

Les lasers

- un principe de fonctionnement unique
- des réalisations variées
- des applications multiples

Lucile JULIEN

Société astronomique de Montgeron
19 novembre 2015

lucile.julien@lkb.upmc.fr

Professeure (émérite)

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



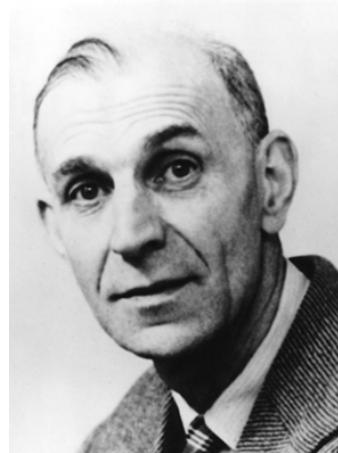
et chercheuse

Laboratoire Kastler Brossel



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

En 2010, les lasers ont eu 50 ans

Le premier laser a fonctionné en mai 1960 aux Etats-Unis

- **Comment reconnaît-on un faisceau laser ?**
- **Quelles sont les applications des lasers ?**
- **Comment fonctionnent-ils ?**

mais d'abord, parlons un peu de la lumière ...

2015 : année internationale de la lumière et des techniques utilisant la lumière !



<http://light2015.org>

des anniversaires :

- 1015** : traité d'optique d'Ibn Al-Haytham (Alhazen)
- 1815** : la nature ondulatoire de la lumière par Fresnel
- 1865** : les ondes électromagnétiques décrites par Maxwell
- 1915** : la lumière dans l'espace-temps par Einstein
- 1965** : découverte du fond diffus cosmologique par Penzlas et Wilson
et développement de la fibre optique par Kao

et de nombreux évènements en France :

expositions, conférences, théâtre, installations ...

<http://www.lumiere2015.fr/>



Qu'est-ce que la lumière ?

trois façons de la décrire ... toutes pertinentes !

un rayon lumineux →

(optique géométrique)



Qu'est-ce que la lumière ?



Qu'est-ce que la lumière ?

trois façons de la décrire ... toutes pertinentes !

un rayon lumineux 

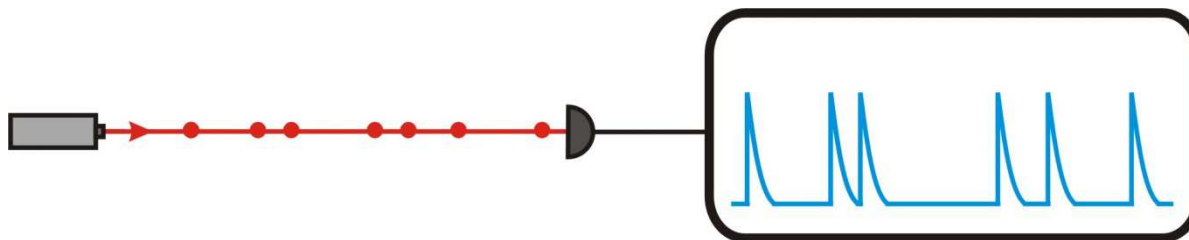
(optique géométrique)



des particules ● ● ● ● ● (les photons)

(optique quantique)

Observation expérimentale : un faisceau de lumière atténué produit des « clics » sur un détecteur



Qu'est-ce que la lumière ?

trois façons de la décrire ... toutes pertinentes !

un rayon lumineux



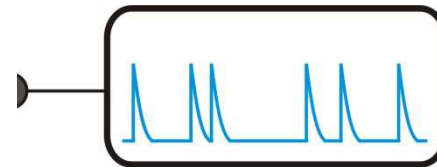
(optique géométrique)



des particules



(optique quantique)



une onde



(optique ondulatoire)



La lumière : une onde électromagnétique

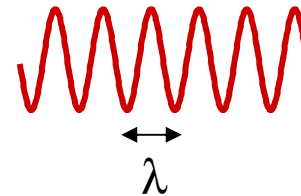
qui se propage dans le vide à la vitesse

$$c = 299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1}$$

Elle oscille à une fréquence f très élevée.

Sa fréquence est son nombre d'oscillations par seconde

Sa longueur d'onde λ est le chemin qu'elle parcourt pendant une oscillation

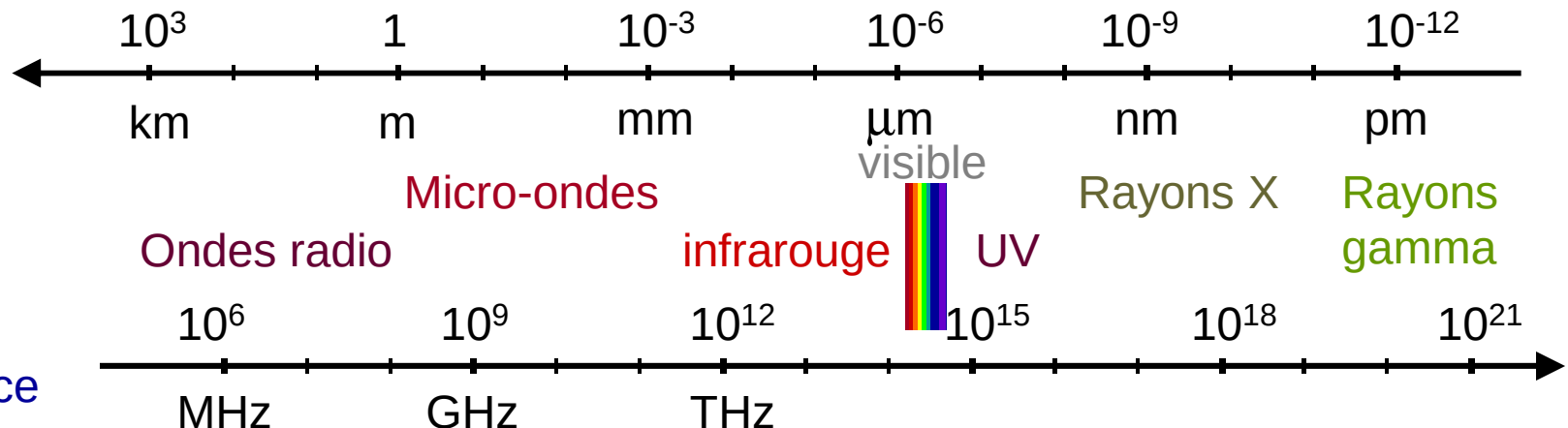


$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Plus la fréquence est grande, plus la longueur d'onde est courte

Longueur d'onde

λ (m)

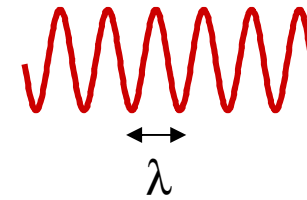


f (Hz)
Fréquence

Notre oeil n'est sensible qu'à certaines longueurs d'onde



c'est le spectre visible



dans le visible
à chaque longueur d'onde λ
correspond une couleur

Lumière blanche dispersée par un prisme de verre

Au milieu du spectre visible, la fréquence de la lumière est d'environ 500 THz,
soit **500 000 milliards d'oscillations par seconde**
et la longueur d'onde est d'environ 600 nm
soit **0,0006 mm**

Revenons aux lasers :

- Comment reconnaît-on un faisceau laser ?**
- Quelles sont les applications des lasers ?**
- Comment fonctionnent-ils ?**

Comment reconnaît-on un faisceau laser ?



l'arme du jedi ?

Non : ce ne sont pas des lasers !



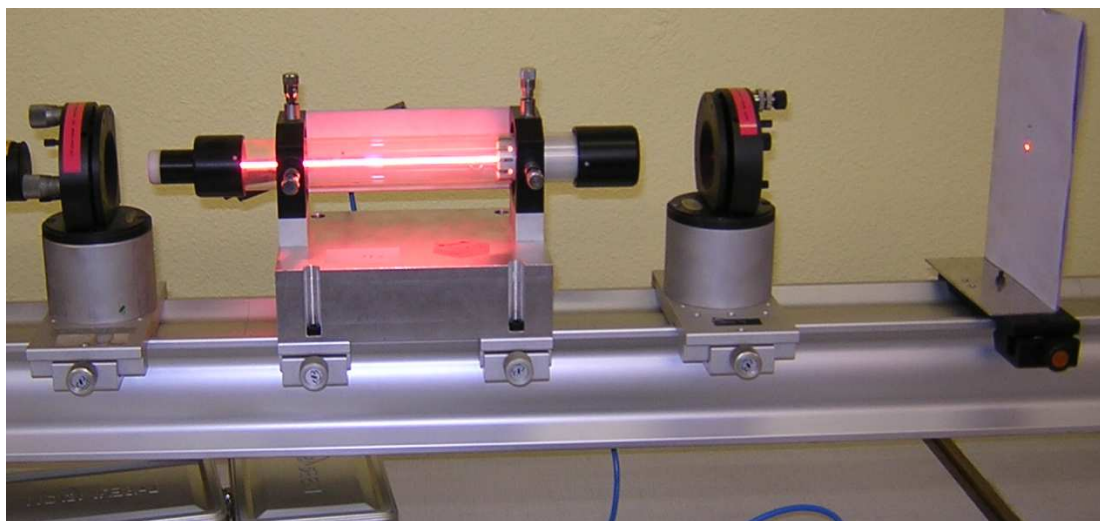
“Sabre laser” = “light saber”
sabre de lumière

Des lasers, des vrais :



photo non contractuelle

Un pointeur laser (rouge ou vert)



Un laser hélium- néon
(rouge)

On ne peut pas entrechoquer les faisceaux.

On ne voit pas le faisceau dans l'air,
mais seulement quand il est arrêté par un obstacle ...

... sauf s'il est très puissant et qu'on regarde presque dans l'axe.

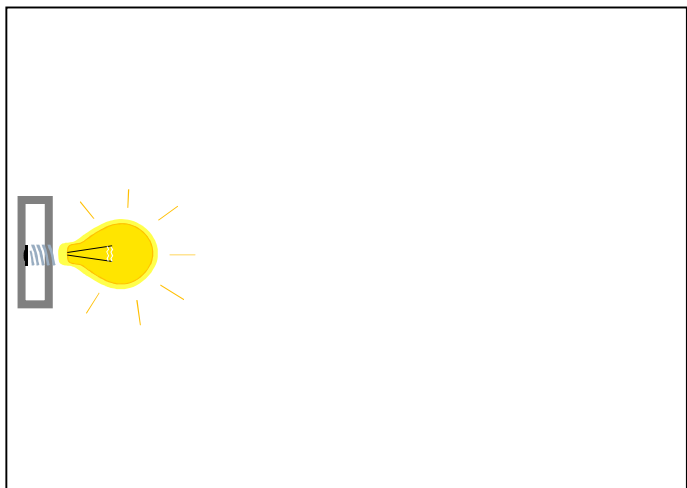


Photo Nicolas Treps

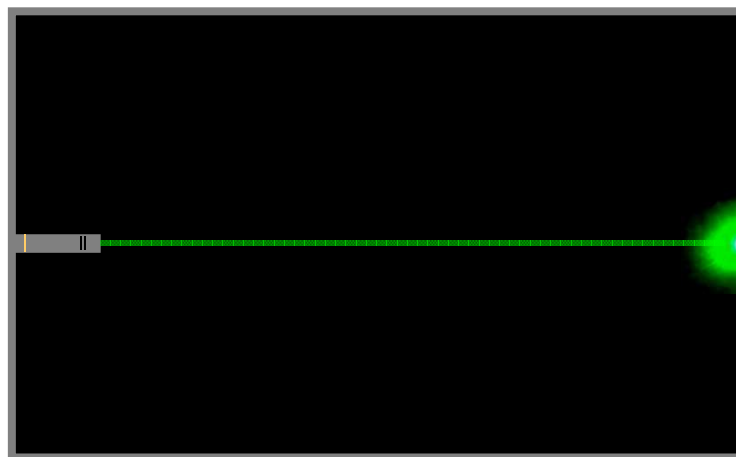
en 2005
à Paris

Un faisceau fin et directif
Un faisceau monochromatique

A quoi reconnaît-on un faisceau laser ?



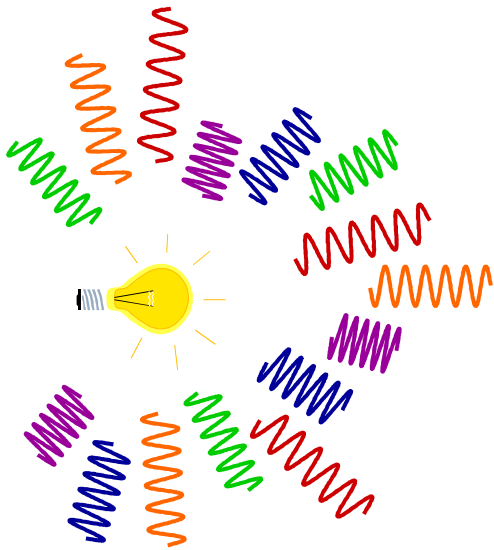
La lumière émise par une lampe éclaire dans toutes les directions



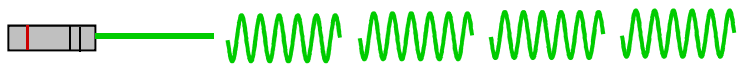
Le laser émet un faisceau fin et directif
Sa lumière est d'une couleur pure

Ce que nous voyons du faisceau laser : la lumière diffusée vers nos yeux par un obstacle qu'il rencontre (mur, papier, poussière, fumée, ...)

En décrivant la lumière avec des photons



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 et en couleur

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

De la lumière concentrée :

la cohérence spatiale

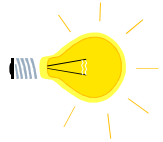
De la lumière bien ordonnée :

la cohérence temporelle

De la lumière concentrée

... danger !

Danger ?



A un mètre de distance, une lampe à incandescence de 100 W (soit 5 W lumineux) fournit un éclairement de $0,0004 \text{ mW/mm}^2$



Un laser de 5 W focalisé sur 1 mm^2 fournit un éclairement local de 5 W/mm^2 , soit 5000 mW/mm^2

plus de 10 millions de fois plus intense !

Le seuil de dommage de l'œil au milieu du spectre visible est d'environ 2 mW/mm^2

De l'énergie lumineuse de direction bien définie

Pointeur laser



Spectacle

On peut l'utiliser le faisceau laser pour :

- Matérialiser une ligne droite
- Concentrer l'énergie sur une petite surface

Applications dans l'industrie, le bâtiment, la médecine, la recherche ...



Dans l'industrie

Découpe de plaques, tubes, pièces métalliques ...



Lasers IR

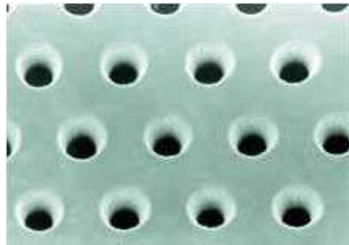
... et aussi de bois, de tissu,
de plastique

Le laser est un outil universel

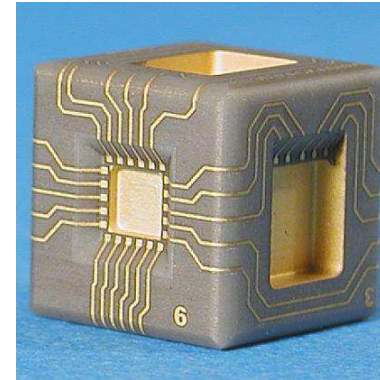


Dans l'industrie (suite)

Perçage

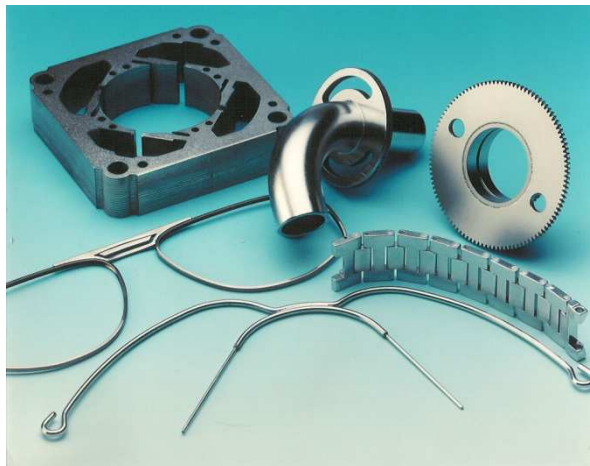


Trous de 10 μm dans un film en polymères



Usinage

Supports en céramique pour microélectronique



Petites pièces mécaniques

Soudage



Réservoir de carburant pour fusée

Dans le bâtiment

Pour l'alignement sur les chantiers



Laser de canalisation



Niveau laser

**et aussi pour
la mesure des distances**



Télémètre laser

Dans le bâtiment (suite)

**Nettoyage de la pierre des monuments et des sculptures :
sans eau, sans produit chimique, sans abrasif, sans pression**



Façade de la cathédrale Notre Dame de Paris

Restauration du Musée national
du Moyen Age



Pour la médecine

Dermatologie

Destruction de tumeurs, angiomes, traitement de l'acné ...

et " esthétique "

... détatouage, couperose, taches de pigmentation,
épilation définitive ...

... ou stimulation de la repousse des cheveux !



Chirurgie de contact " bistouri laser "



Destruction de tumeurs, réparation des
hernies discales, urologie, gynécologie, ...



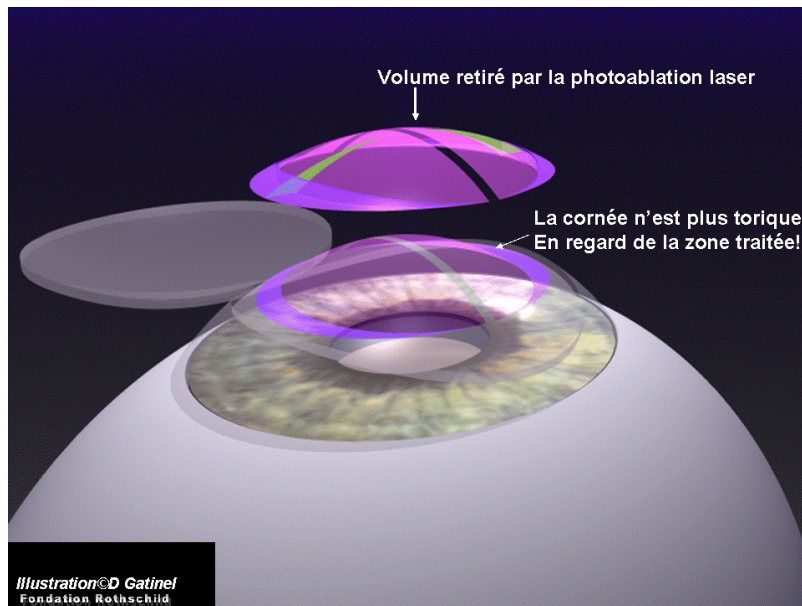
**La profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde et du tissu
Pour chaque usage, un laser différent**

Pour la médecine (suite)

Ophtalmologie

Traitement du glaucome

Chirurgie réfractive



Traitement du décollement de la rétine

Laser vert



Découpe d'un mince volet de cornée

Laser rouge/IR en impulsions

Rectification de la courbure de la cornée

Laser UV

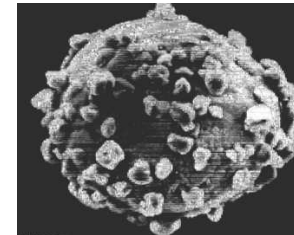
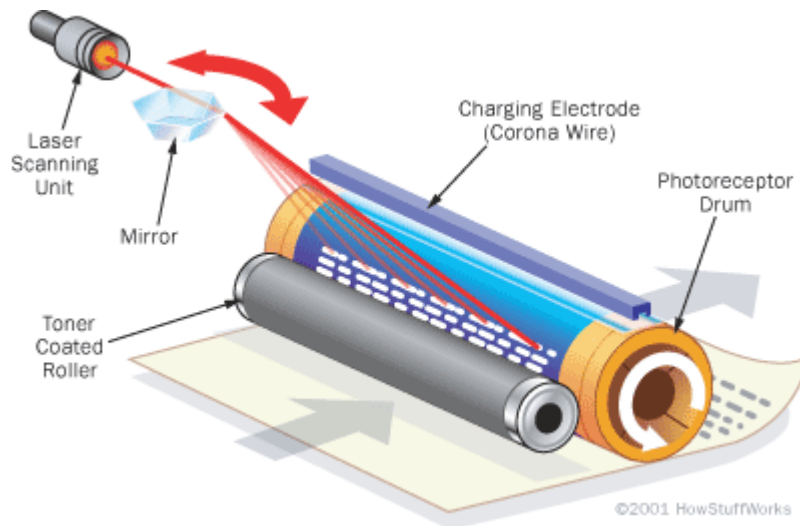
Au bureau ou à la maison

Imprimante laser

Le toner se colle au tambour
au niveau du spot laser

Il est ensuite déposé sur la feuille de papier

Grâce au laser, vitesse et la résolution sont meilleures qu'avec un jet d'encre



Particule de toner

Pour stocker l'information et la lire



Lecture de code-barres

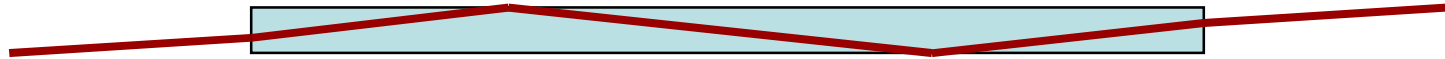
Lasers à semiconducteurs (« diodes lasers »)

CD et DVD

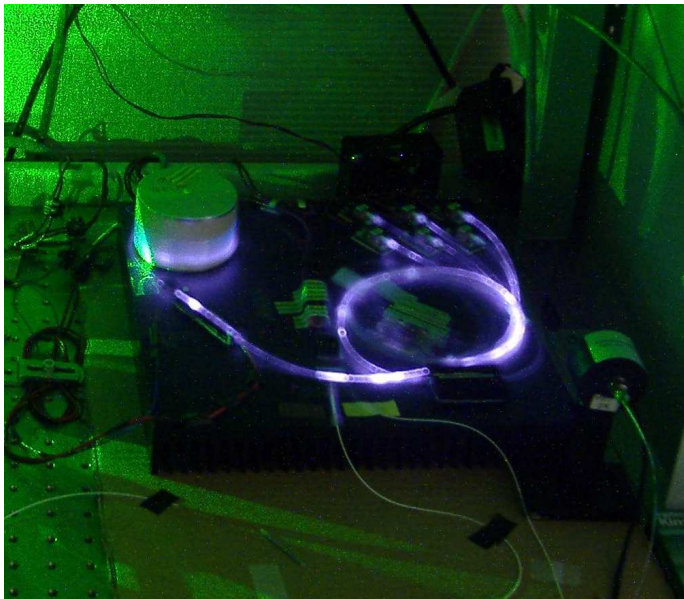


Cette énergie lumineuse peut être transportée par fibre optique

Principe de la fibre



Nombreuses applications ...



laser à fibre



médecine



restauration



Transporter l'information

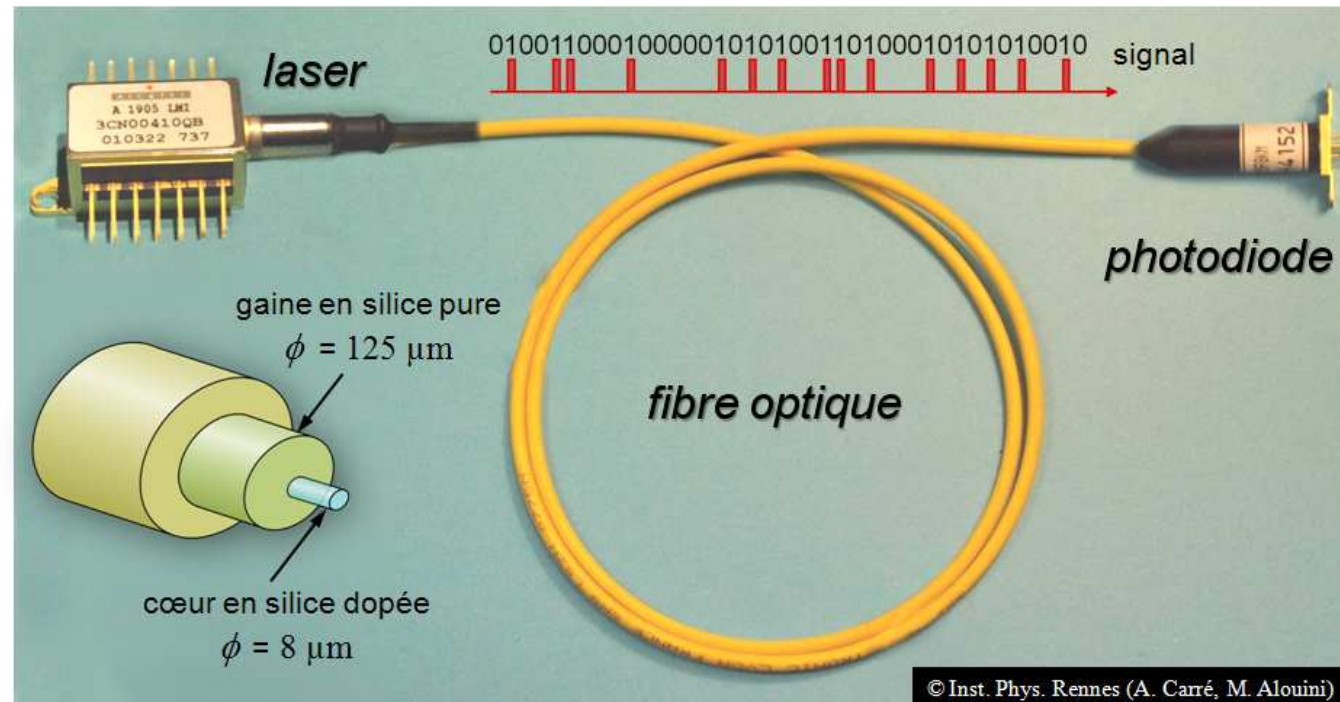
grâce aux fibres optiques



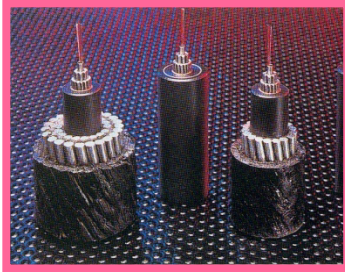
Prix Nobel de physique 2009

Charles K. Kao

Les pertes à grande distance sont plus faibles que celles qu'on a pour un signal électrique dans un conducteur métallique

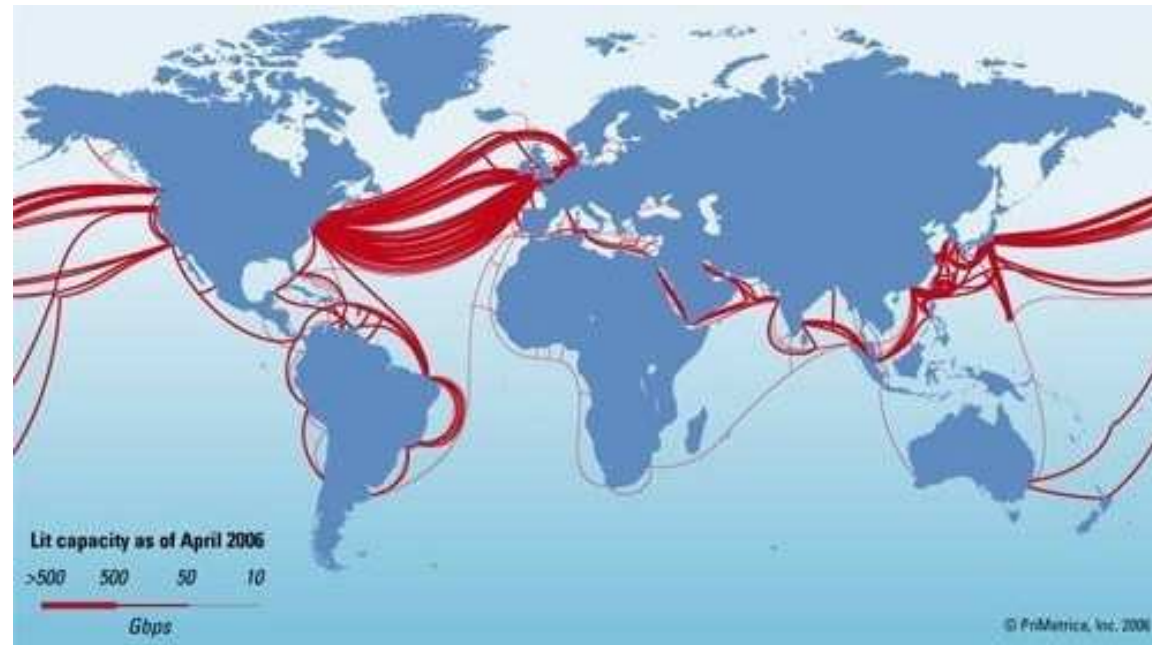


Transporter l'information



On peut coupler les lasers avec des fibres optiques qui guident la lumière pendant des milliers de km

Le réseau mondial sous-marin de câbles de fibres optiques



80% des communications à longue distance dans le monde le sont grâce au réseau de fibres optiques

Le multiplexage (superposition de signaux de différentes fréquences) permet d'avoir jusqu'à 256 canaux par fibre et d'augmenter le débit

Comment fonctionne un laser ?

Le mot **LASER** est un acronyme :

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Amplification 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

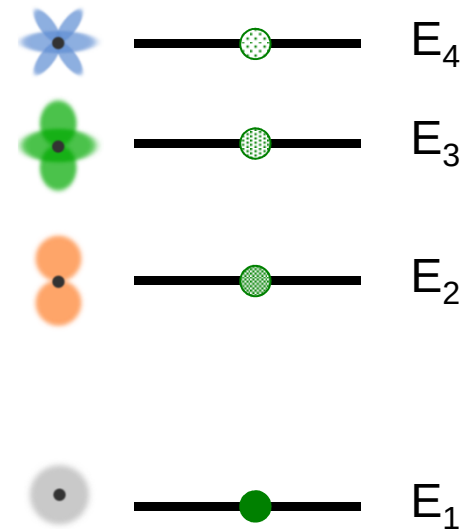
L'interaction atome - rayonnement



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 :

$$E_2 - E_1 = h f$$

(condition de résonance)

- Il le fait lors de "sauts quantiques"

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

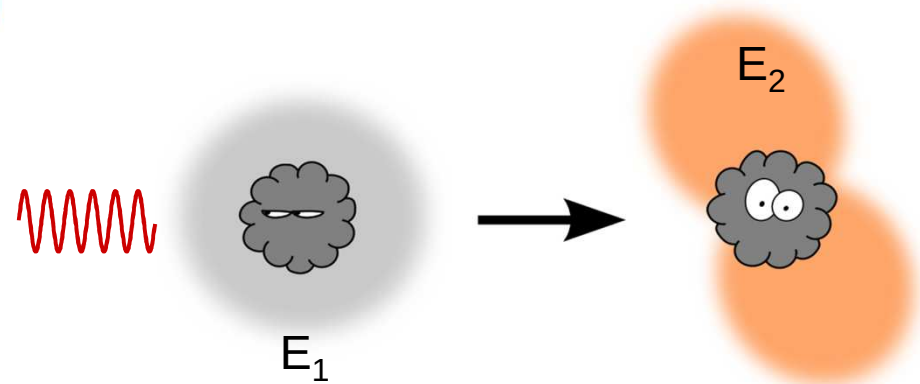


Deux processus d'interaction résonnante :

(connus à cette époque)

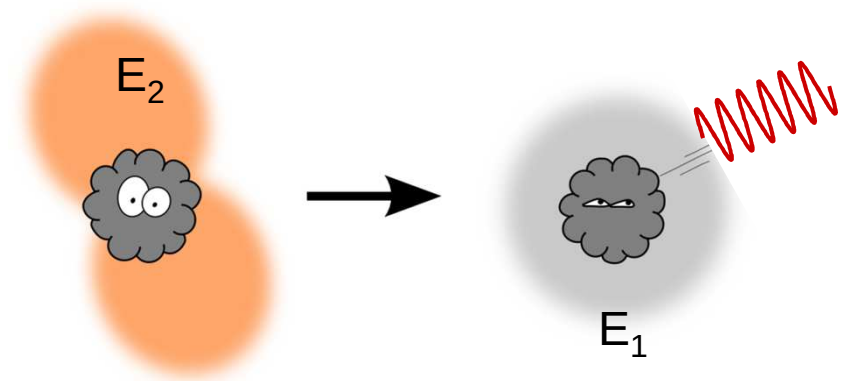
Absorption

$$E_2 - E_1 = h f$$

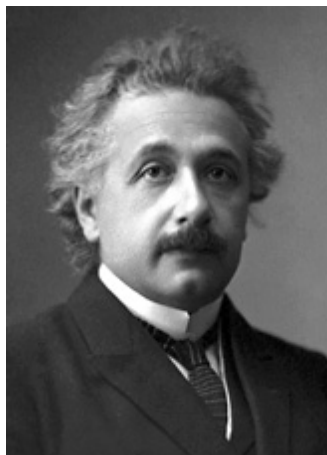


Emission spontanée

Un photon est émis dans
une direction
quelconque



**L'énergie gagnée par l'atome est donnée par l'énergie du photon
(ou réciproquement)**

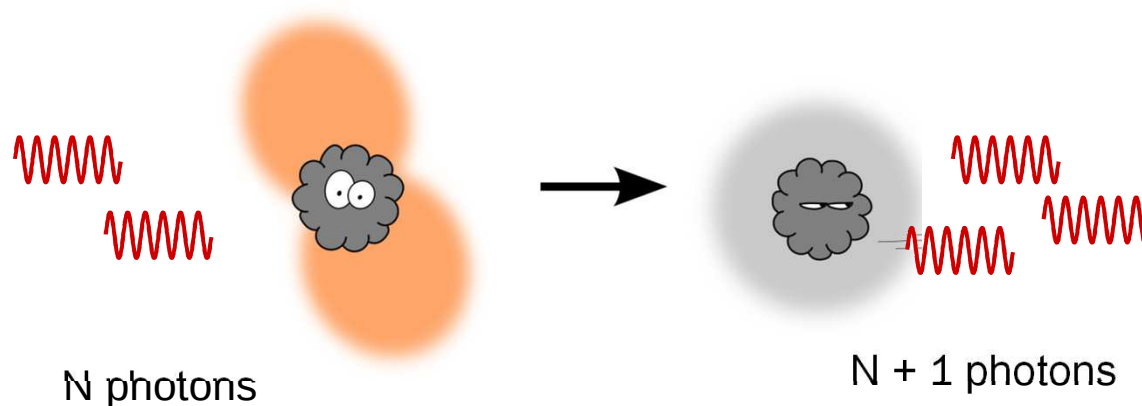


Un troisième processus : l'émission stimulée

découvert par Einstein en 1917

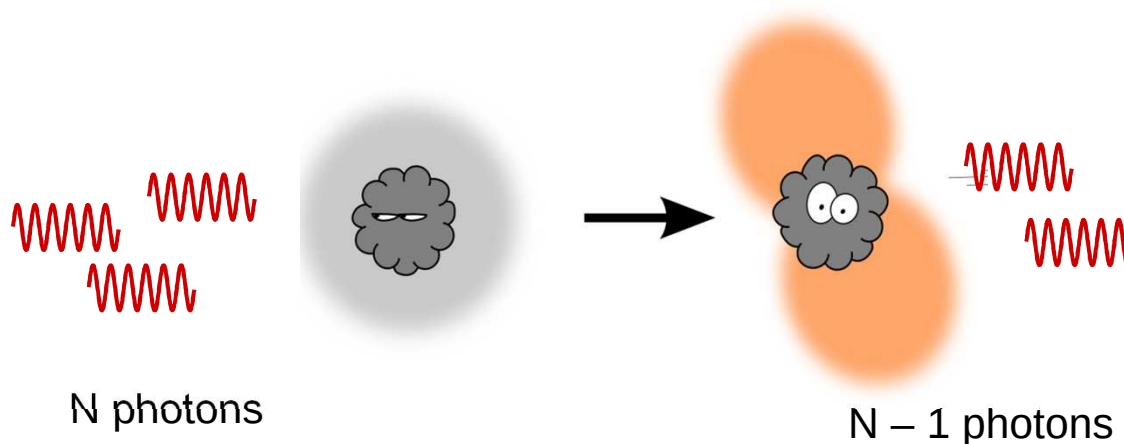
L'émission stimulée

Le photon émis est
identique aux photons
incidents :
l'onde est amplifiée



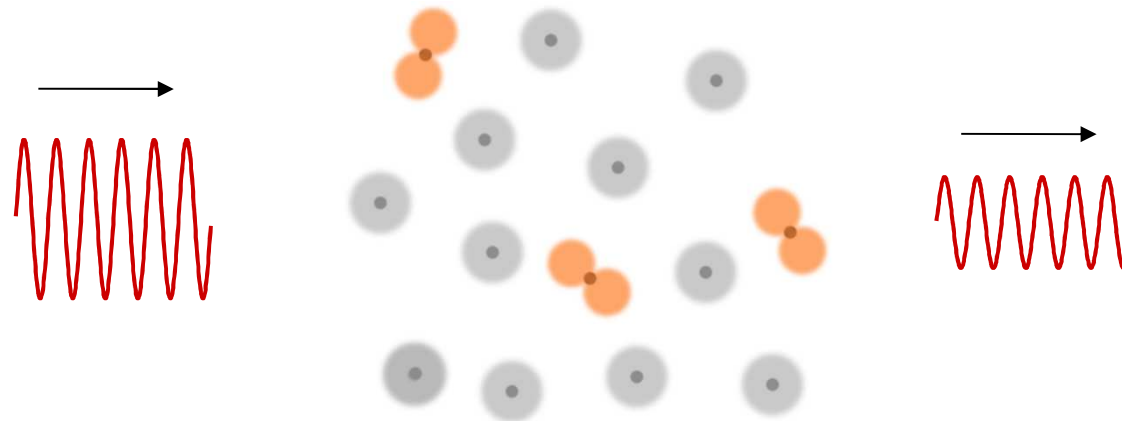
L'absorption

L'onde est atténuée



L'émission stimulée peut-elle l'emporter sur l'absorption ?

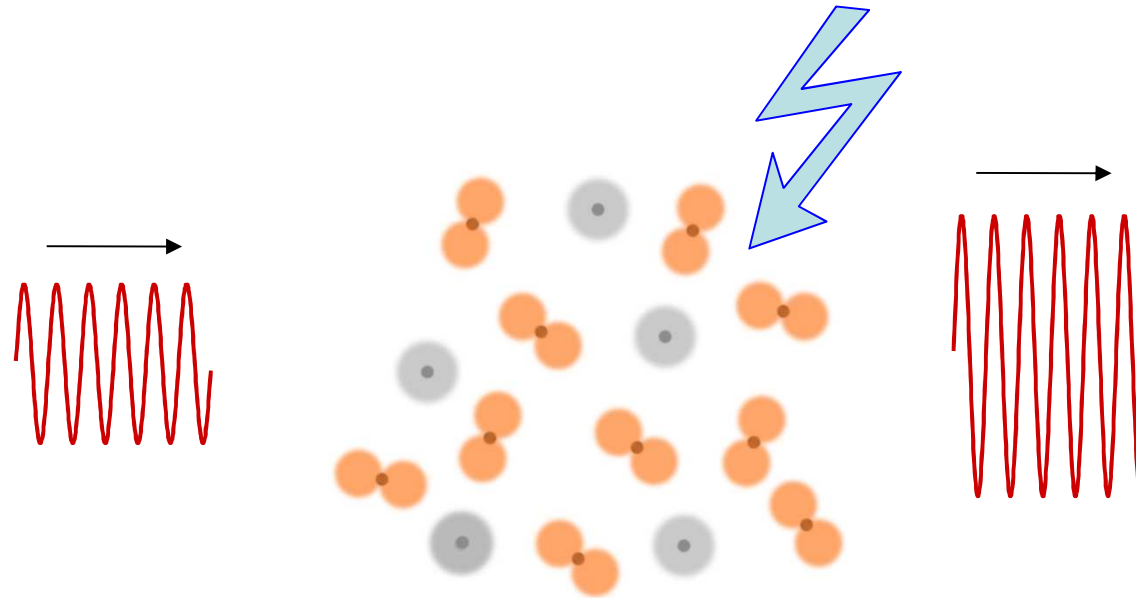
- l'absorption est proportionnelle au nombre d'atomes dans le niveau fondamental
- l'émission stimulée est proportionnelle au nombre d'atomes excités



A l'état naturel un gaz d'atomes absorbe la lumière car la plupart des atomes sont dans l'état fondamental

L'émission stimulée peut-elle l'emporter sur l'absorption ?

S'il y a **inversion de population** alors la lumière est amplifiée



L'inversion de population est obtenue par pompage

Le pompage peut être optique, électrique, chimique, ...
Il apporte de l'énergie aux atomes et crée l'inversion de population

Qu'y a-t-il dans un laser ?



- Un milieu qui amplifie la lumière :

Milieu amplificateur

Pour qu'il puisse amplifier la lumière, il faut le " pomper ",
c'est-à-dire lui fournir de l'énergie

Le laser est donc un dispositif qui convertit l'énergie fournie par le pompage
en énergie lumineuse concentrée

Amplification de **L**umière par **E**mission **S**timulée de **R**ayonnement

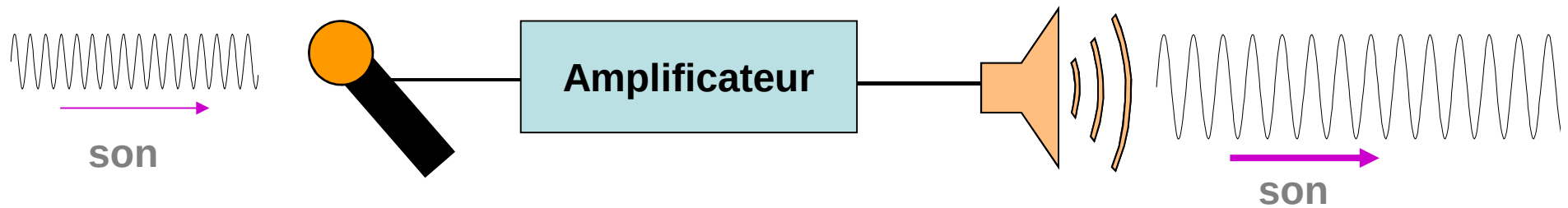
Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

Amplificateur ou source de lumière ?

Comment fonctionne un laser ?

Avec un amplificateur, on peut faire un oscillateur

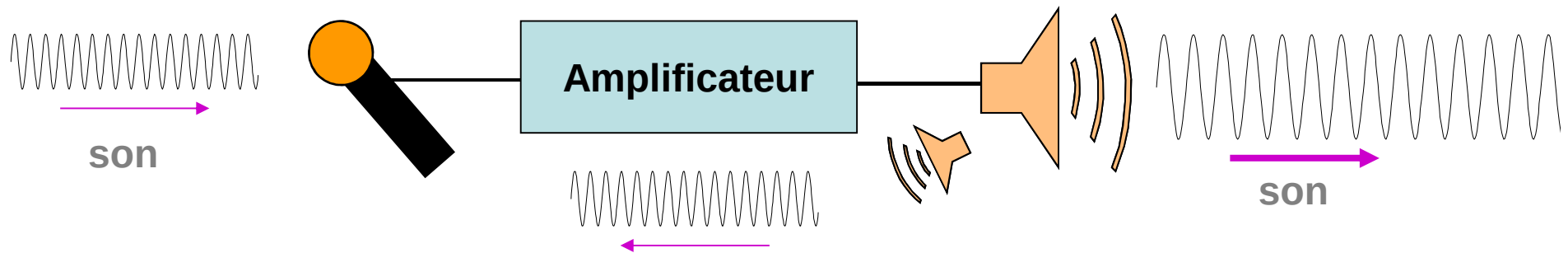
L'effet Larsen : un amplificateur de son



Comment fonctionne un laser ?

Avec un amplificateur, on peut faire un oscillateur

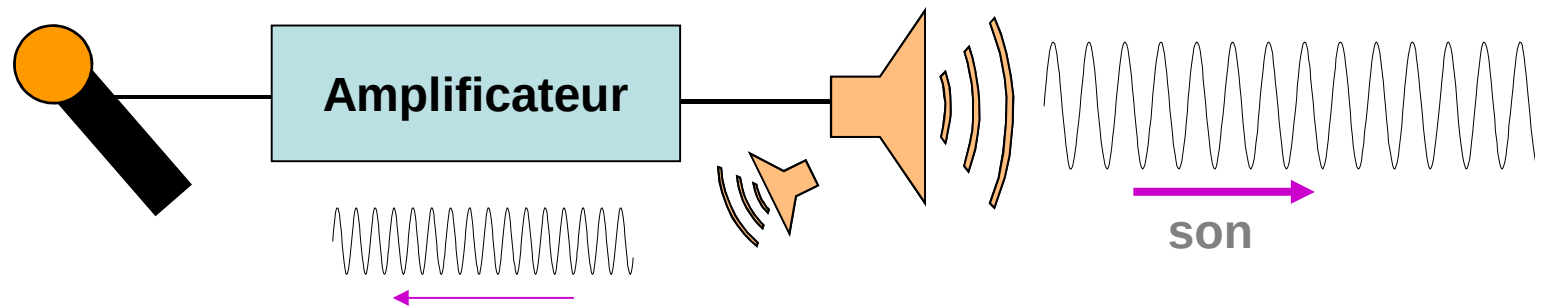
L'effet Larsen : un amplificateur de son



Comment fonctionne un laser ?

Avec un amplificateur, on peut faire un oscillateur

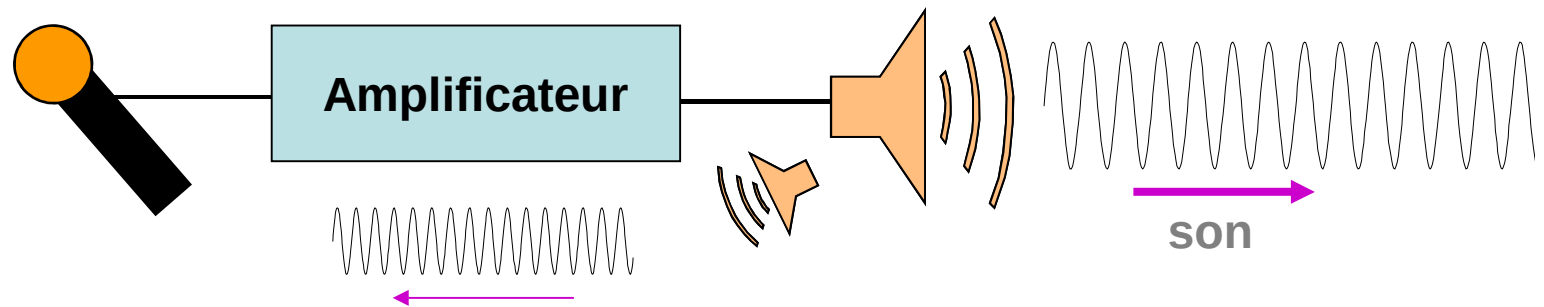
L'effet Larsen : un oscillateur qui produit du son



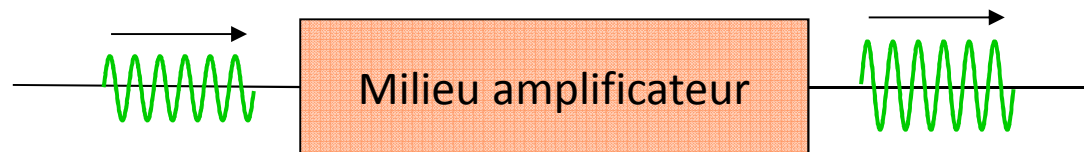
Comment fonctionne un laser ?

Avec un amplificateur, on peut faire un oscillateur

L'effet Larsen : un oscillateur qui produit du son



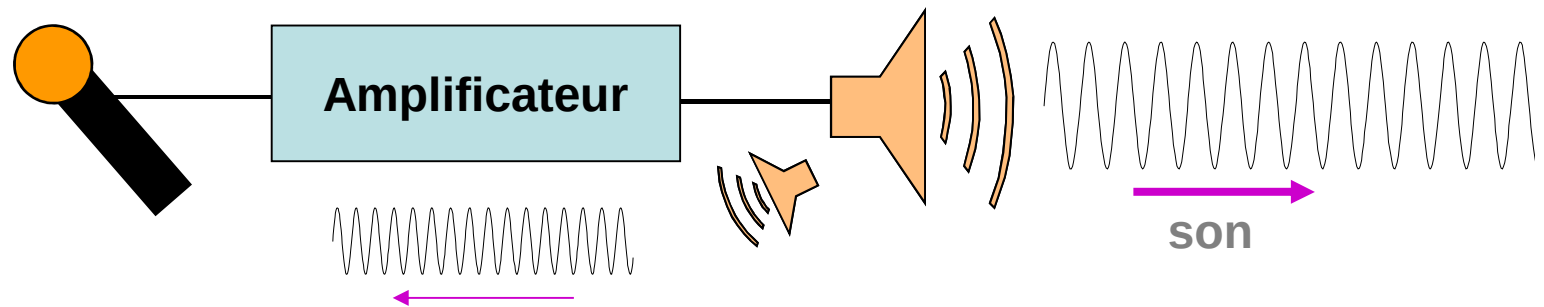
Le laser : un amplificateur de lumière



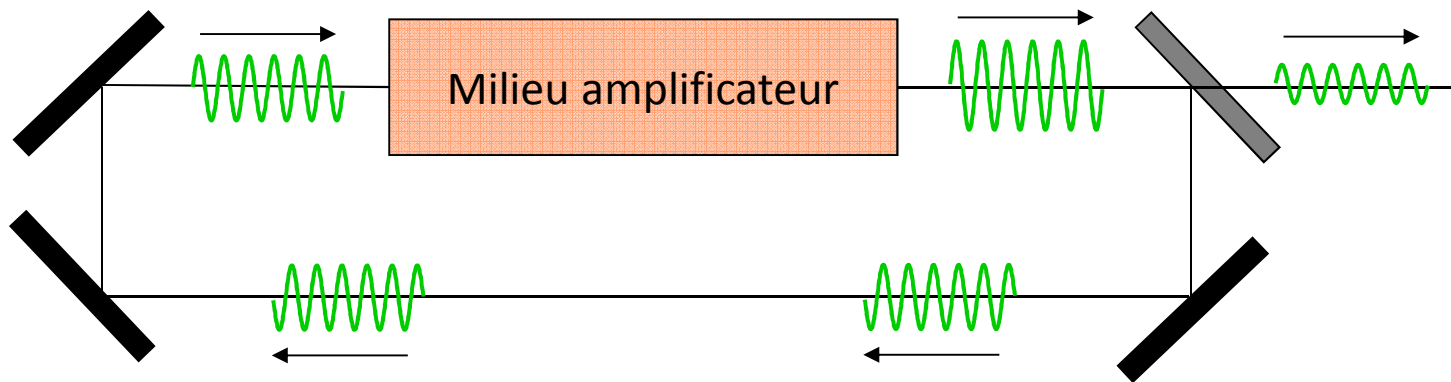
Comment fonctionne un laser ?

Avec un amplificateur, on peut faire un oscillateur

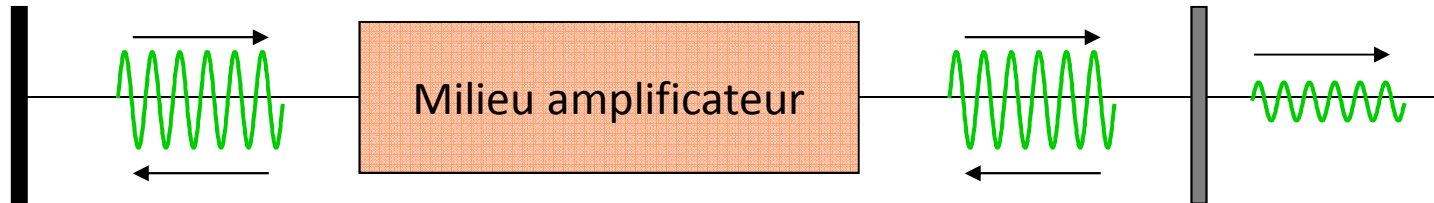
L'effet Larsen : un oscillateur qui produit du son



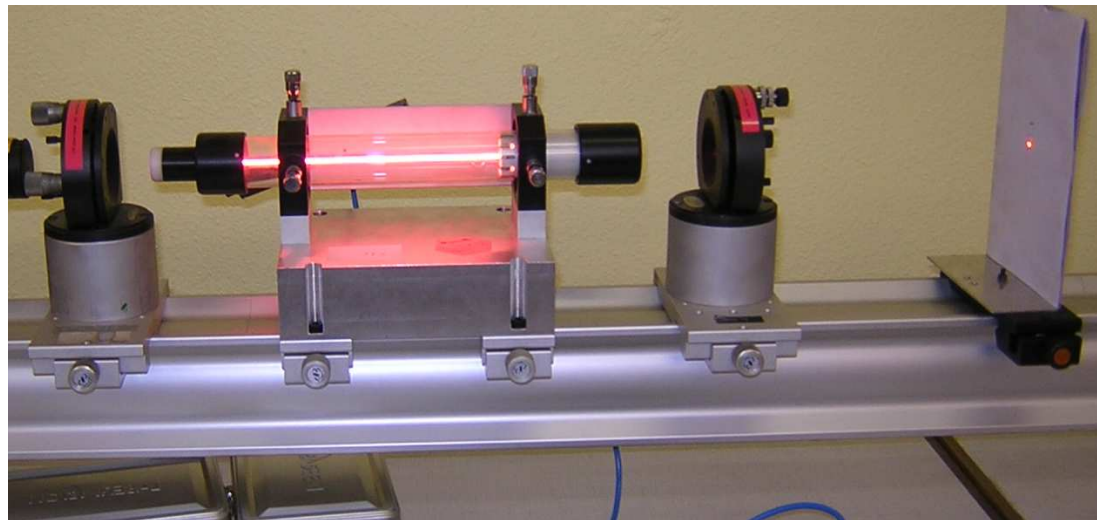
Le laser : un oscillateur qui produit de la lumière



Encore plus simple : deux miroirs seulement

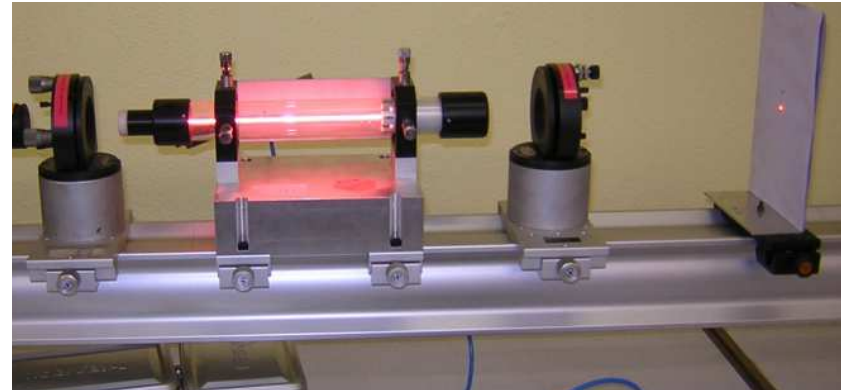


La lumière fait des allers-retours entre les deux miroirs et sort par le miroir de sortie qui ne réfléchit pas à 100%



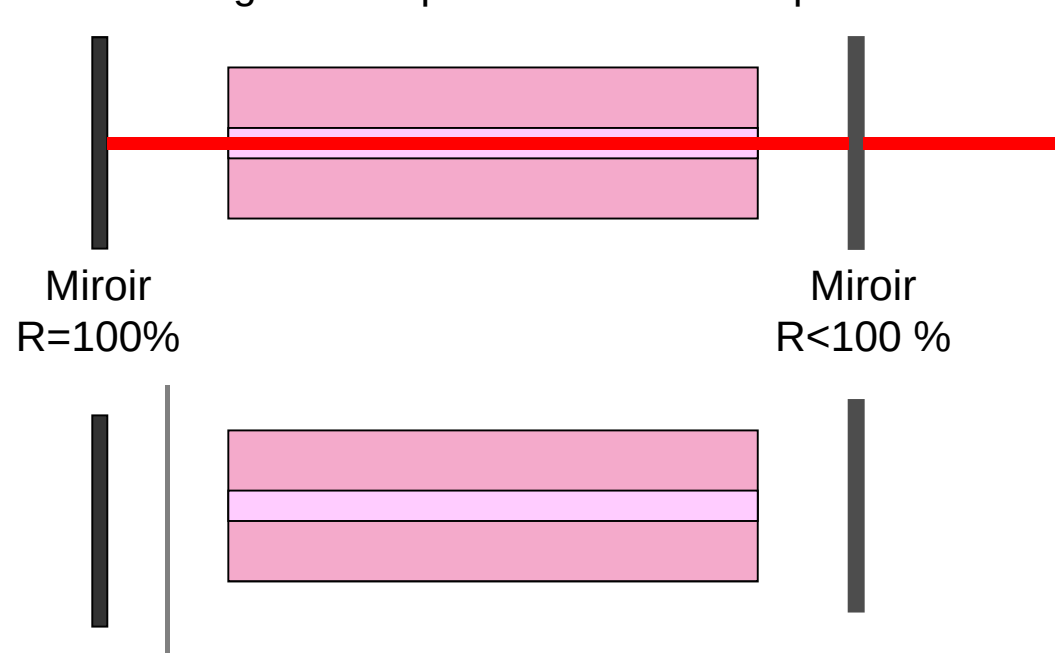
Quelques expériences ...

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.

Qu'y a-t-il dans un laser ?



- Un milieu qui amplifie la lumière :

Milieu amplificateur

Pour qu'il puisse amplifier la lumière, il faut le "pomper"

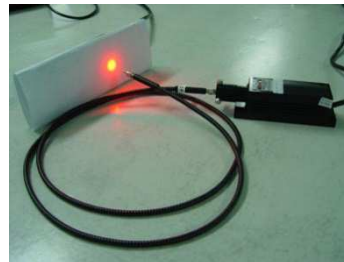
Le milieu amplificateur peut être un gaz, un liquide, un solide

exemples de lasers solides :

laser
Ti:saphir
(cristal)



laser
à fibre
(verre)



diode laser
(semi-conducteur)



- Des miroirs qui réfléchissent la lumière, dont un miroir "de sortie"

Qu'y a-t-il dans un laser ?

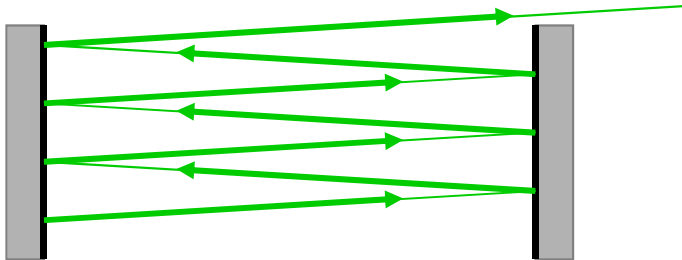


- Un milieu qui amplifie la lumière :

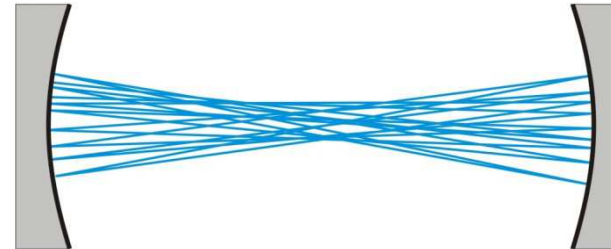
Milieu amplificateur

- Des miroirs qui réfléchissent la lumière, dont un miroir “de sortie”

La cavité laser



une cavité réaliste



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

Qu'y a-t-il dans un laser ?

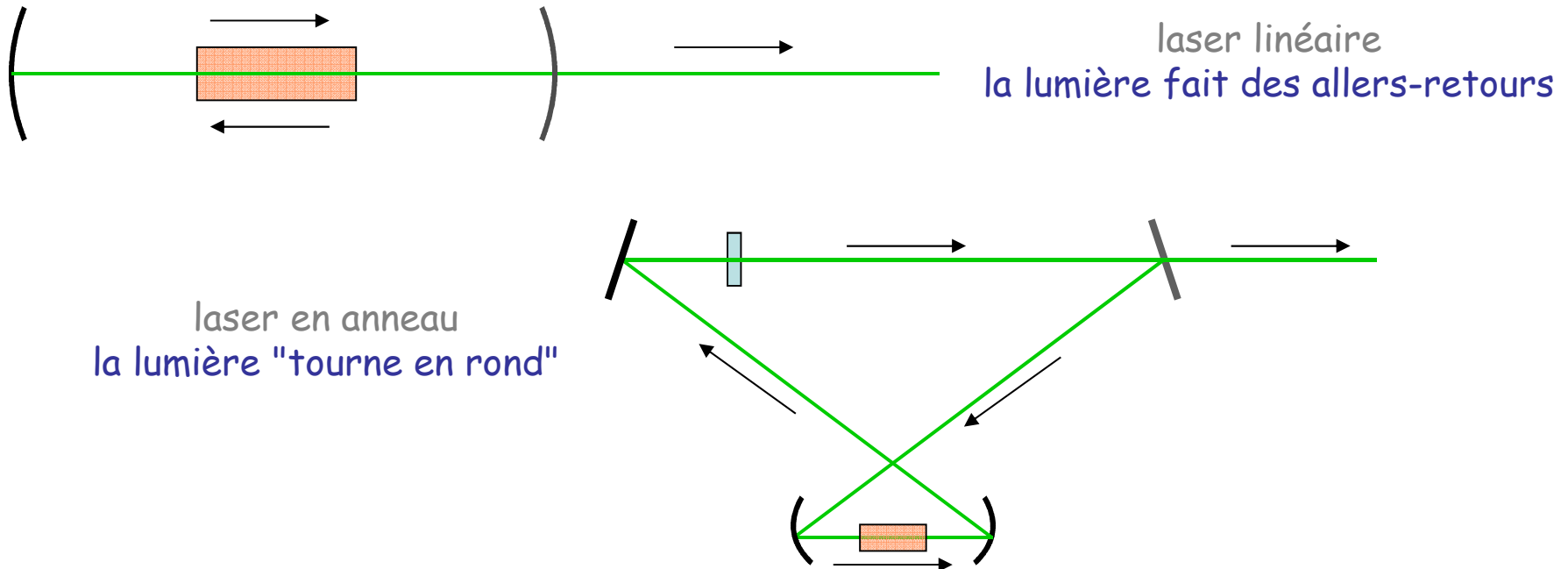


- Un milieu qui amplifie la lumière :

Milieu amplificateur

- Des miroirs qui réfléchissent la lumière, dont un miroir "de sortie"

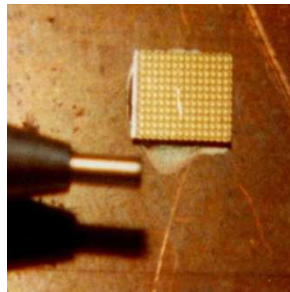
exemples de géométries :



Depuis 1960, des lasers de toutes sortes

- de plus en plus petits
ou de plus en plus grands

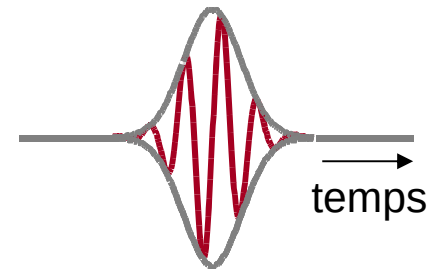
100 microlasers
à semiconducteur



Laser Nova pour la fusion nucléaire

- de plus en plus puissants
jusqu'au pétawatt (un million de milliard de watts)

- continus ou pulsés
des impulsions de plus en plus courtes



de durée quelques femtosecondes (un milliardième de millionnième de seconde)



Photo Nicolas Treps

en 2005
à Paris

Un faisceau fin et directif
Un faisceau monochromatique

De la lumière concentrée :

la cohérence spatiale

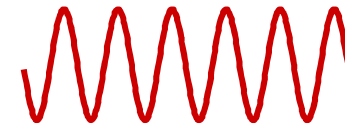
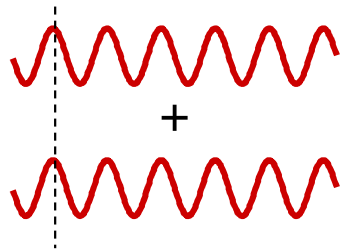
De la lumière bien ordonnée :

la cohérence temporelle

L'interférométrie

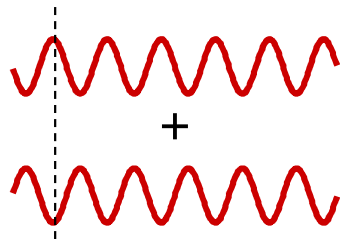
Si on superpose deux ondes identiques :

- en phase



interférence constructive

- en opposition de phase

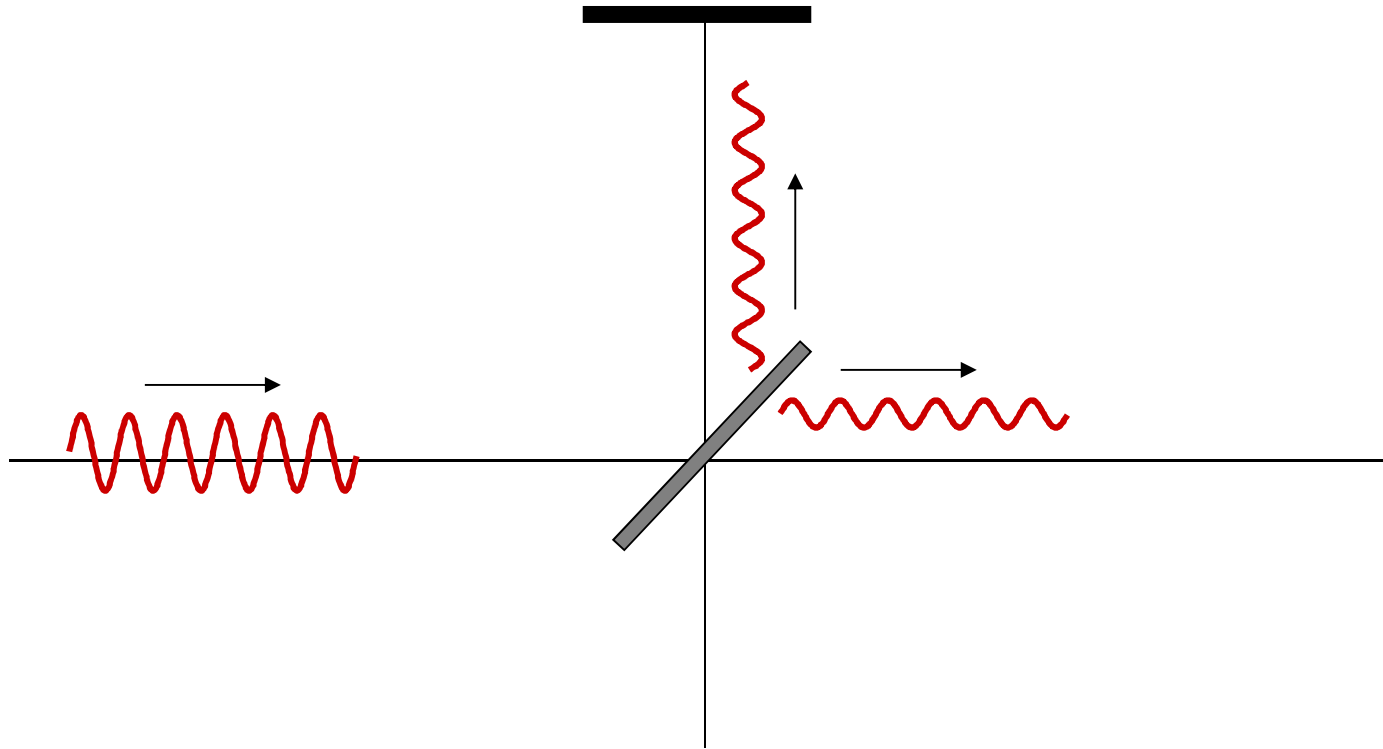


interférence destructive

Un exemple : l'interféromètre de Michelson

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

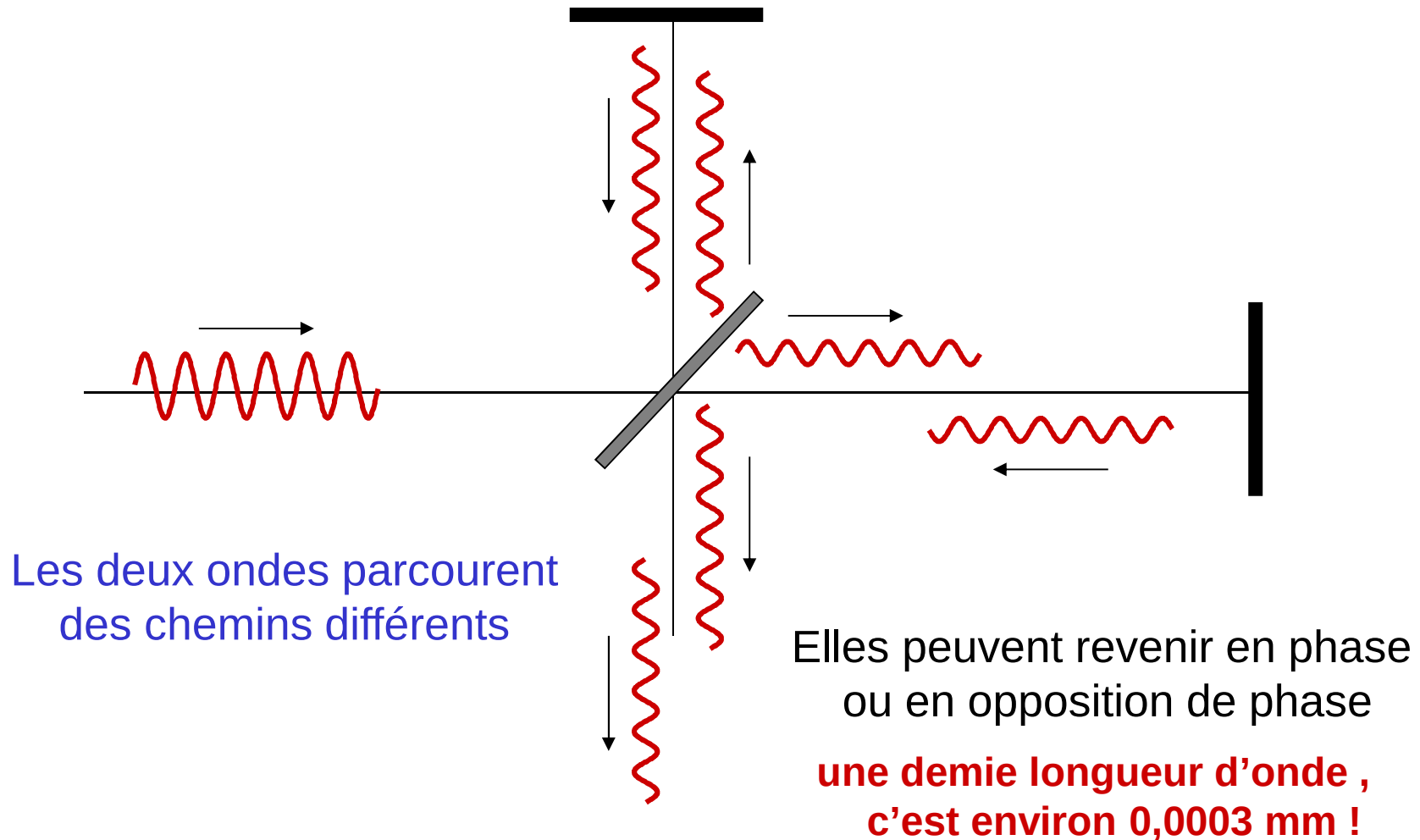
L'onde émise par le laser est séparée en deux parties
qui se propagent dans les deux bras



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 1915) :

L'espace-temps est déformé en présence de matière

Un évènement violent (explosion de supernova) génère une onde gravitationnelle
qui modifie très légèrement les distances sur Terre



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

Interféromètre de Michelson
bras de 3 km

Mesure de déplacement de 0,000 000 000 000 001 mm !

Autres applications de la cohérence temporelle

un faisceau monochromatique

- **Spectroscopie**

Chaque atome ou molécule possède son propre spectre de raies

→ détection de composants

→ étude de la structure des niveaux



peintures rupestres en Afrique du Sud



robot Curiosity

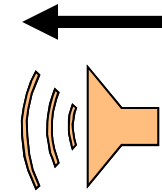
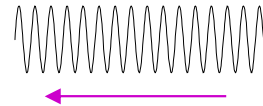
- **Mesures de vitesses**

fréquences et vitesses sont reliées par l'effet Doppler

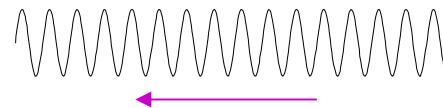
L'effet Doppler

Source sonore en mouvement

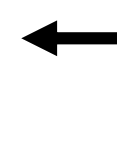
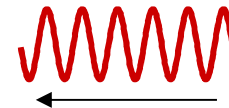
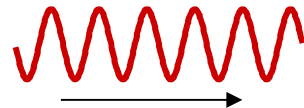
elle s'approche : le son est plus aigu



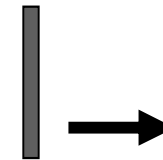
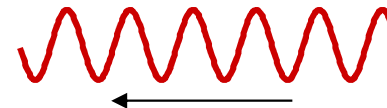
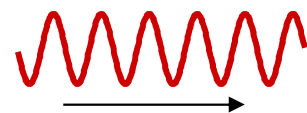
elle s'éloigne : le son est plus grave



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

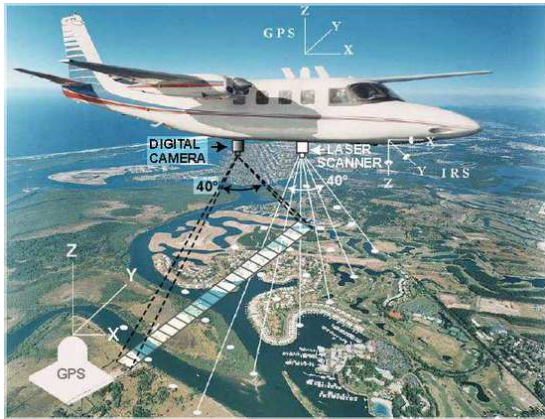
**On peut utiliser l'effet Doppler pour mesurer la vitesse
d'une source ou d'un réflecteur (radar)**

Le LIDAR

est l'équivalent du RADAR
mais dans le domaine optique

(Light Detection And Ranging)

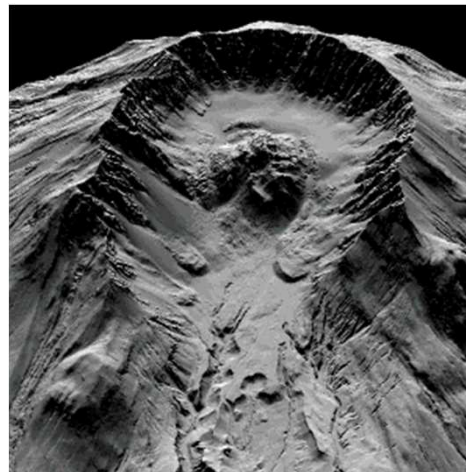
Il peut être soit au sol, soit embarqué dans un avion ou un satellite
(satellite CALIPSO lancé en avril 2006)



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



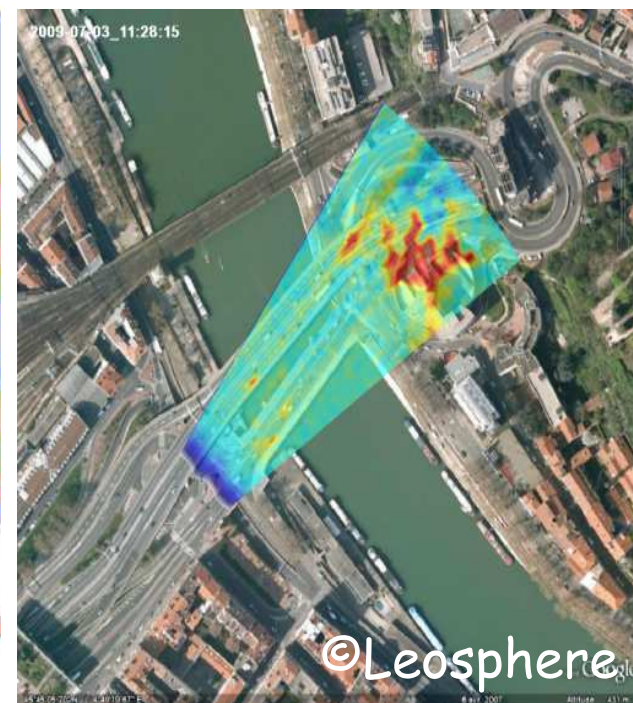
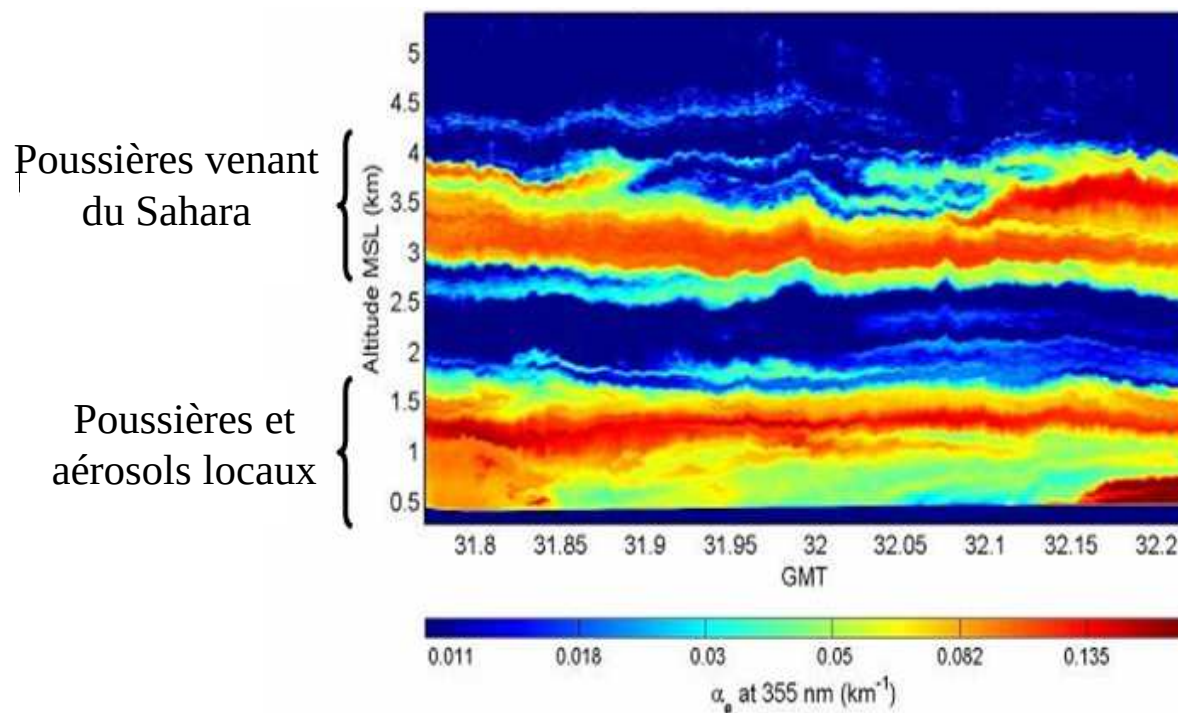
LIDAR



Eruption du Mont
Sainte Hélène en 2004

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

et pour la détection de particules dans l'atmosphère



Le Sahara à Orsay

La pollution à Lyon

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

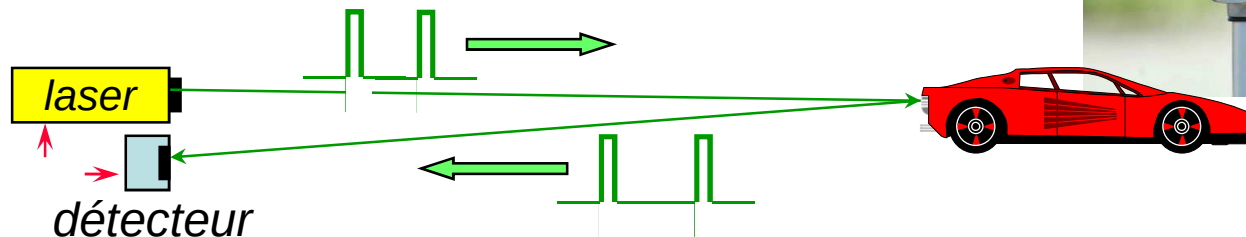
Les lasers en impulsions pour mesurer les distances ou les vitesses



Télémètre laser

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

en plus des radars, les “jumelles laser”



Mesurer la distance Terre - Lune



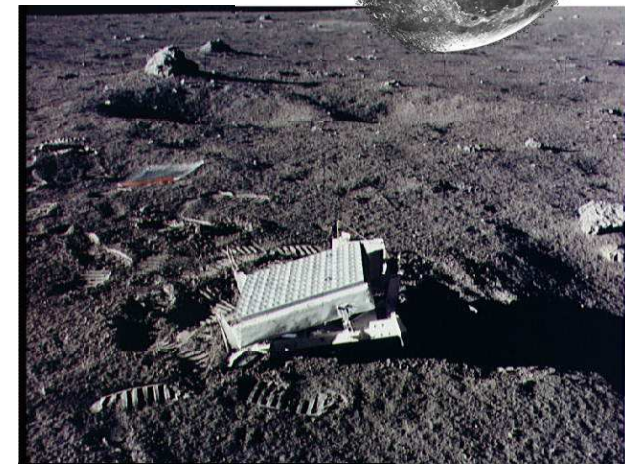
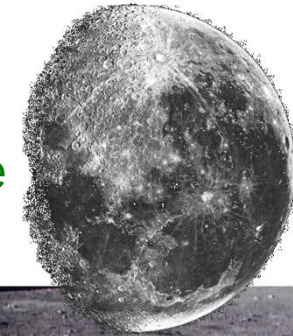
Impulsions de 100 ps



Telescope du CERGA
Observatoire de la Côte d'Azur

(aller - retour ~ 2 s)

5 réflecteurs
déposés sur la Lune



Les tirs laser avec un laser YAG (IR + vert)
permettent de mesurer la distance Terre-Lune
avec une précision de 3 mm (10 ps)
sur 384 000 km

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

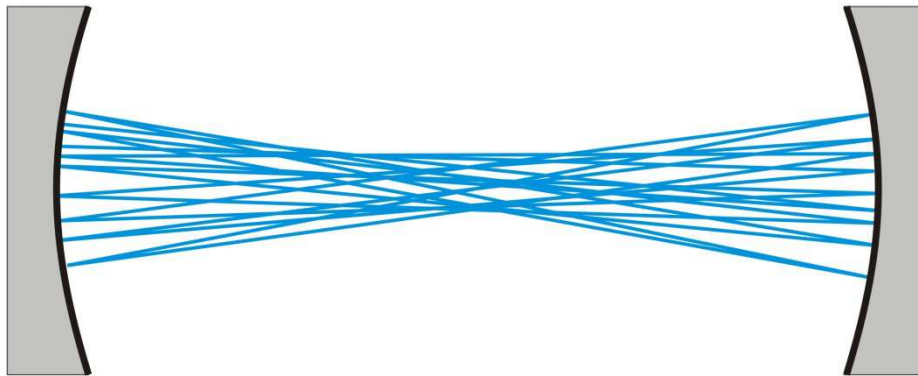
La cohérence spatiale : un faisceau fin et directif ?

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

dans le laser



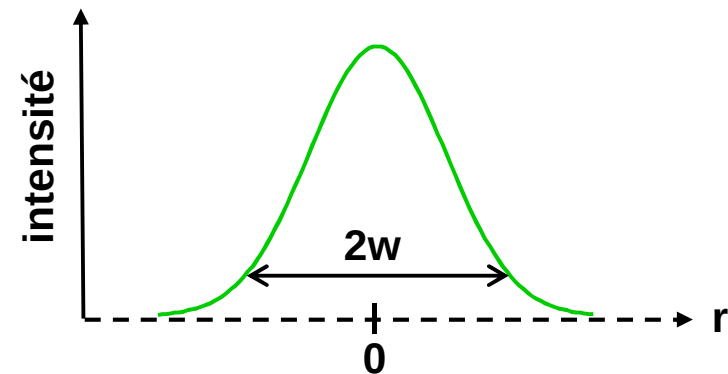
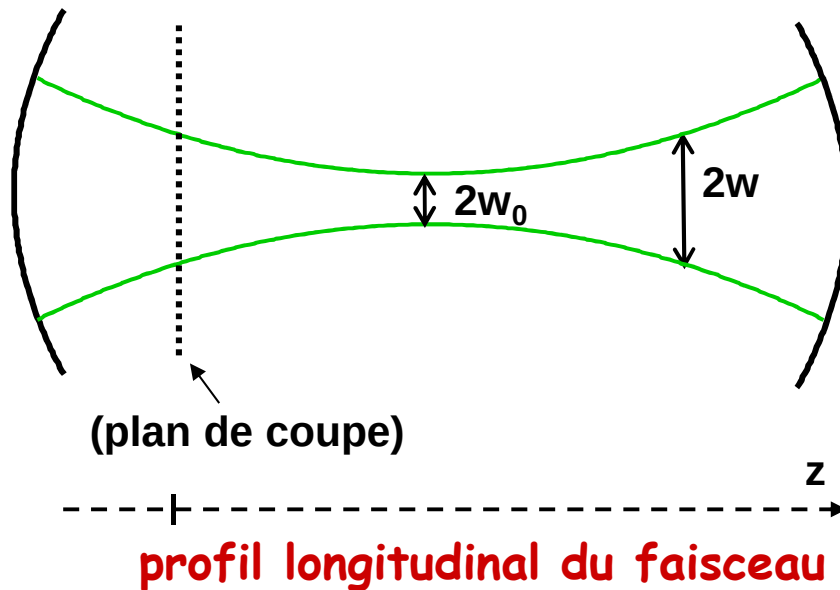
La cohérence spatiale : un faisceau fin et directif ?

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

dans le laser

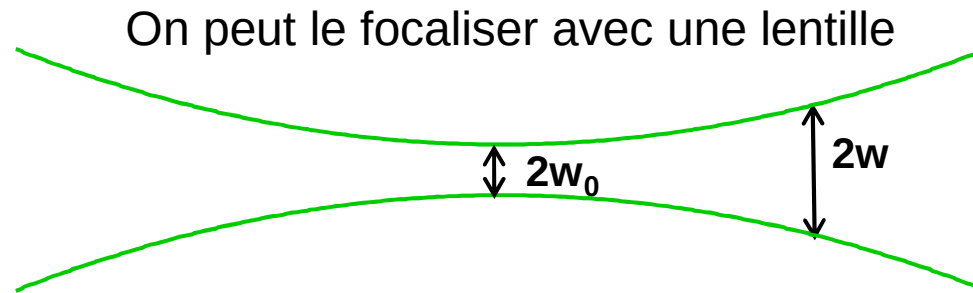


coupe transverse

w_0 est le "col" du faisceau (rayon de sa section minimale)

Le faisceau laser

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



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

Le rayon du faisceau varie toujours au cours de la propagation

z_R est la **longueur de Rayleigh**

distance à partir du col après laquelle la section du faisceau est multiplié par 2

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

Exemple d'un laser He-Ne à $\lambda = 633 \text{ nm}$
si $w_0 = 0,6 \text{ mm}$ $z_R = 2 \text{ m}$

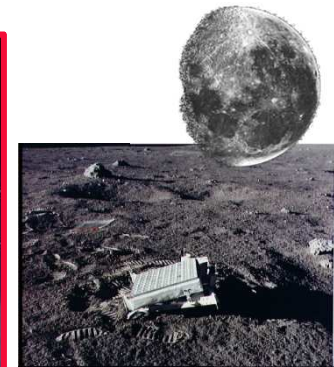
Si le col est très petit, le faisceau diverge rapidement

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

- **Matérialiser une ligne droite ?**

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

Pour envoyer un faisceau vers la Lune, il faut qu'il ait un gros diamètre



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
1.2 mm substrate	0.6 mm substrate	0.1 mm cover layer
1.6 μm	0.74 μm	0.52 μm

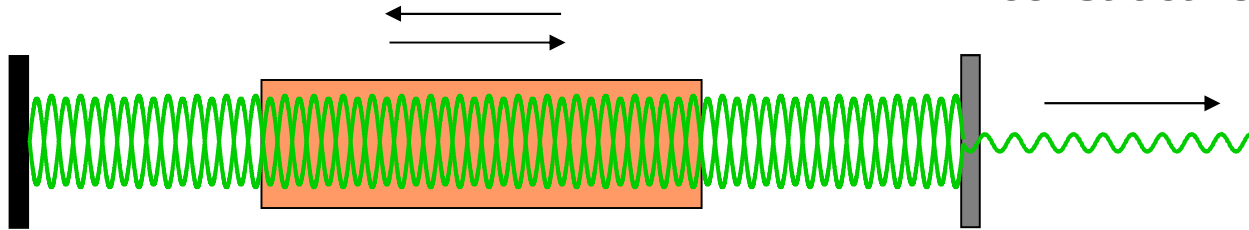
Le diamètre minimum qu'on peut obtenir est de l'ordre de la longueur d'onde

La cohérence temporelle : un faisceau monochromatique ?

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

$$L = n \lambda_n / 2$$

n entier
condition d'interférences
constructives

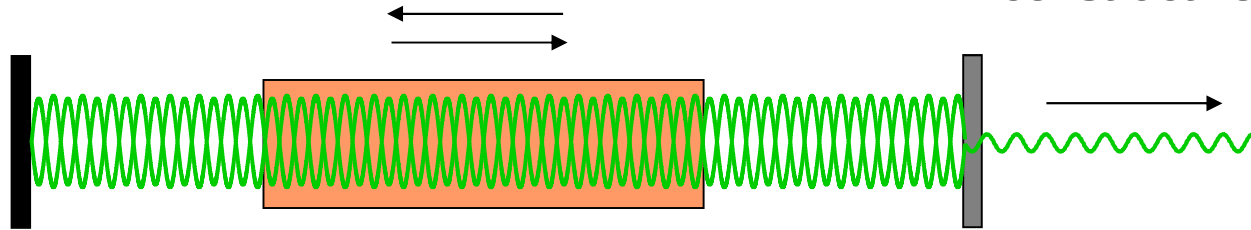


La cohérence temporelle : un faisceau monochromatique ?

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

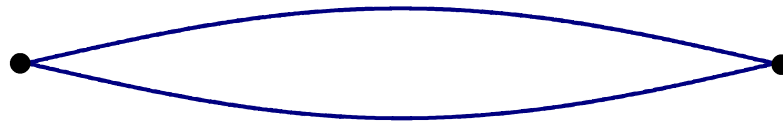
$$L = n \lambda_n / 2$$

n entier
condition d'interférences
constructives



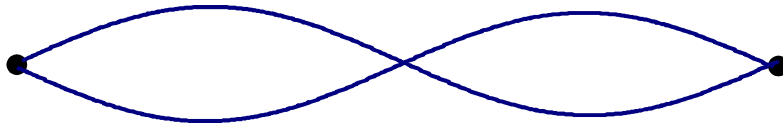
Analogie avec une corde vibrante (instrument de musique)

$$L = \lambda_1 / 2$$



Mode fondamental

$$L = 2 \lambda_2 / 2$$



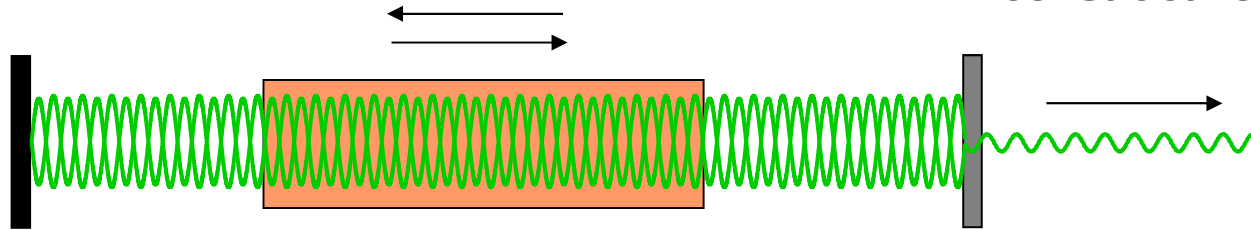
Premier harmonique

La cohérence temporelle : un faisceau monochromatique ?

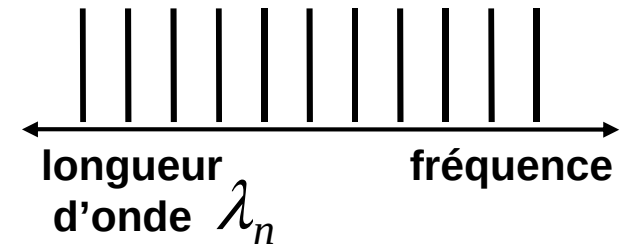
Pour que l'onde revienne toujours en phase avec elle-même il faut que

$$L = n \lambda_n / 2$$

n entier
condition d'interférences
constructives



L'oscillation laser ne peut se produire que pour un des modes résonnants de la cavité Fabry-Perot, associés à des valeurs successives de n

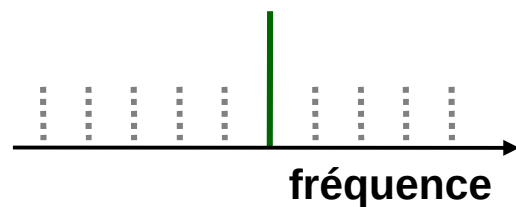


Les modes sont très rapprochés car le nombre n est très grand
si L = 30 cm, il vaut 1 million

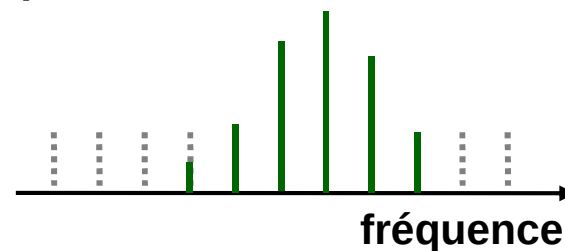
Le laser ne peut osciller que sur une fréquence amplifiée par le milieu amplificateur
c'est-à-dire dans la courbe de gain de ce milieu

Un faisceau monochromatique ?

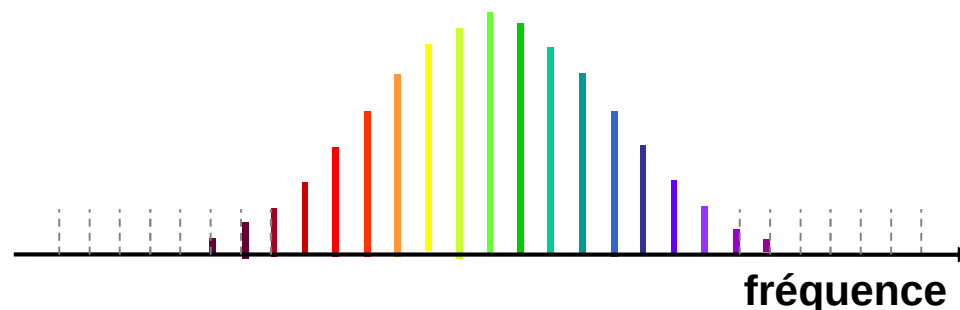
Selon le choix du milieu amplificateur, des miroirs et la présence d'éventuels éléments optiques ajoutés dans la cavité, on a un ou plusieurs modes qui peuvent osciller dans le laser



laser monomode (monochromatique)



lasers multimodes

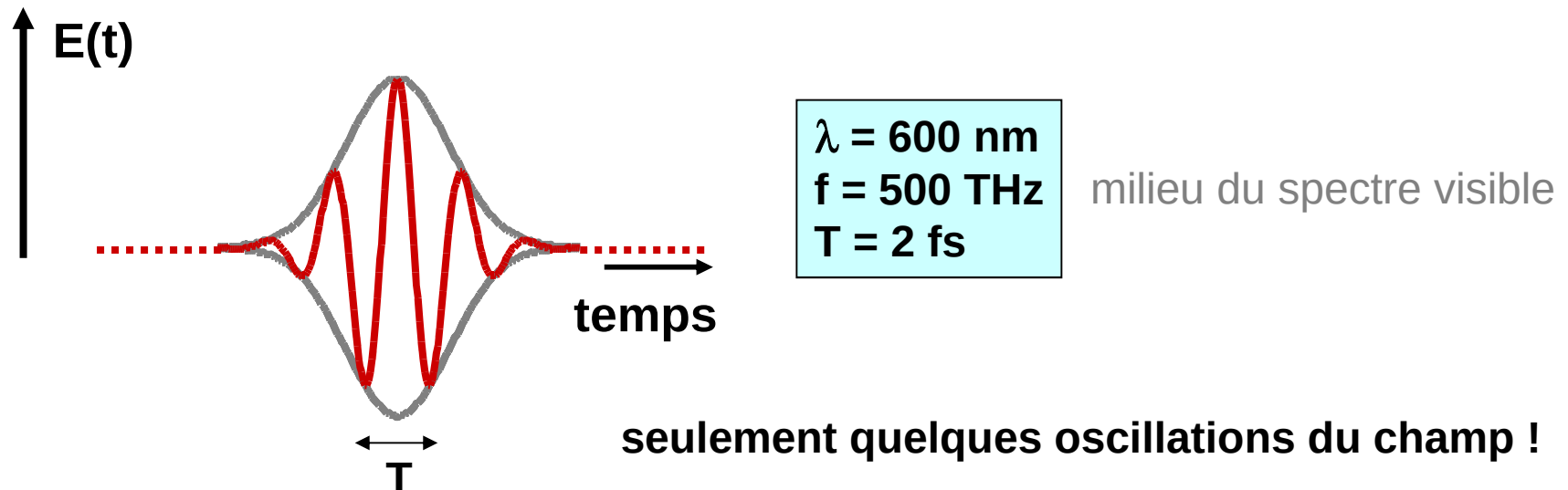


On souhaite parfois avoir un très grand nombre de modes :
c'est le cas pour les lasers à impulsions courtes

Des impulsions de plus en plus courtes

Le premier laser, en 1960, fonctionnait en impulsions :
le milieu amplificateur était pompé avec un flash de lumière
et l'émission laser se produisait librement

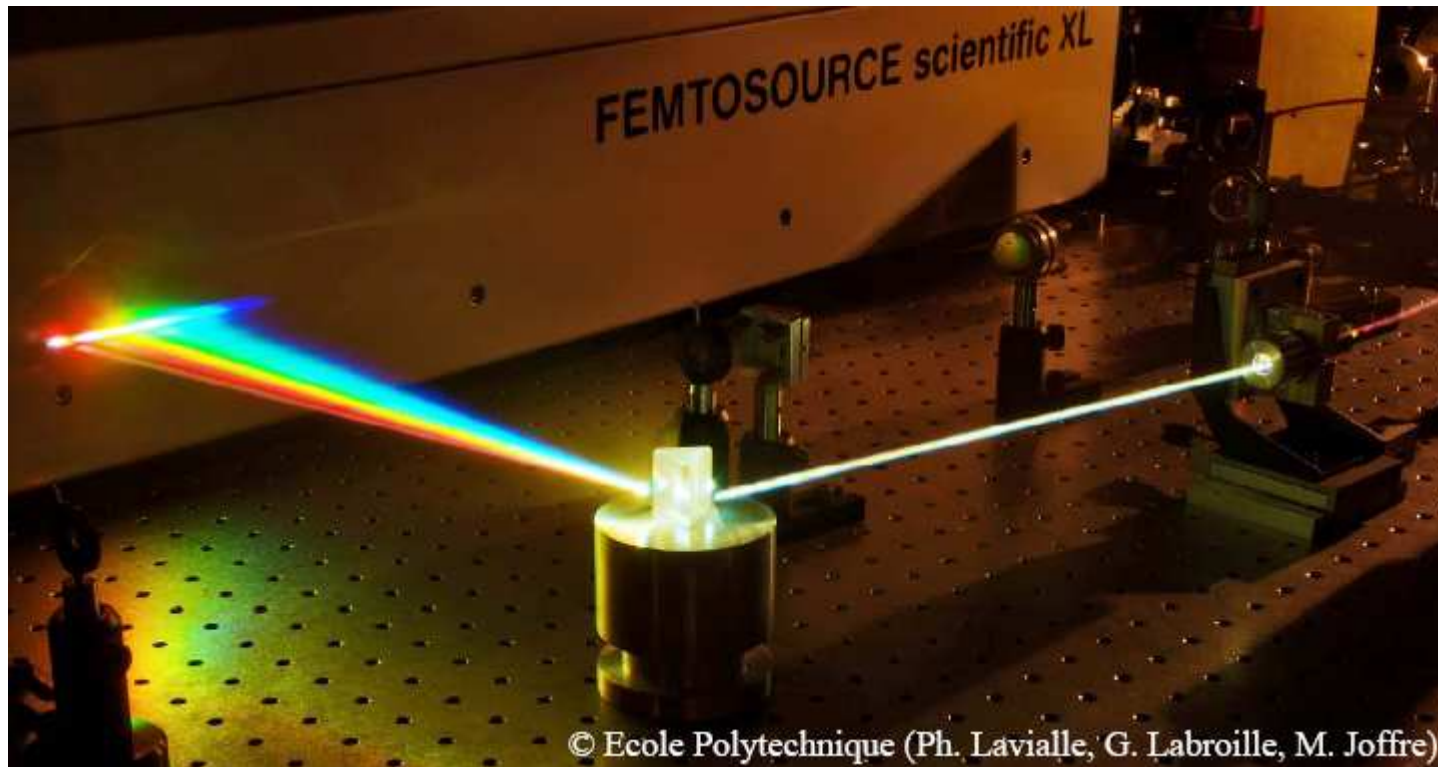
- depuis on a appris à faire des lasers **continus** (dès 1961)
- et on a cherché à produire des **impulsions très courtes**, de durées :
 - quelques **nanosecondes** ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$)
 - quelques **picosecondes** ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$)
 - et maintenant quelques **femtosecondes** ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$)



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

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

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



Lumière issue d'un laser femtoseconde, dispersée par un prisme.

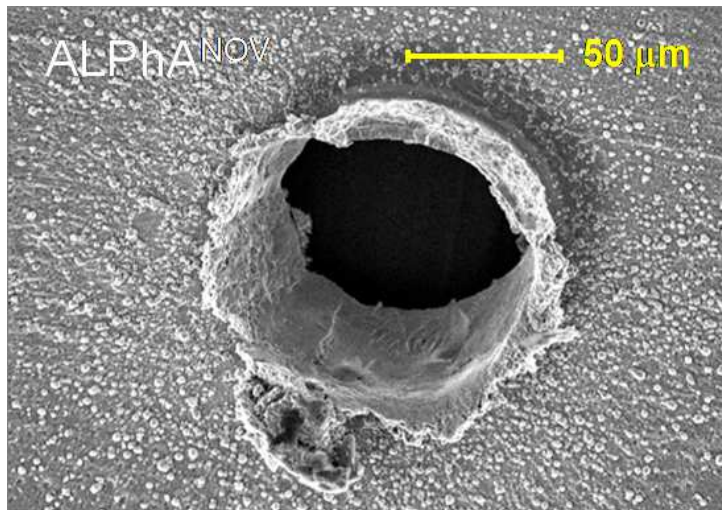
C'est une lumière blanche, mais elle est cohérente !

Une application des impulsions laser très courtes

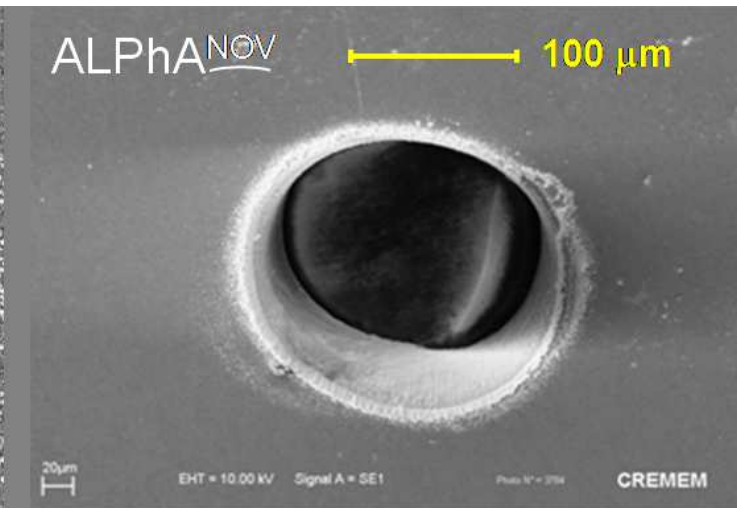
L'énergie lumineuse est concentrée dans le temps :
on obtient donc une forte puissance instantanée pendant un temps très court

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)



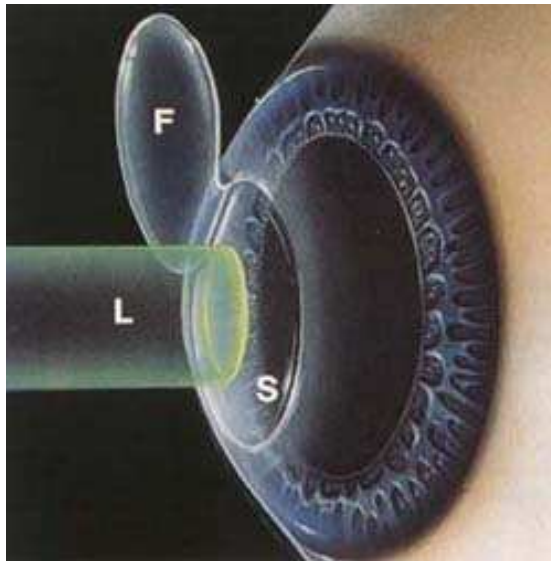
impulsions courtes
(quelques ns)



impulsions 500 fs
(10000 fois plus courtes)

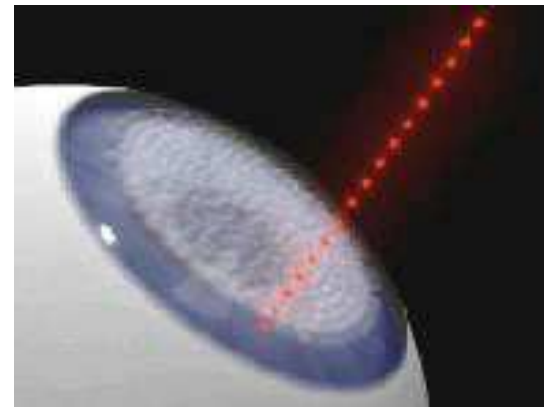
On utilise ainsi les lasers femtosecondes pour découper la cornée

Chirurgie réfractive par la technique LASIK



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

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



Des laboratoires de recherche à la vie quotidienne les lasers sont partout...



... et n'ont pas fini de nous étonner !

Merci de votre attention !

