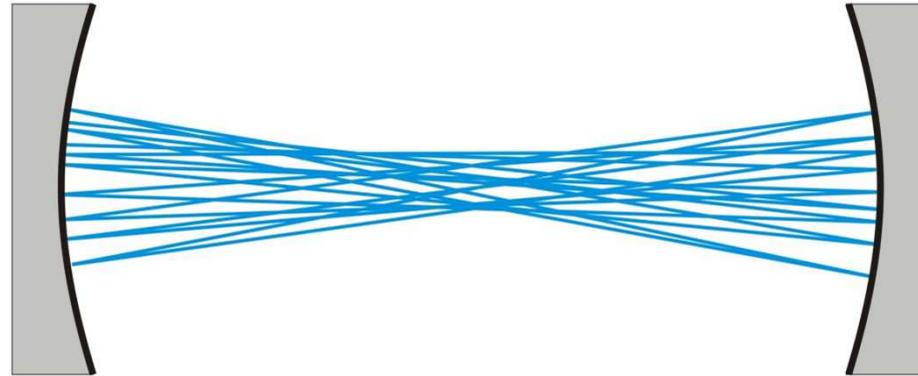
## La cavité laser



Si les deux miroirs étaient plans, la lumière s'échapperait par les côtés :  
l'un au moins des miroirs doit être sphérique

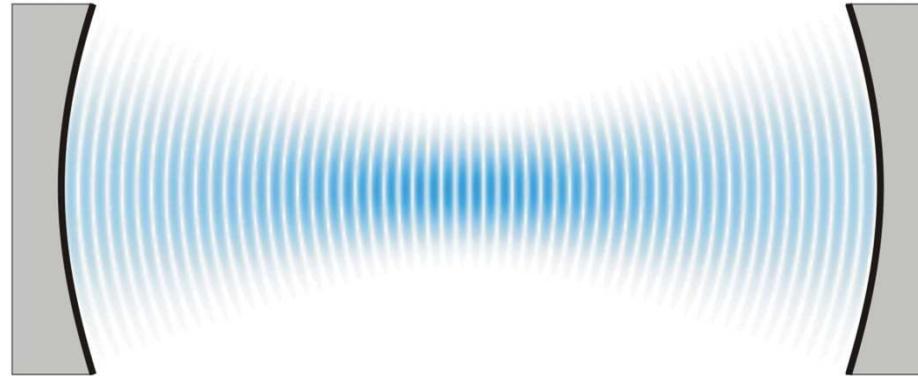
## Une cavité réaliste

Le mode spatial le plus simple  
TEM<sub>00</sub>

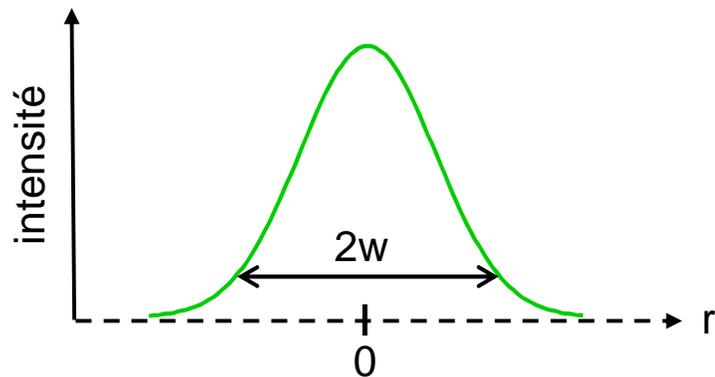


## Une cavité réaliste

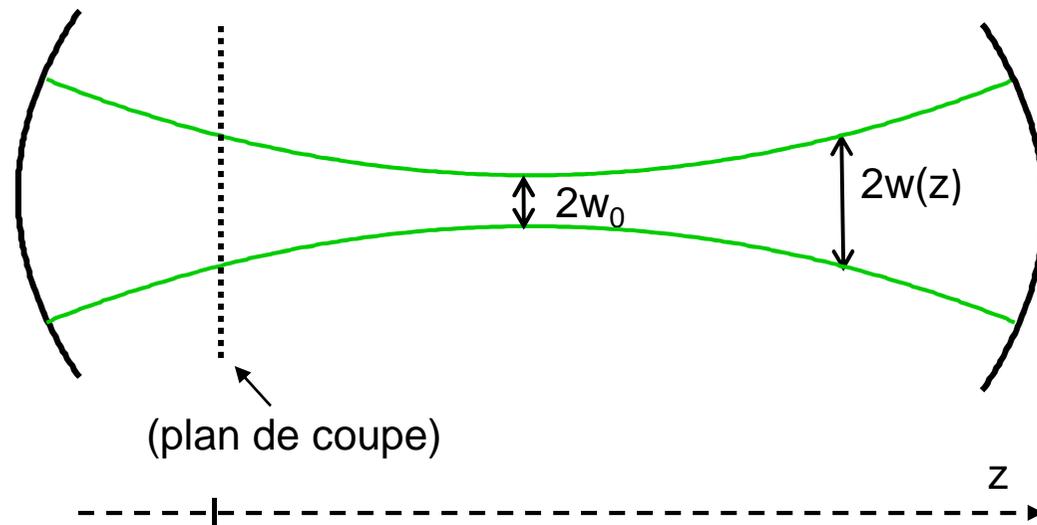
Le mode spatial le plus simple  
TEM<sub>00</sub>



$$I(r, z) = I_0(z) e^{-\frac{2r^2}{w^2(z)}}$$



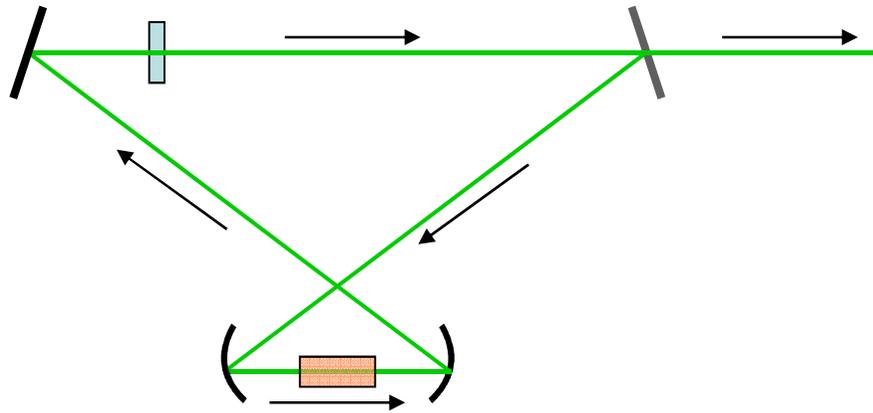
coupe transverse (gaussienne)



profil longitudinal du faisceau

$w_0$  est le col du faisceau ("waist")

## Exemples de cavités

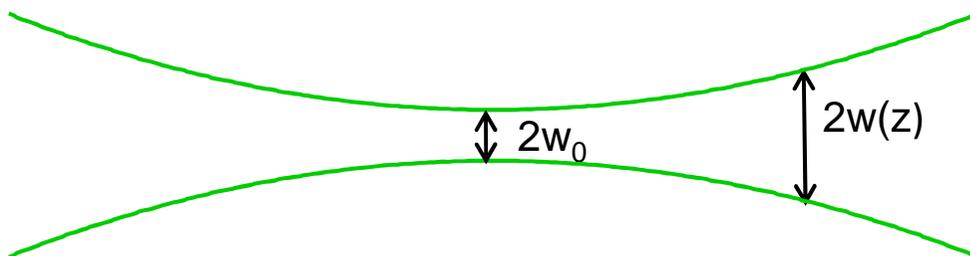


on place le milieu amplificateur autour du col  
pour maximiser la densité d'énergie et donc l'émission stimulée

## Le faisceau laser

Il est transmis par le miroir de sortie  
avec les mêmes caractéristiques que le faisceau dans la cavité

Son rayon varie au cours de la propagation



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

Au voisinage du col, le faisceau laser est parallèle  
loin du col, il est sphérique

$z_R$  est la **longueur de Rayleigh**

**distance à partir du col sur laquelle le rayon du faisceau est multiplié par 1,4**

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

Exemple d'un laser He-Ne à  $\lambda = 633 \text{ nm}$   
si  $w_0 = 600 \text{ }\mu\text{m}$   $z_R = 2 \text{ m}$

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$

- **Matérialiser une ligne droite ?**

Pour avoir une grande longueur de Rayleigh il faut un faisceau pas trop fin

Mesure de la distance Terre-Lune avec un laser YAG doublé pulsé



Telescope du CERGA Cote d'Azur

- **Concentrer l'énergie sur une petite surface ?**



Plus on focalise plus le faisceau diverge

CD	DVD	Blu-ray Disc
<p><math>\lambda = 780 \text{ nm}</math> <math>NA = 0.45</math> 1.2 mm substrate</p>	<p><math>\lambda = 650 \text{ nm}</math> <math>NA = 0.6</math> 0.6 mm substrate</p>	<p><math>\lambda = 400 \text{ nm}</math> <math>NA = 0.85</math> 0.1 mm cover layer</p>
<p>1.6 μm</p>	<p>0.74 μm</p>	<p>0.32 μm</p>

Le diamètre minimum qu'on peut obtenir est de l'ordre de la longueur d'onde



Photo Nicolas Treps

en 2005  
à Paris

**Un faisceau fin et directif : cohérence spatiale**

**Un faisceau monochromatique : cohérence temporelle**

# Les applications de la cohérence temporelle

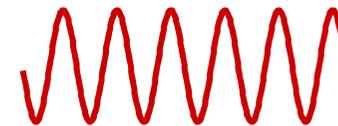
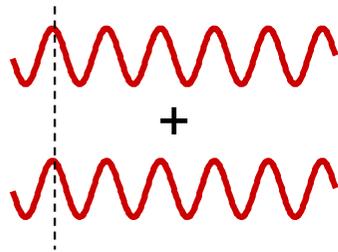
un faisceau monochromatique

Quelques applications :

- **Interférométrie**

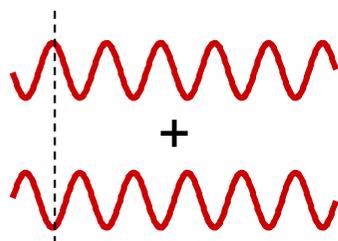
Si on superpose deux ondes identiques :

- en phase



**interférence constructive**

- en opposition de phase

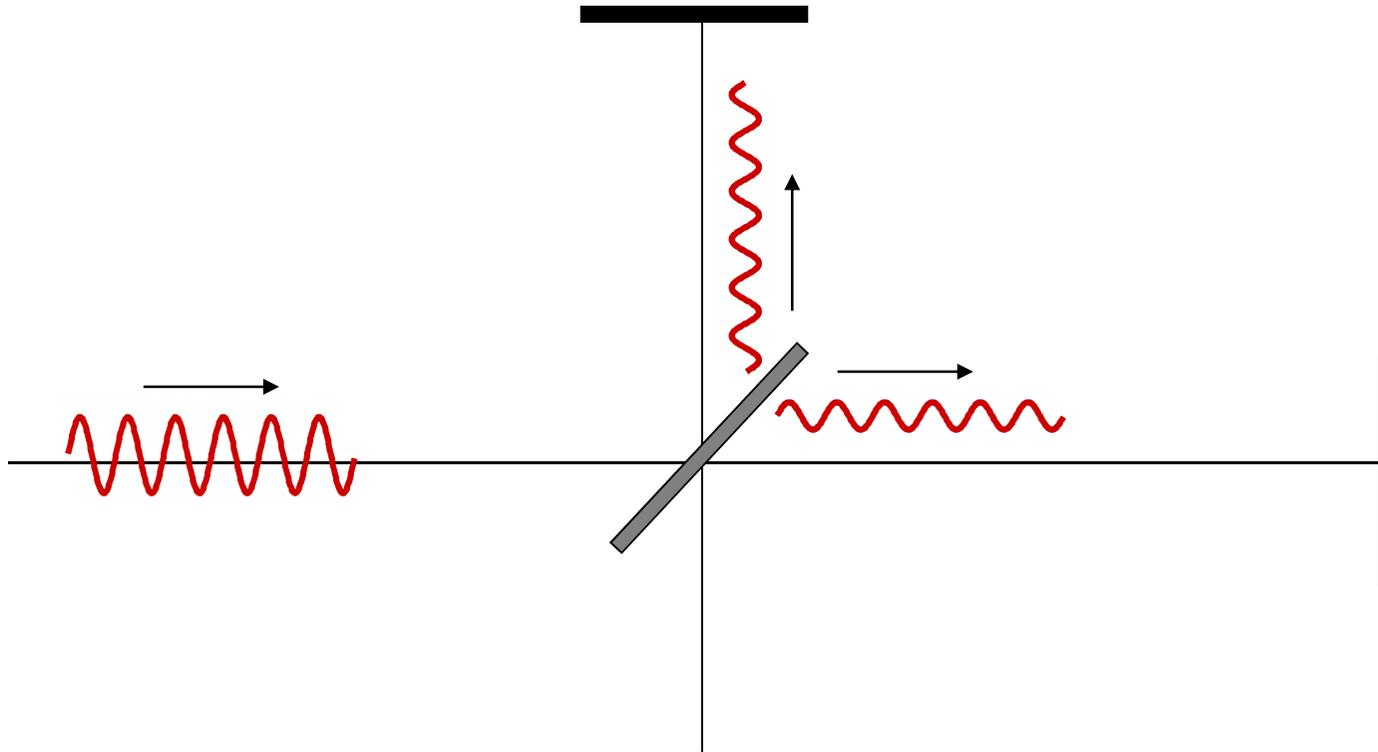


**interférence destructive**

# L'interféromètre de Michelson

Une source (le laser), une séparatrice, deux miroirs, un détecteur

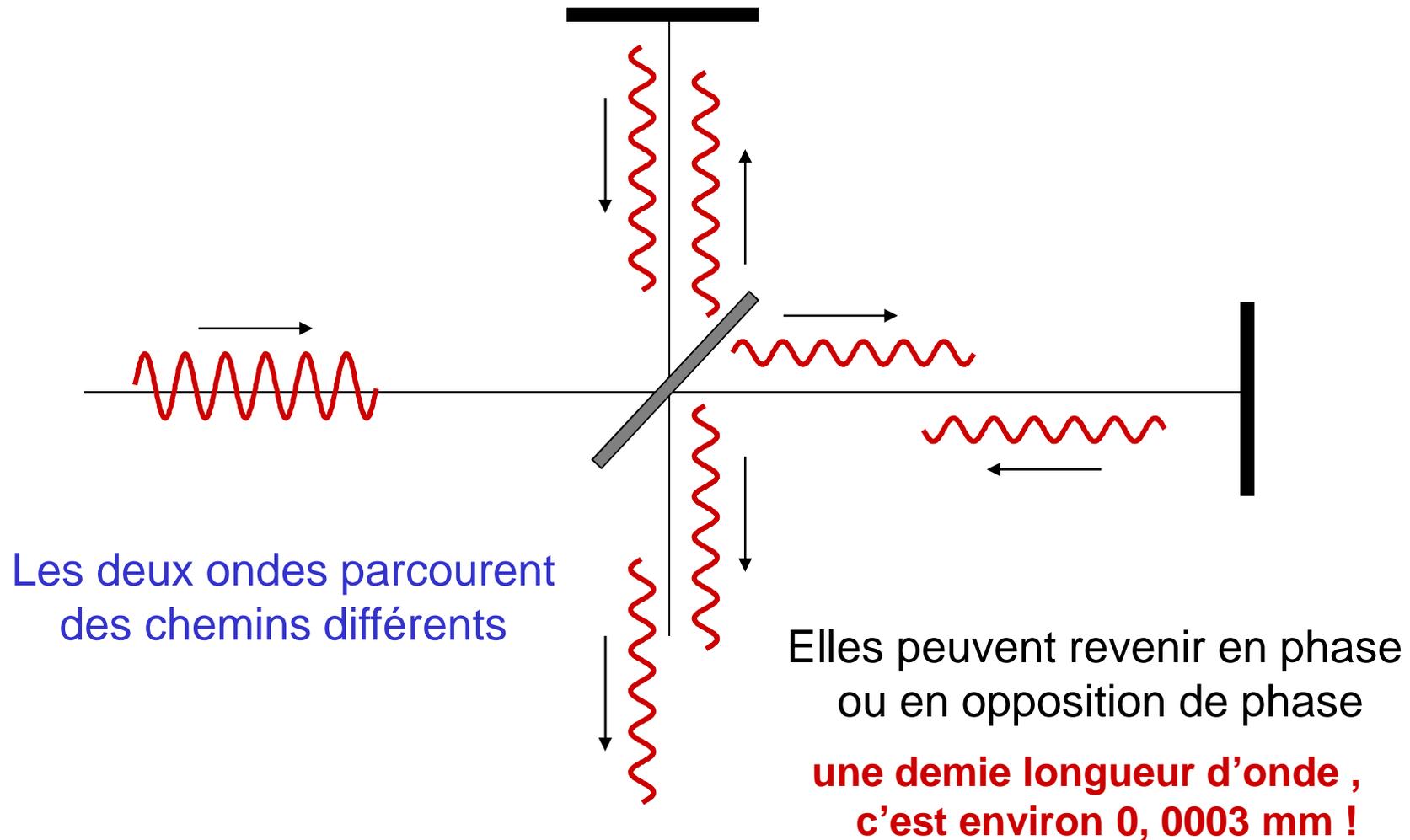
L'onde émise par le laser est séparée en deux parties  
qui se propagent dans les deux bras



# L'interféromètre de Michelson

Une source (le laser), une séparatrice, deux miroirs, un détecteur

L'onde émise par le laser est séparée en deux parties  
qui se propagent dans les deux bras



# Un laser pour détecter les ondes gravitationnelles

## **Théorie de la gravitation (Einstein 1916) :**

L'espace-temps est déformé en présence de matière

Un évènement violent (explosion de supernova) génère une onde gravitationnelle qui modifie les distances sur Terre :  $\Delta L / L \sim 10^{-22}$



L'interféromètre VIRGO  
près de Pise (Italie)  
joue le rôle d'une antenne  
de détection

Interféromètre de Michelson  
bras de 3 km

Laser YAG ultra-stable

Mesure de déplacement de  $10^{-18}$  m soit un millièème de la taille d'un noyau atomique

# Les applications de la cohérence temporelle

un faisceau monochromatique

Quelques applications (suite) :

- **Spectroscopie et métrologie**

Chaque atome ou molécule possède son propre spectre de raies

→ détection de composants

→ étude de la structure des niveaux

Depuis les années 70, on sait faire des lasers accordables

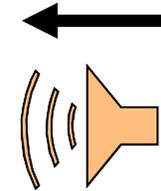
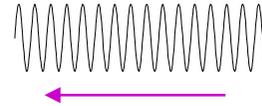
- on peut sélectionner une transition d'un atome ou d'une molécule donnée
- "balayer" la fréquence du laser autour de cette transition
- et même sélectionner la vitesse des atomes au sein d'un gaz

car fréquences et vitesses sont reliées par l'effet Doppler

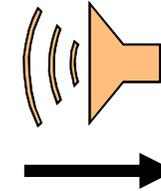
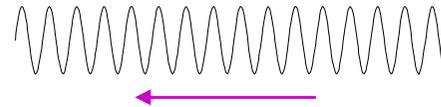
# L'effet Doppler

## Source sonore en mouvement

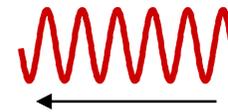
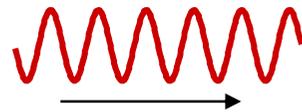
elle s'approche : le son est plus aigu



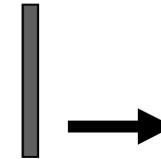
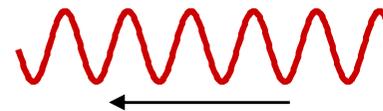
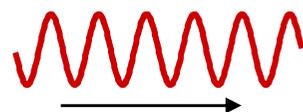
elle s'éloigne : le son est plus grave



## Faisceau laser (ou radio) réfléchi sur un objet en mouvement



l'objet s'approche : la fréquence réfléchi est augmentée



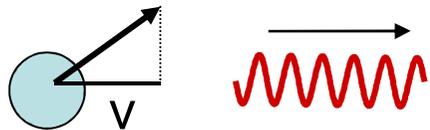
l'objet s'éloigne : la fréquence réfléchi est diminuée

**On peut utiliser l'effet Doppler pour mesurer la vitesse d'une source ou d'un réflecteur (radar)**

## L'effet Doppler élargit les raies spectrales ...

L'atome immobile émet  
ou absorbe à la fréquence  $\nu_0$

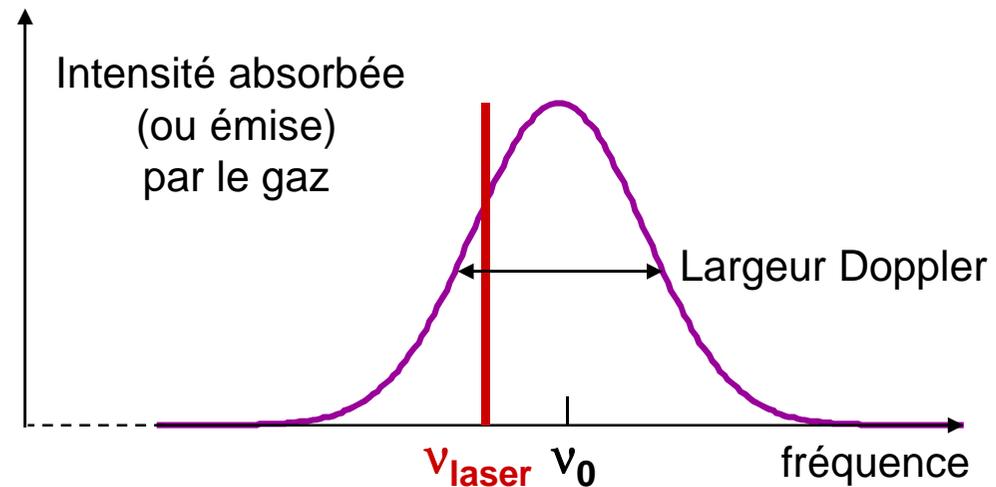
$$E_2 - E_1 = h\nu_0$$



L'atome en mouvement émet  
ou absorbe à la fréquence

$$\nu = \nu_0 (1 + v/c)$$

La distribution des  
fréquences absorbées ou  
émises reflète la  
distribution des vitesses  
dans le gaz

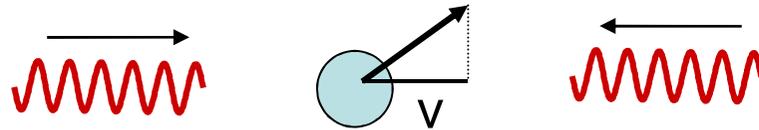


... mais on peut l'éliminer avec un laser

# Spectroscopie sans effet Doppler

Les lasers accordables permettent d'éliminer l'effet Doppler, par exemple en faisant absorber à l'atome deux photons de directions opposées issus du même laser

$$\nu = \nu_L (1 - v/c)$$

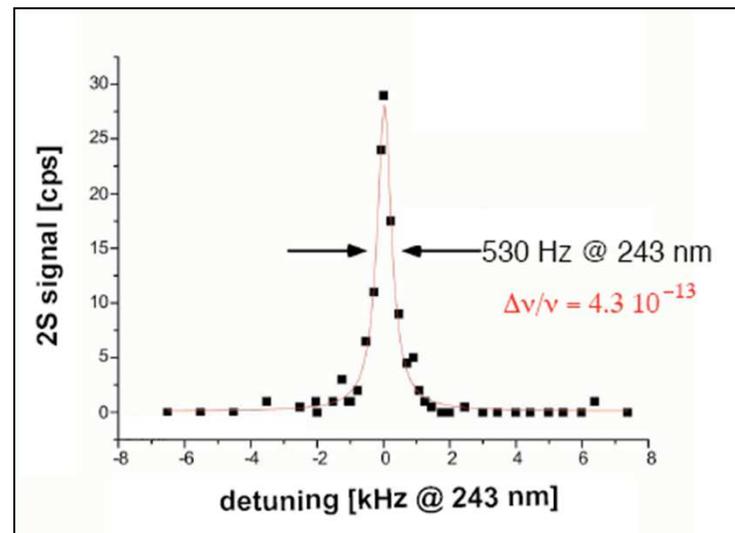
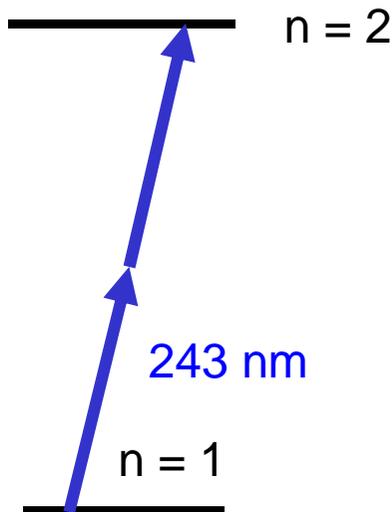


$$\nu = \nu_L (1 + v/c)$$

Les décalages Doppler se compensent

Il s'agit d'un **effet non linéaire** l'atome doit interagir avec les deux faisceaux.

**Exemple : transition 1S-2S de l'atome d'hydrogène**

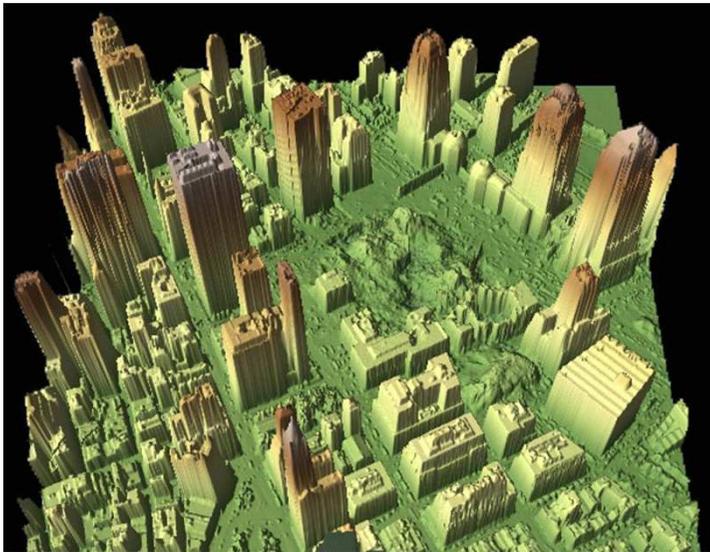
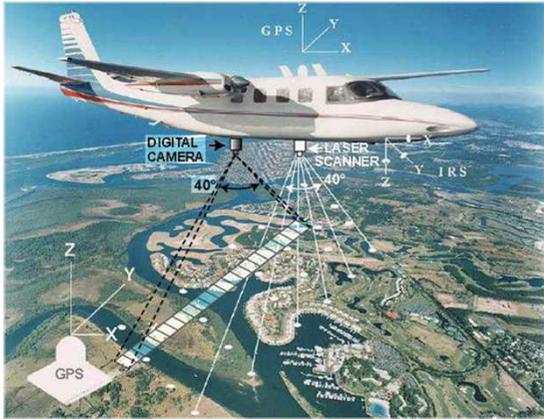


Groupe de  
T.W. Hänsch  
à Munich

# Le LIDAR

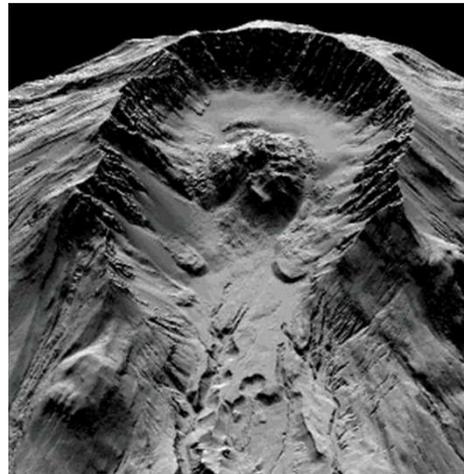
(Light Detection And Ranging)

Il peut être soit au sol, soit embarqué dans un avion ou un satellite (satellite CALIPSO lancé en avril 2006)



est l'équivalent du RADAR mais dans le domaine optique

Il est utilisé pour la cartographie  
et la géodésie  
**mesure de distance**



Eruption du Mont  
Sainte Hélène en 2004

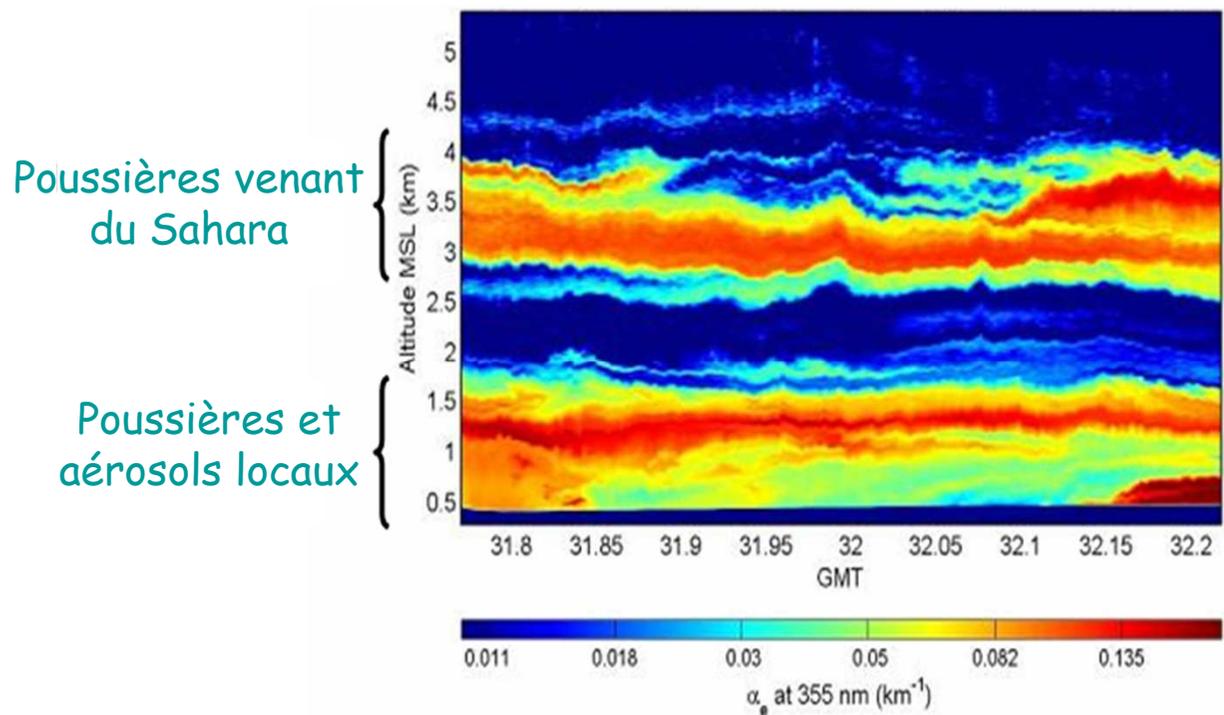
pour la climatologie et  
la météorologie  
**mesure de vitesse  
(décalage Doppler)**

ou la détection de molécules dans l'atmosphère  
**(décalage Raman)**



LIDAR

En pratique on observe la rétro-diffusion  
et on reconstitue le profil  
de la répartition des particules diffusantes



Le Sahara à Orsay

La pollution à  
Lyon

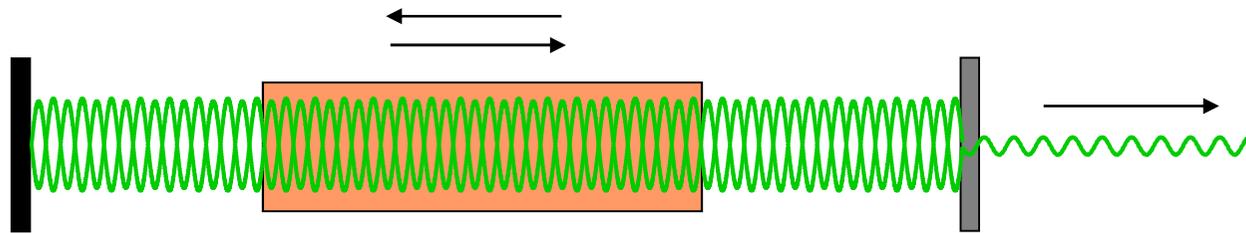
YAG triplé à 355 nm : meilleure efficacité de diffusion

# La cohérence temporelle : un faisceau monochromatique ?

Pour que l'onde revienne toujours en phase avec elle-même il faut que

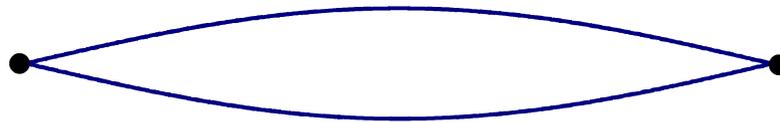
$$L = p \lambda_p / 2$$

p entier  
condition d'interférences constructives



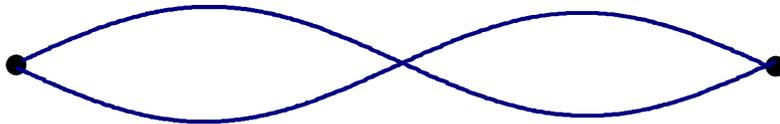
Analogie avec une corde vibrante (instrument de musique)

$$L = \lambda_1 / 2$$



Mode fondamental  
p=1

$$L = 2 \lambda_2 / 2$$



Premier harmonique  
p=2

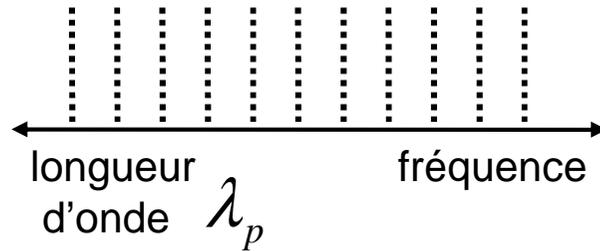
# La cohérence temporelle : un faisceau monochromatique ?

- Le laser ne peut osciller que sur un des modes de la cavité

$$L = p \lambda_p / 2$$

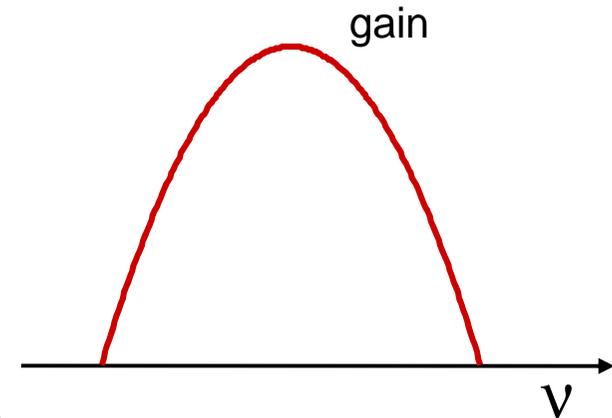
Ceux-ci sont régulièrement espacés en fréquence

$$\nu_p = \frac{c}{\lambda_p} = p \frac{c}{2L}$$



L'écart de fréquence entre modes est  $c / 2L$   
si  $L = 30 \text{ cm}$ , il vaut  $500 \text{ MHz}$

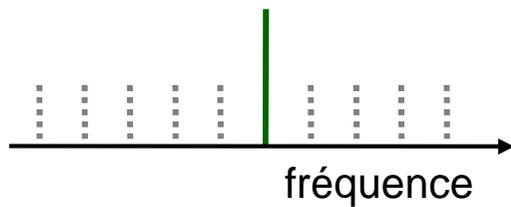
- Le laser ne peut osciller que sur une fréquence amplifiée par le milieu amplificateur, c'est-à-dire dans la courbe de gain de ce milieu
- En pratique, il y a des pertes dans la cavité : transmission du miroir de sortie, émission spontanée, diffusion, diffraction ...



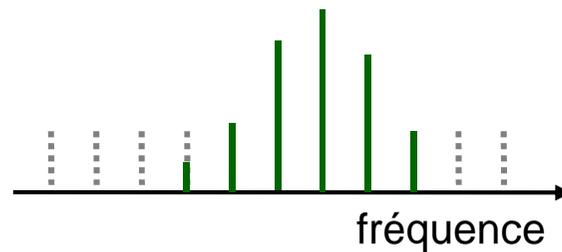
**L'oscillation laser ne peut démarrer que si le gain est supérieur aux pertes**

# La cohérence temporelle : un faisceau monochromatique ?

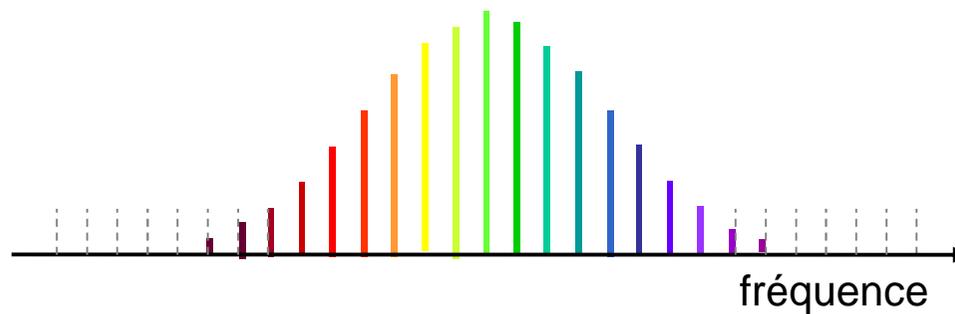
**La condition de gain est supérieure aux pertes peut être vérifiée pour un ou plusieurs modes de la cavité**



laser monomode (monochromatique)  
cavité courte ou élément(s) sélectif(s) dans la cavité



laser multimode



On souhaite parfois avoir un très grand nombre de modes ...

## Plan de la présentation

- L'émission stimulée et le principe de fonctionnement d'un laser
- Milieux amplificateurs, pompage, cavités, cristaux non-linéaires
- Les propriétés du rayonnement émis et quelques applications
- **Du laser monochromatique au laser blanc :**  
**des impulsions de plus en plus courtes**

## Des impulsions de plus en plus courtes

- Le premier laser fonctionnait en impulsions : **fonctionnement en "relaxé"**  
on pompe le milieu amplificateur avec un flash de lumière  
**l'émission laser se produit librement**  
on obtient une impulsion avec des oscillations de relaxation
- Plus efficace : le **fonctionnement en "déclenché"**  
on pompe le milieu amplificateur dans une cavité avec des pertes  
le milieu a le temps d'emmagasiner le maximum d'énergie  
**on supprime les pertes un court instant : le laser émet une impulsion**  
on obtient ainsi des impulsions de quelques nanosecondes ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ )
- Depuis quelques années, c'est la course aux impulsions de plus en plus courtes

**On sait maintenant produire des impulsions de quelques femtosecondes**

**( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ )**

**avec des lasers à modes "bloqués"**

# Les lasers pulsés pour mesurer les distances



Télémètre laser

Mesure de distance : temps mis par la lumière pour faire un aller-retour

Mesure de la distance Terre-Lune  
avec un laser YAG doublé pulsé

impulsions de 100 ps  
(aller - retour ~ 2 s)

Précision de 6 mm (20 ps)  
sur 384 000 km

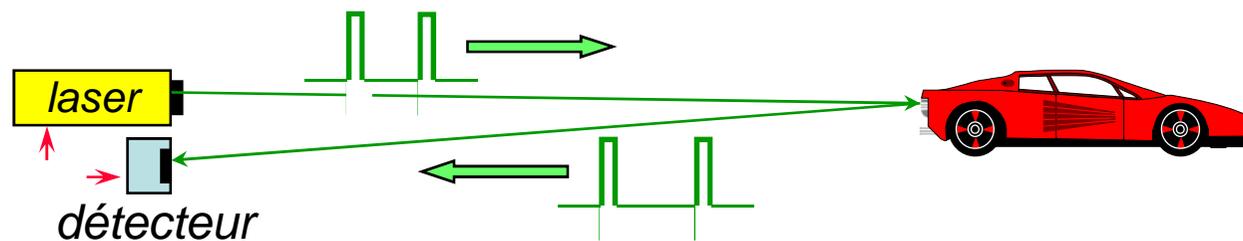


Telescope  
du CERGA  
Cote d'Azur

La Lune s'éloigne de la Terre de 3,8 cm par an

# Les lasers pulsés pour mesurer les vitesses

en plus des radars, les “jumelles laser”

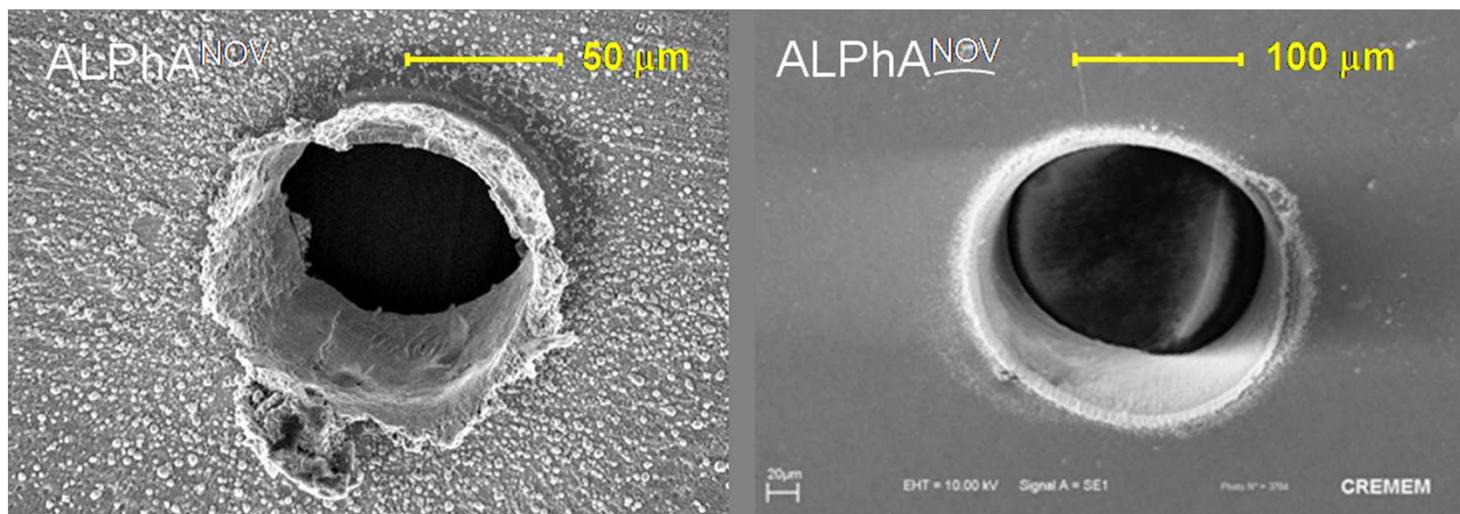


## Les lasers pulsés pour l'industrie ...

L'énergie lumineuse est concentrée dans le temps :  
on obtient donc une forte puissance instantanée pendant un temps très court

On peut percer ou graver un matériau sans produire d'échauffement  
ce qui évite l'apparition de défauts

Trou percé avec un laser dans du molybdène (Photothèque ALPhANOV)

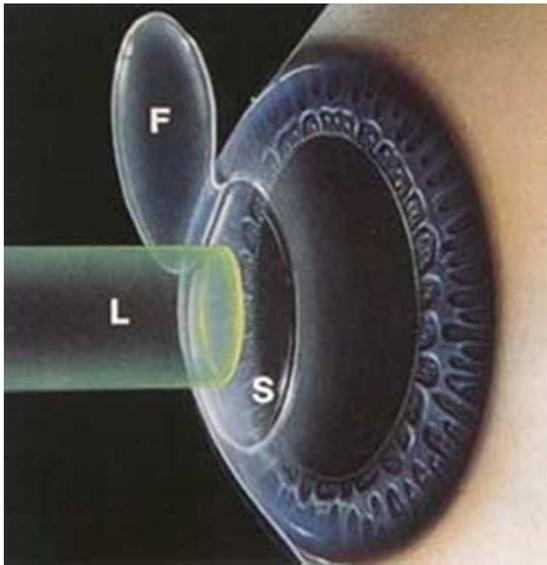


Impulsions quelques ns

Impulsions 500 fs

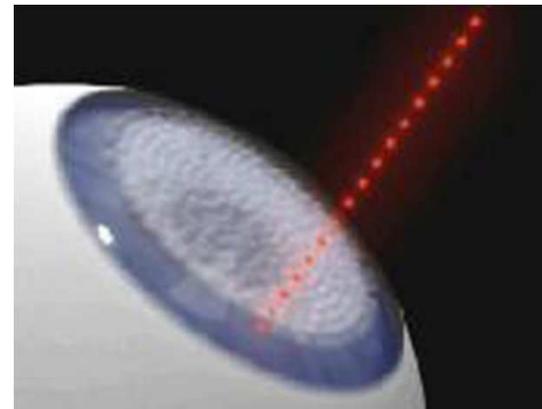
## ... et pour la médecine

### Chirurgie réfractive par la technique LASIK



On soulève un volet de cornée  
avant de rectifier la courbure  
de la cornée par photoablation  
(laser UV à excimère)

La découpe du mince volet de cornée  
n'est plus faite avec une lame  
mais avec un laser fs à 800 nm



# Les lasers pulsés pour voir les phénomènes ultra-rapides

Les lasers à impulsions courtes permettent d'étudier la dynamique des molécules et des électrons

principe de la stroboscopie

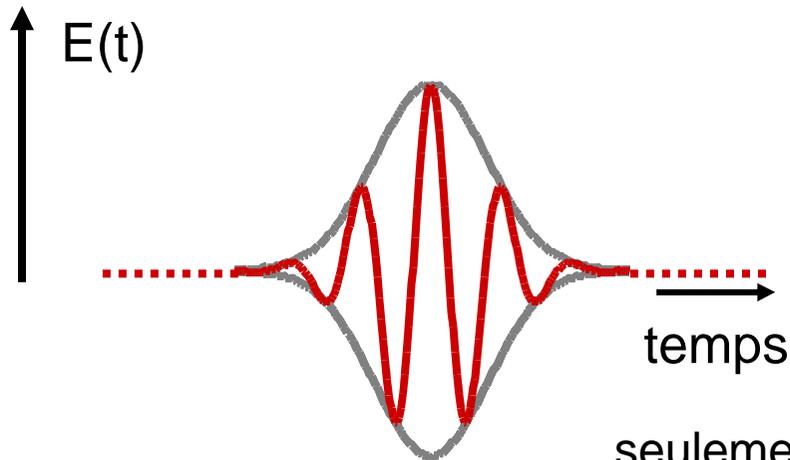


En pratique on utilise deux faisceaux issus du même laser mais décalés dans le temps : c'est la technique "pompe-sonde"

On peut étudier des phénomènes ultra-rapides, comme des réactions chimiques  
(Prix Nobel de chimie 1999 : A.H. Zewail)

et même le mouvement d'un électron avec des impulsions attosecondes  
(100 as = 0,1 fs)

# Les lasers femtosecondes



$$\begin{aligned}\lambda &= 600 \text{ nm} \\ \nu &= 500 \text{ THz} \\ T &= 2 \text{ fs}\end{aligned}$$

seulement quelques oscillations du champ !

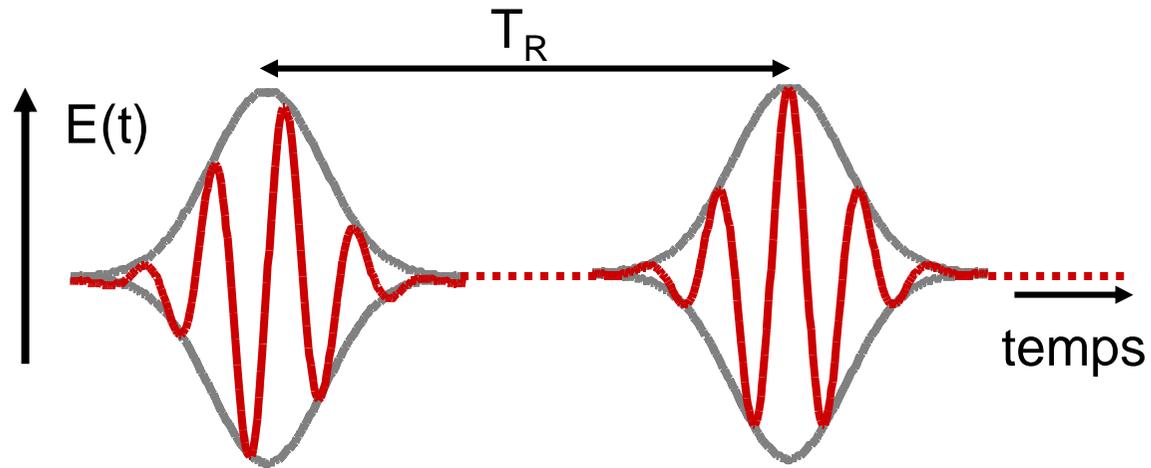
Plus l'impulsion est courte, plus la largeur spectrale du laser doit être grande

$$\Delta \nu \cdot \Delta t \geq \frac{1}{4\pi}$$

Le laser doit osciller sur un très grand nombre de modes avec des relations de phase bien définies

**on parle de lasers à modes bloqués**

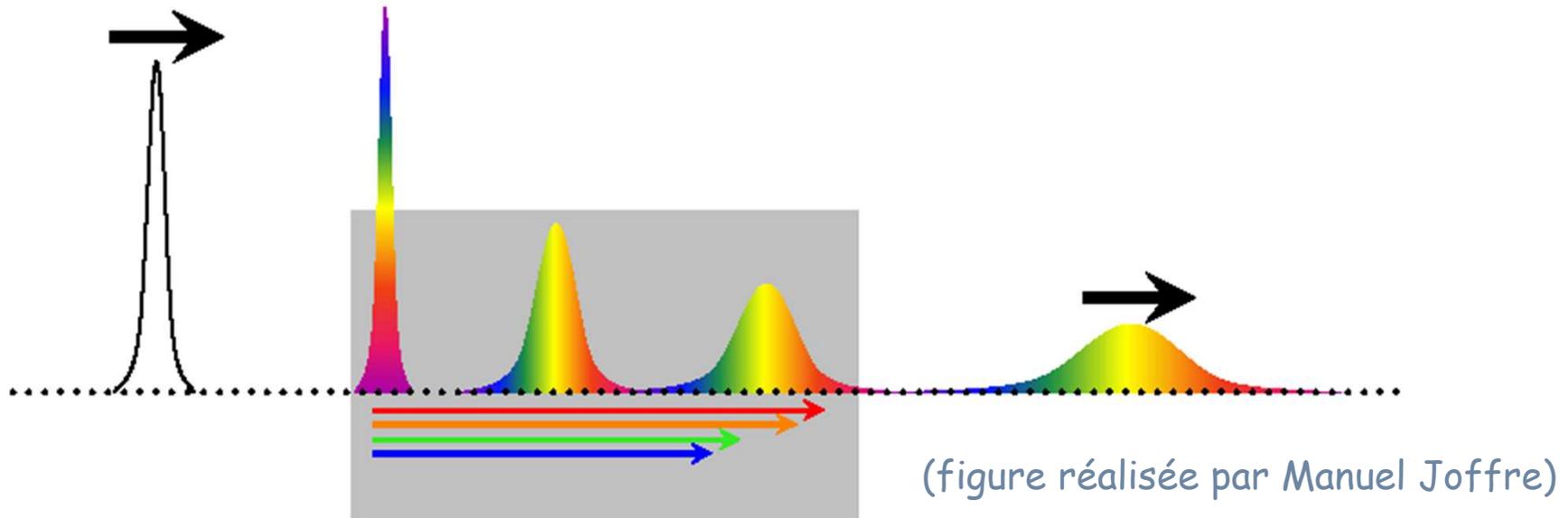
Quand un laser oscille sur un grand nombre de modes, on obtient des impulsions brèves séparées par le temps  $T_R$  d'un tour dans la cavité



Il faut que les modes soient bien synchronisés entre eux :  
qu'ils mettent tous le même temps pour faire un tour ...

## Un problème : la dispersion

Dans un milieu matériel, tel que le milieu amplificateur du laser, les fréquences les plus faibles (ici le rouge) se propagent plus vite que les fréquences plus élevées (ici le bleu)

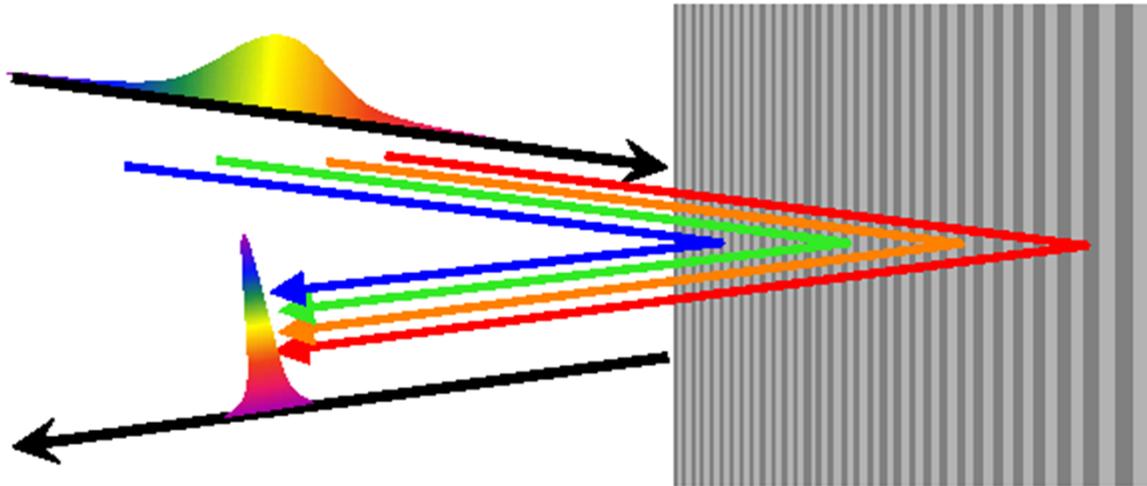


- La durée de l'impulsion est augmentée
- Un observateur voit sa fréquence varier : il y a "dérive de fréquence"

## Une solution : le miroir dispersif

Un miroir diélectrique est en général constitué d'un empilement périodique de couches transparentes d'indices différents.

La longueur d'onde réfléchie correspond à la période spatiale de l'empilement (interférence constructive à la réflexion).

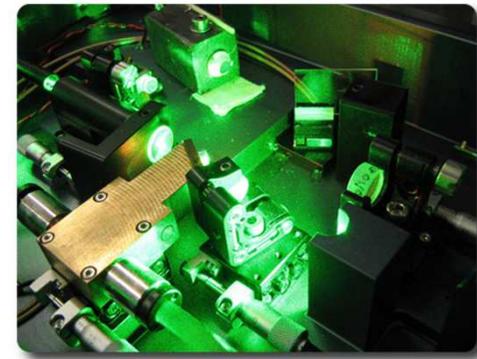


(figure réalisée par Manuel Joffre)

Dans un miroir dispersif la période spatiale de l'empilement varie avec la profondeur. Ici le bleu parcourt moins de chemin que le rouge : on parle de "dispersion négative".

## Dans un laser femtoseconde

- Un milieu amplificateur : un cristal de Ti:saphir (saphir dopé au titane) qui a une large bande de gain de 700 à 1100 nm
- Une cavité utilisant des miroirs dispersifs
- Une impulsion brève qui fait des allers-retours dans la cavité



Par rapport à un laser continu, la puissance instantanée se trouve multipliée par un facteur considérable, de l'ordre du nombre de modes qui oscillent

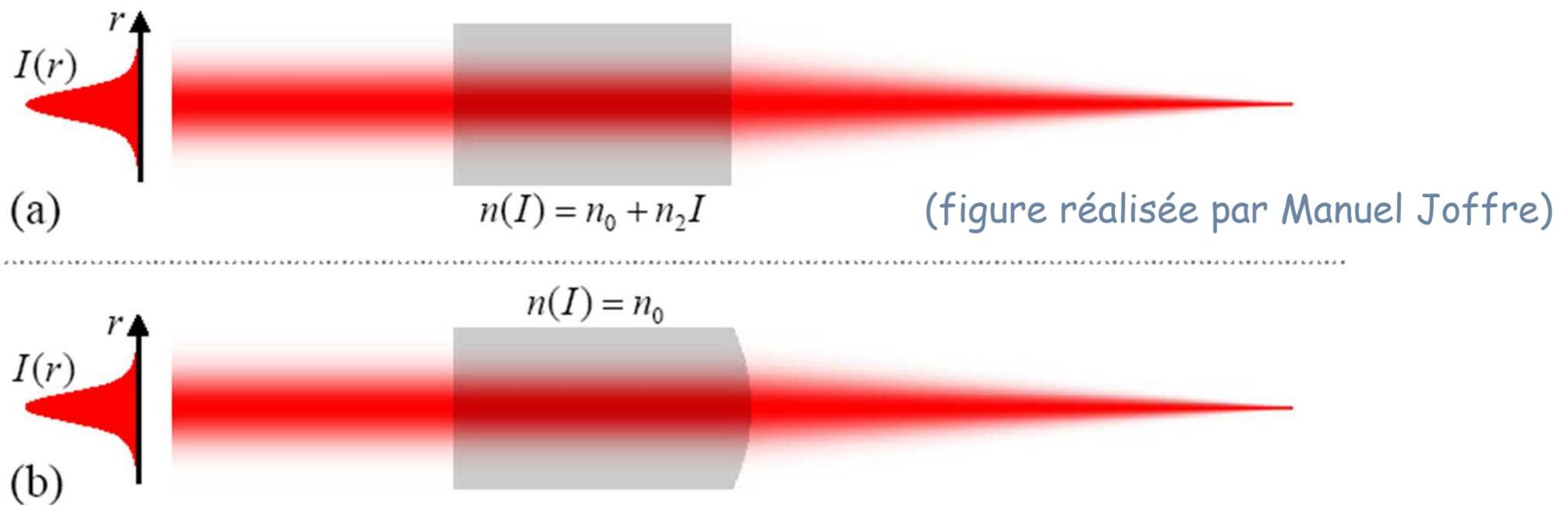
Des effets non linéaires se manifestent, en particulier l'effet Kerr optique

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

$$n(I) = n_0 + n_2 I$$

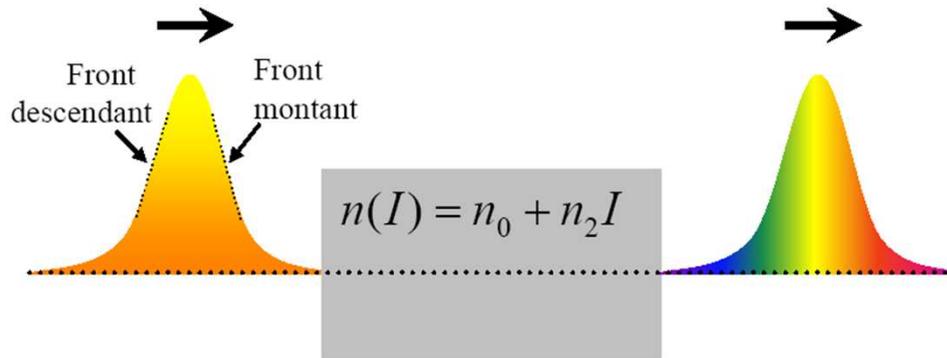
Première conséquence :

Le chemin optique (produit de l'indice par la distance parcourue)  
se trouve augmenté sur l'axe du faisceau :  
on a l'équivalent d'une lentille convergente



Le faisceau est focalisé par le milieu amplificateur

## Deuxième conséquence : l'automodulation de phase



(figure réalisée par Manuel Joffre)

Pendant le front montant de l'impulsion, l'éclairement du milieu augmente.  
L'épaisseur optique du milieu augmente ce qui retarde la phase :  
il en résulte un glissement vers le rouge du début de l'impulsion

Par effet inverse, on a un glissement vers le bleu de la fin de l'impulsion

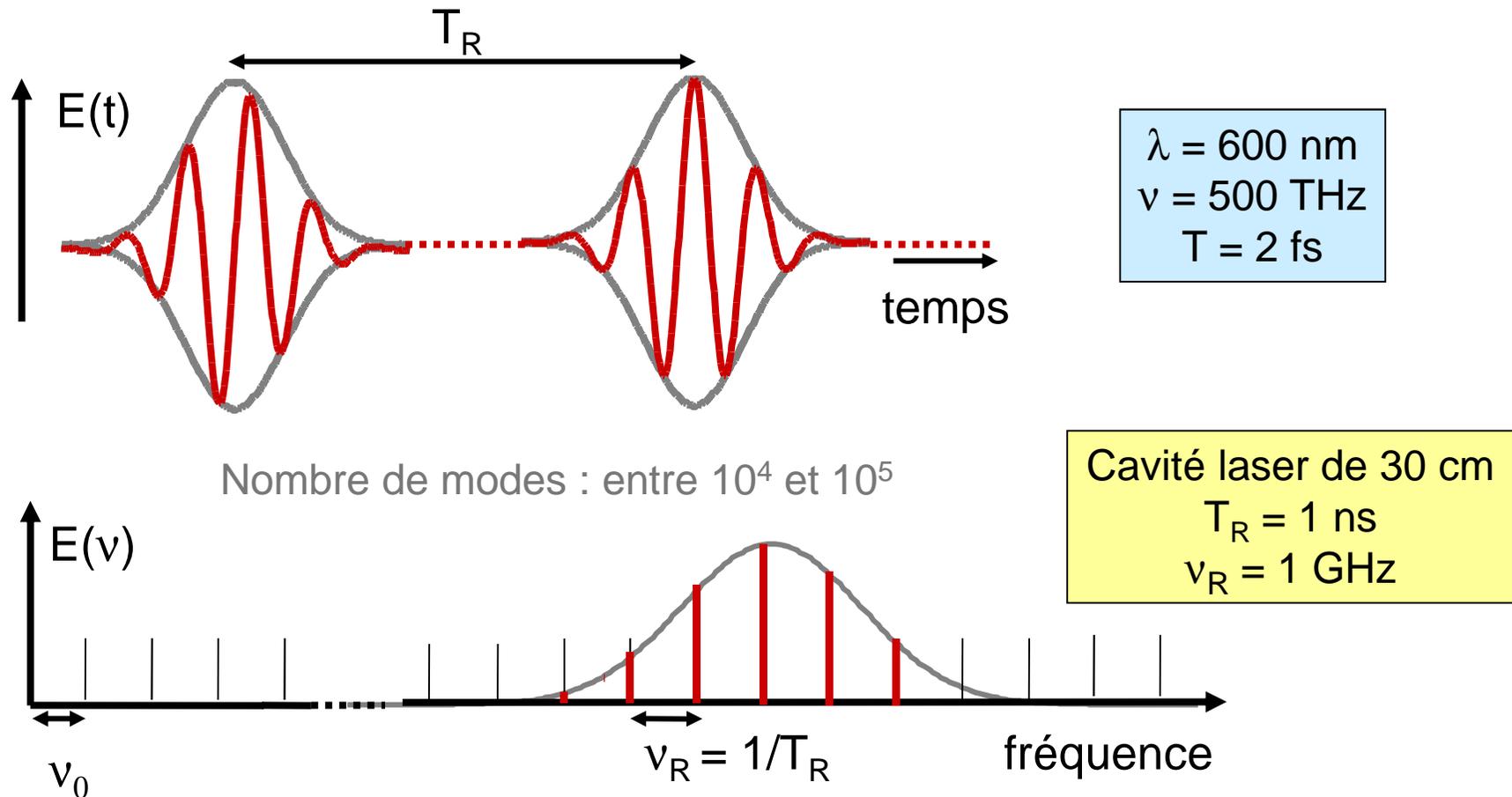
Il y a apparition de nouvelles fréquences,  
alors que la durée de l'impulsion n'est pas modifiée

**Le spectre est élargi**

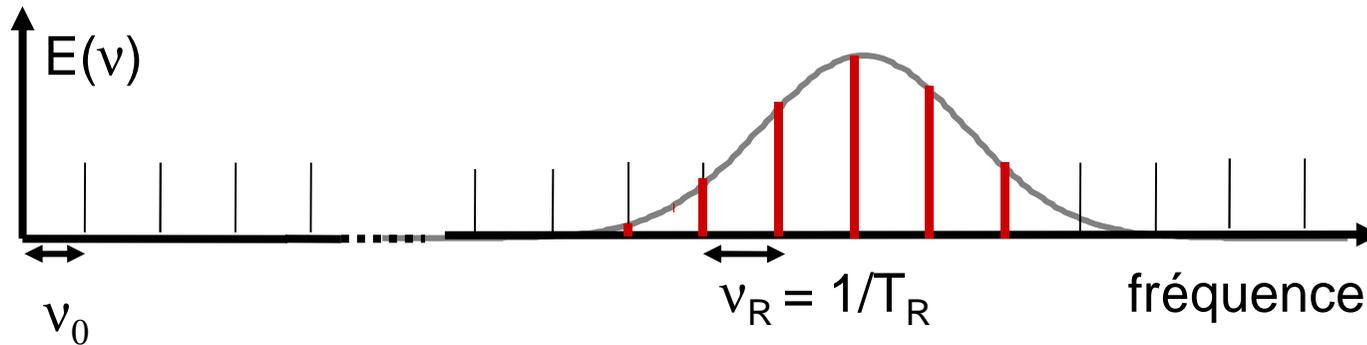
Grâce à l'effet Kerr optique, la forme spatiale et temporelle de l'impulsion s'adapte pour que la condition de bouclage de la cavité soit parfaitement assurée : on obtient un "soliton optique"

### A la sortie du laser :

des impulsions dont le spectre est un peigne de fréquences



# Les lasers femtosecondes pour la métrologie des fréquences optiques

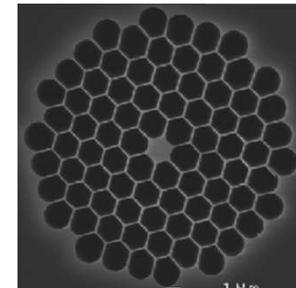
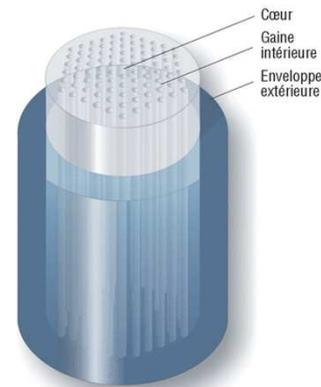


On compare la fréquence à mesurer à celle d'une des dents du peigne de fréquences

## Pour étalonner le peigne

on étend encore sa largeur spectrale dans un matériau non-linéaire, par exemple un fibre à cristal photonique

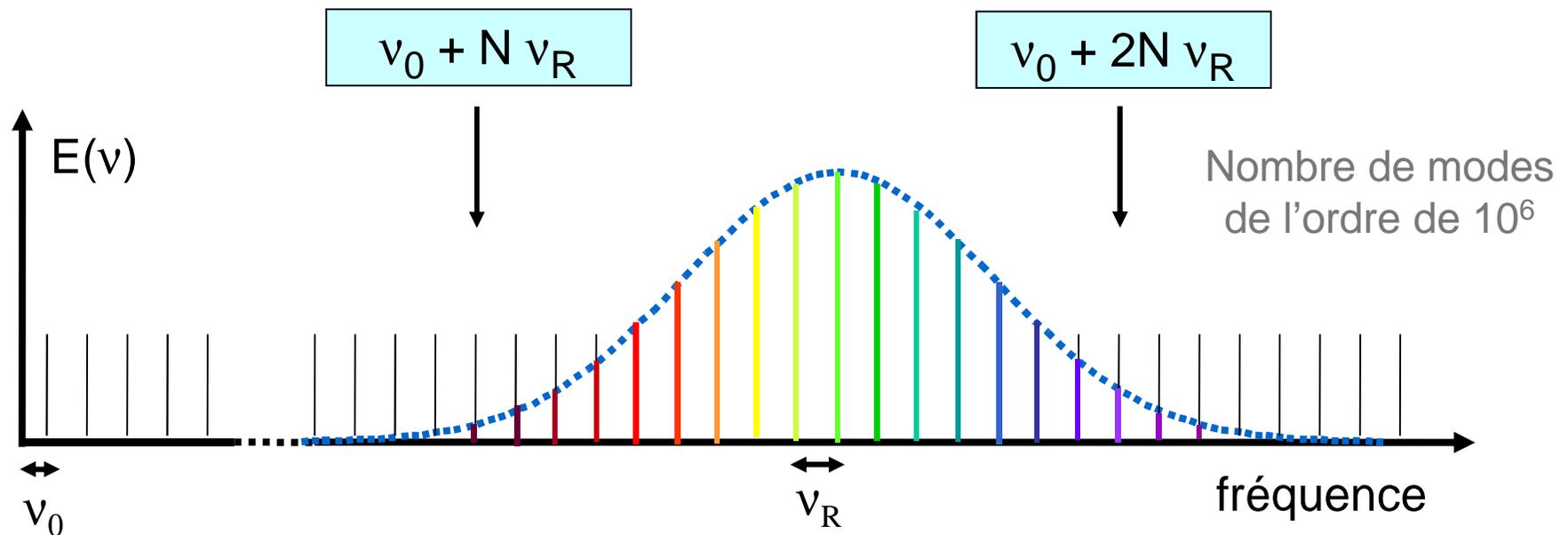
Lors de la propagation dans la fibre, il y a génération de fréquences différences et de fréquences sommes



cœur de la fibre  
1,7 μm

Le peigne est alors suffisamment large pour contenir à la fois  
une fréquence et son harmonique

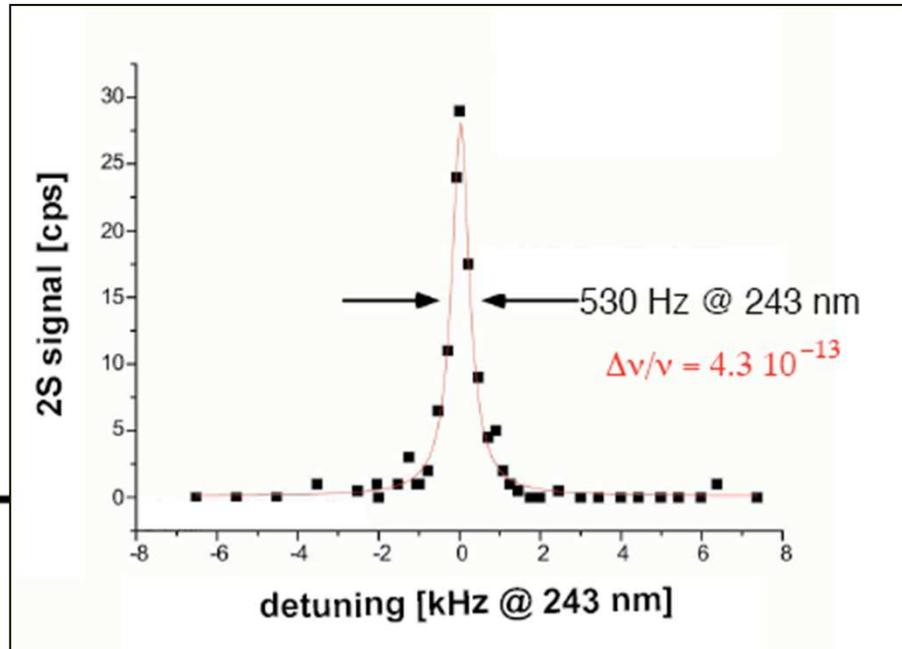
**ce qui permet une mesure absolue de la fréquence par auto-référence**



En comparant la fréquence du premier pic doublée à celle du second pic, on obtient  $\nu_0$   
 $\nu_R$  est mesuré directement par comparaison avec l'horloge à Cs

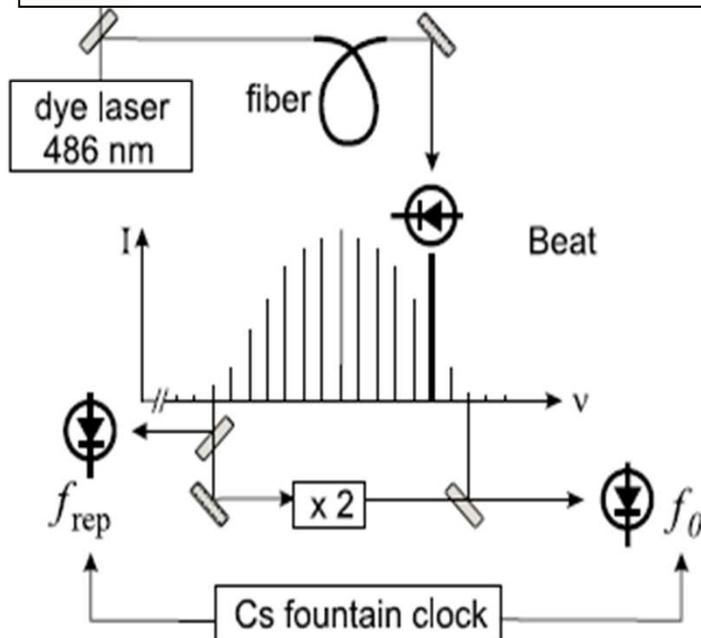
L'ensemble du peigne de fréquences se trouve alors étalonné

**On a une "règle graduée" en fréquences**



La fréquence de la transition 1S-2S de l'atome d'hydrogène a été mesurée avec une précision de  $4.2 \times 10^{-15}$

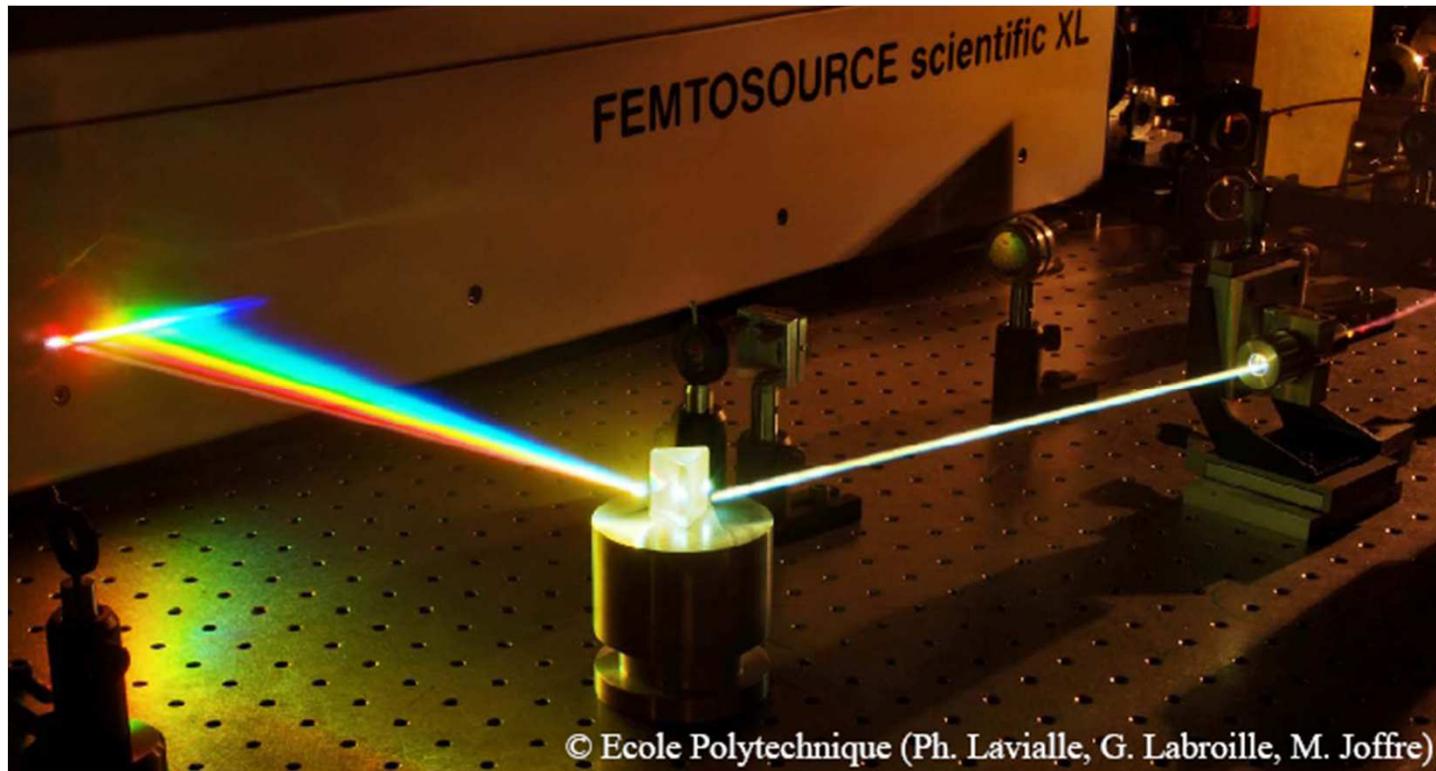
Test de l'invariance des constantes fondamentales : pas d'effet observé au niveau de  $10^{-15}$  par an



Les peignes de fréquences permettent de synthétiser des fréquences optiques et de les comparer à un niveau de précision de  $10^{-19}$  !  
Science **303**, 1843 (2004)

## Les lasers sont des sources de lumière cohérente spatialement et temporellement

Lumière issue d'un laser femtoseconde, décomposée spectralement par un prisme.



**C'est une lumière blanche, mais elle est cohérente !**

**Merci de votre attention !**

Un livre auquel j'ai emprunté  
certaines de mes figures

