

A LA LUMIERE DES LASERS



Lecteur CD, DVD, imprimantes, fibres optiques, soudure, chirurgie, énergie... le laser est partout !

Il est présent dans la grande majorité des innovations technologiques qui ont fait évoluer nos sociétés ces dernières années.

Tout le monde le côtoie au quotidien et l'utilise sans même le savoir. En un mot le laser se fait oublier... autant qu'il fascine !

A l'occasion de son cinquantième anniversaire, la région Bretagne, pôle optique pionnier français en matière de laser, l'Abret la clé des sciences, centre de Culture Scientifique breton, le CNRS et le laboratoire Foton s'associent pour fêter cet événement.

EXPOSITION
LANNION



EXPOSITION A LA LUMIÈRE DES LASERS

Réalisation Abret la clé des sciences

Commissariat Michel Tréheux, Victor Riche (Abret)

Conseil scientifique Laboratoire CNRS Foton
• Enssat Lannion
• Abret la clé des sciences

Dossier pédagogique Eric Millour
(Professeur au collège Charles Le Goffic, Lannion)

Maquette de laser Jérôme Hamy (CréArtProd)

Valises Pédagogiques Yslav

Stage d'étude Lucile Ronflette (Abret)



PARTENAIRES

Partenaires financiers

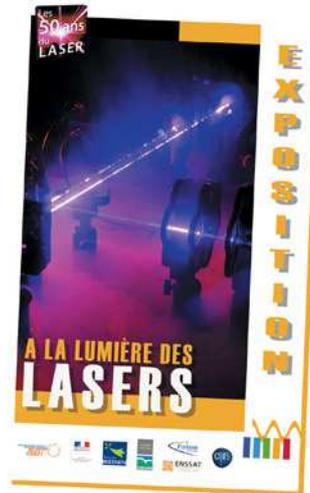
- Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
- Conseil Régional Bretagne
- Conseil Général des Côtes d'Armor

Partenaires scientifiques et ressources (valises pédagogiques)

Laboratoire Foton (Enssat Lannion, IUT Lannion, INSA Rennes, Télécom Bretagne, CNRS)
ENIB Brest / IPR Rennes / Délégation Bretagne du CNRS et CNRS Image

Remerciements pour leur aide (photos, vidéos...)

Délégation Bretagne du CNRS et CNRS Image / CEA Saclay / Onera / SFO / Service Patrimoine Scientifique et Technique, Université Rennes 1



LE LASER FÊTE SES 50 ANS



Les
50 ans
du
LASER

Photo © CNRS Photographie / PERRIN Emmanuel

A LA LUMIÈRE DES **LASERS**

E
X
P
O
S
I
T
I
O
N





1

LES HOMMES DE LA LUMIÈRE

1



Christian HUYGENS (1629-1695) est un mathématicien, astronome et physicien néerlandais. Sa théorie ondulatoire, publiée en 1690 dans son *Traité de la Lumière*, sera vite éclipsée par les succès newtoniens.

2

Isaac NEWTON (1643-1727) est un physicien, astronome anglais. Dans son traité *Opticks* (1704), il expose sa théorie corpusculaire de la lumière, ses études sur la réfraction et sur la diffraction ainsi que sa théorie des couleurs.

3

Thomas YOUNG (1773-1829) est un physicien, médecin, égyptologue britannique. Il est surtout connu pour son expérience des fentes de Young, dans laquelle il interpréta le phénomène d'interférences lumineuses.

4

Augustin FRESNEL (1788-1827) est un physicien français. Grâce à une analyse mathématique très fine, il parvient à éliminer quasiment toutes les objections faites à la théorie ondulatoire.

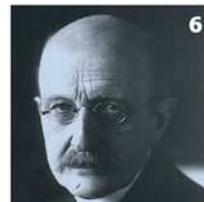
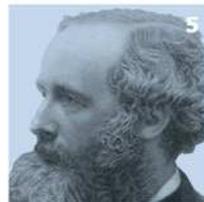


5

James Clerk MAXWELL (1831-1879) est un physicien et mathématicien écossais. Il a démontré que les champs électriques et magnétiques se propageaient dans l'espace sous la forme d'onde.

6

Max PLANCK (1858-1947) est un physicien allemand, lauréat du Prix Nobel de physique en 1918. En 1899, il introduit les constantes de Planck et de Boltzmann et donne naissance à la célèbre théorie des quanta.

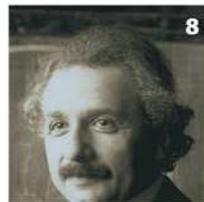


7

Niels BOHR (1885-1962) est un physicien Danois. Il publie en 1913 un modèle de la structure de l'atome dans lequel les électrons ont la possibilité de passer d'une couche à une autre, émettant un photon. Cette théorie est à la base de la mécanique quantique.

8

Albert EINSTEIN (1879-1955) est un physicien allemand. En 1917, il montre de façon théorique que l'émission d'un photon lorsqu'un atome se désexcite peut être stimulée, par un photon de même énergie.

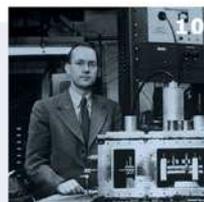


9

Alfred KASTLER (1902-1984) est un physicien français. Il reçu le prix Nobel de physique en 1966 pour la découverte et le développement de méthodes optiques, notamment la technique du pompage optique, élaborée en 1950.

10

Charles TOWNES (né le 28 juillet 1915) est un physicien américain. En 1964, il partagera le Prix Nobel de Physique pour ses travaux fondamentaux qui meneront à la construction d'oscillateurs et d'amplificateurs basés sur le principe du Maser-Laser.



11

Arthur SCHAWLOW (1921-1999) est un physicien américain, Prix Nobel de physique en 1981. En 1958, il publie avec Charles Townes un article dans *Physical Review*, considéré comme l'acte de naissance théorique du laser.

12



Théodore MAIMAN (1927-2007) est un physicien américain. Il est connu comme l'inventeur du laser. Contrairement à Schawlow et Townes qui utilisèrent le gaz pour leur fameux maser, Maiman fit le pari d'utiliser un solide : du rubis dopé avec des ions de chrome (1960).



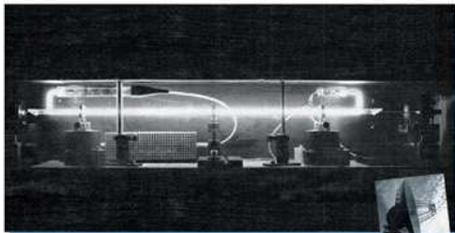


2

BRETAGNE ET LASERS

Les années 90 correspondent à l'émergence des "Sciences et Techniques de l'Information et de la Communication" (STIC), dont l'optronique, association de l'optique et l'électronique, est une des composantes majeures.

ANNEÉS 1960, 1970



Laser hélium-néon utilisé au CNET à Lannion (© "Radome" revue d'information du CNET, N° 15, Octobre 1969)

A Rennes, au milieu des années soixante, les premiers lasers bretons (rubis et hélium-néon) sont mis au point au laboratoire de radioélectricité du professeur Brun.

Ce laboratoire qui deviendra par la suite le "laboratoire de physique des lasers" sera reconnu comme l'un des premiers centres de recherches nationaux expert dans le domaine des lasers.

A Lannion, au début de l'année 1966, la première liaison optique sur 1 km est réalisée en atmosphère libre sur le site du CNET, puis sur 23 km entre Lannion et le Menez Bré (record du monde à l'époque !!).

Cette liaison optique utilise des lasers rouges fabriqués depuis 1964 dans les

laboratoires de Jean Le Mézec et Jeannine Hénaff au Centre national d'études des télécommunications à Issy-les-Moulineaux.

En 1968, le premier système à 108 Mbit/s est mis en place, toujours en atmosphère libre. Les faisceaux rouges, qui illuminent le ciel la nuit, provoquent quelques incidents tant cette lumière est étrange...

Cette même année, les premières fibres à faible atténuation et les premiers lasers à semi-conducteurs à température ambiante sont étudiés dans les laboratoires du CNET en vue de réaliser des systèmes de télécommunications optiques.

L'épopée lannionnaise des fibres optiques est lancée.

AUJOURD'HUI



En France

La photonique est classée par l'Europe comme une des 5 technologies clefs. Ces dernières années plusieurs pôles optiques se sont constitués en France.

Le pôle Anticipa à Lannion, fait partie des pôles photoniques majeurs en France et reconnu à l'étranger.

En Bretagne

La recherche optique s'appuie sur de nombreuses formations universitaires (Rennes, Brest et Lorient), sur des Ecoles d'ingénieurs (Enssat, Insa, Télécom Bretagne...) ainsi que sur des laboratoires de recherche (Foton, IPR, LSOL, RESO, Sciences chimiques de Rennes...)

La technopole Anticipa Lannion Trégor regroupe des grands groupes pionniers comme Orange Labs et Alcatel-Lucent ainsi qu'une vingtaine de PME travaillant sur des produits et technologies diversifiés (Ixfiber, Keopsys, Oxixus, Perfos...).



A noter

Il est à noter également le rapprochement des technologies laser avec les pôles de compétitivité bretons Images et Réseaux, Mer et Valorial. Des projets ont déjà été labellisés dans ces 3 pôles.





3

LA LUMIÈRE EN 2 MOTS



Double arc en ciel (© Stock xchng)

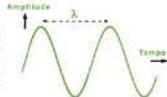
Quelle est la nature de la lumière ? Selon la physique quantique, il s'agit à la fois d'un corpuscule et d'une onde électromagnétique.



A LA FOIS UNE ONDE...

Ondes électromagnétiques

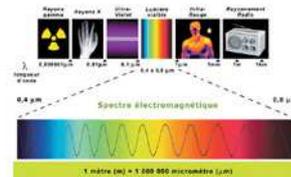
Les champs électromagnétiques sont directement liés aux déplacements de charges électriques. D'origines naturelles ou artificielles, ils sont présents partout dans notre environnement.



Les ondes dites électromagnétiques caractérisent la propagation de tels champs. Comme toute onde, elles sont caractérisées par leur longueur d'onde λ et leur amplitude.

Spectre lumineux

La "lumière visible" est l'ensemble des radiations émises par les photons dont la longueur d'onde est détectable par l'œil humain.



Le spectre du visible (qui correspond aux couleurs de l'arc en ciel) s'étend de 0,4 μm (violet) à 0,8 μm (rouge).

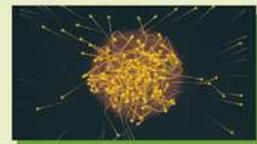
Au-delà de ce spectre des longueurs d'ondes visibles, on trouve :

- les infrarouges, les micro-ondes (droite du dessin)
- et les ultraviolets, les rayons X et les rayons γ (à gauche).



...ET UN CORPUSCULE

Les travaux de Planck et de Einstein ont montré que la lumière était constituée de "grains d'énergie" appelés les photons.



Trajectoire des photons s'échappant du soleil © CNRS Photothèque

Chaque photon porte une quantité d'énergie correspondant à sa longueur d'onde (ou à sa fréquence).

A noter

L'énergie d'un photon est calculée grâce à la formule : $E = (h \times c) / \lambda$ où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde de cette lumière (avec c et λ mesurées dans le milieu de propagation).

Le photon est un concept pour expliquer les interactions entre les rayonnements électromagnétiques et la matière. On ne peut parler de photon en tant que particule qu'au moment de l'interaction. En dehors de toute interaction, on ne peut pas savoir quelle « forme » a ce rayonnement.

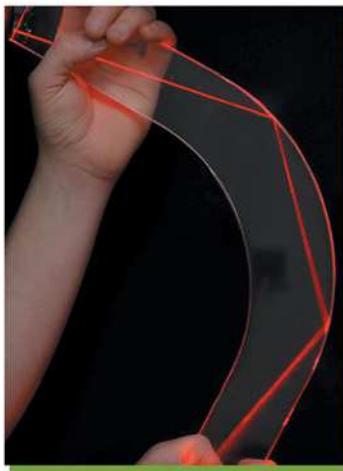




4

PROPRIÉTÉS DE LA LUMIÈRE

L'optique a d'abord été géométrique. Elle a permis d'expliquer les phénomènes de réflexion et de réfraction. Le XVII^{ème} siècle a été marqué par le débat passionné qui a opposé Huygens à Newton, partisans respectifs de l'optique ondulatoire et de l'optique corpusculaire.



1^{ères} Lois

OPTIQUE ET RAYONS LUMINEUX

D'après les lois de Snell-Descartes (XVII^{ème} siècle), si un rayon de lumière se propage dans un milieu homogène et arrive à la surface d'un second milieu homogène...

- une partie de la lumière sera réfléchi (même plan que le rayon incident) et l'angle de réflexion θ sera égal à l'angle d'incidence,
- l'autre partie pénétrera dans le second milieu (même plan que le rayon incident) et répondra à la formule : $n_1 \times \sin\theta_1 = n_2 \times \sin\theta_2$

La proportion de la lumière réfléchi dépendra du rapport des indices de réfraction des deux milieux.

Les fibres optiques...

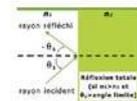
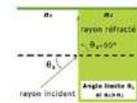
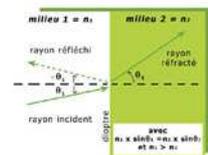
utilisent le phénomène de la réflexion totale (photo de gauche)... La lumière, qui pénètre par une extrémité, se propage par réflexions successives sur la surface intérieure de la fibre, puis sort par l'autre extrémité. (© Enssat / Laurent Feichter)

Angle d'incidence limite

Dans certains cas (si $n_1 > n_2$), il existe un angle d'incidence limite, pour lequel le rayon réfracté est tangent à la surface de séparation des milieux.

Réflexion totale

Si l'angle d'incidence est supérieur à l'angle limite, les rayons lumineux sont totalement réfléchis.



XVII^{ème} Siècle

COMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE

Disque de Newton et prisme

C'est Isaac Newton qui propose pour la première fois au XVII^{ème} siècle un cercle des couleurs chromatiques fondé sur la décomposition de la lumière blanche.

Une fois en rotation rapide, le disque de Newton semble blanc (phénomène lié à la rémanence rétinienne).

Il démontre ainsi que la lumière blanche est une combinaison des couleurs de l'arc-en-ciel.

Cette expérience est complémentaire de celle au cours de laquelle, à l'aide d'un prisme, on sépare la lumière blanche en ses différentes composantes.



A noter

Un dioptr est une surface qui sépare deux milieux transparents d'indices de réfraction différents. Généralement, une faible partie de la lumière est réfléchi à la surface du dioptr et l'autre partie est réfractée lors de son passage dans l'autre milieu.





5

LUMIÈRE ET COULEUR

Les objets qui émettent leur propre lumière sont peu nombreux. Tous les autres ne font que renvoyer une partie de la lumière qu'ils reçoivent. La couleur de ces objets va dépendre à la fois de la lumière incidente, de la façon dont ils la reçoivent et de notre perception.

SOURCES PRIMAIRES ET SECONDAIRES

On trouve dans la nature deux types de sources lumineuses :



Les sources primaires :

Ce sont celles qui, comme le Soleil, les bougies, les lampes à incandescence, le laser... produisent elles-mêmes la lumière qu'elles émettent.

Les sources secondaires :

Ce sont celles qui émettent de la lumière uniquement lorsqu'elles sont éclairées. C'est le cas de tous les objets qui nous entourent, que l'on peut voir le jour ou la nuit, s'ils sont éclairés : on dit alors que ces sources diffusent la lumière reçue. C'est également le cas des planètes et de la Lune qui, la nuit, brillent car elles reçoivent la lumière solaire et la diffusent, c'est-à-dire la renvoient.



COULEURS ET ABSORPTION

Les corps opaques ont la propriété de réémettre une partie de la lumière incidente (phénomène de diffusion). La sensation de couleur est due à l'absence d'une partie du spectre lumineux dans cette lumière réémise, cette partie manquante ayant été absorbée par le corps.

La couleur d'un objet dépend :

- de la composition de la lumière qui l'éclaire,
- de la manière dont l'objet va modifier (par absorption) le spectre de cette lumière,
- de sa composition chimique et de sa structure atomique,
- de l'interprétation qu'en fait notre cerveau.

Imaginons un corps éclairé par une lumière dite "blanche", c'est-à-dire possédant toutes les longueurs d'onde du domaine visible. Cet objet sera vu :

blanc... s'il diffuse (renvoie dans toutes les directions de l'espace) toutes les radiations lumineuses reçues.

noir... s'il absorbe, grâce à ses pigments, toutes les radiations du visible et n'en renvoie aucune.

coloré... s'il absorbe une lumière correspondant à certaines longueurs d'onde du spectre visible. La couleur de l'objet dépendra du spectre final réémis.

Les mélanges de couleurs...



par soustraction...

les pigments qui se mélangent absorbent de plus en plus de lumière et deviennent de plus en plus sombres. Les "couleurs fondamentales" utilisées pour obtenir les autres sont le Cyan, le Magenta, et le Jaune. (imprimerie, peinture...)

par addition...

en additionnant les 3 couleurs primaires (Rouge, Bleu et Vert) du spectre visible, on recompose la lumière blanche. En les mélangeant 2 par 2, on obtient les couleurs secondaires. (arc en ciel, prisme...)



A noter

Le corps noir est un objet idéal qui absorberait toute l'énergie électromagnétique qu'il recevrait, sans en réfléchir ni en transmettre. Son spectre de rayonnement dépendra uniquement de la température. Son modèle, fondement de la physique quantique, a valu à Max Planck le prix Nobel de physique en 1918.





6

PROPRIÉTÉS DE LA LUMIÈRE

L'optique s'est perfectionnée jusqu'au XVIII^{ème} siècle avec le développement de l'optique ondulatoire. Au 20^{ème} siècle, la prise en compte des aspects corpusculaires de la lumière, a permis l'explication de nombreux phénomènes.

XVIII^{ème} siècle

INTERFÉRENCES

On parle d'interférences lorsque deux ondes de même type se rencontrent et interagissent l'une avec l'autre. Elles sont à l'origine des phénomènes de diffraction découverts, pour la lumière, par Grimaldi en 1665. Elles furent interprétées comme un comportement ondulatoire par Huygens, expérimentées par Young puis étudiées par Fresnel.

Les fentes de Young désignent une expérience qui consiste à faire interférer deux faisceaux de lumière issus d'une même source, en les faisant passer par deux petits trous percés dans un plan opaque. Cette expérience fut réalisée par Thomas Young en 1801 et a permis de comprendre le comportement ondulatoire et la nature de la lumière.



Figure de diffraction de la lumière (© CNRS Photothèque / MEDARD Laurence)

XX^{ème} siècle

ÉMISSION DE LUMIÈRE

En 1913, la théorie des quanta remporte un grand succès grâce à Niels Bohr qui émet l'hypothèse fondamentale qu'un atome ne peut exister que dans une suite discontinue d'états stationnaires auxquels correspondent des niveaux d'énergie $E_1, E_2...$

Lorsque l'atome passe d'un niveau d'énergie E_2 à un niveau plus bas E_1 , il y a émission d'un photon dont le rayonnement répond à la relation : $E_2 - E_1 = (h \times c) / \lambda$. L'état de plus basse énergie est l'état fondamental stable.

Principaux processus d'interaction entre lumière et matière

l'absorption

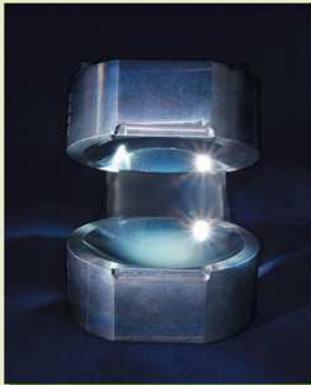
Lorsqu'une particule (atome, ion ou molécule) est soumise à une onde lumineuse, elle peut absorber un photon. Elle passera alors dans un état électronique d'énergie supérieure E_2 . Ce processus d'absorption est d'autant plus efficace que l'énergie du photon est proche de l'écart entre deux niveaux d'énergie de la particule.

l'émission spontanée

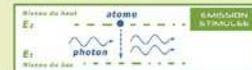
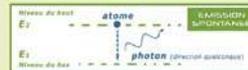
Les états électroniques excités n'étant pas stables, la particule (atome, ion ou molécule) retombera rapidement dans son état énergétique fondamental en émettant un photon. Ce dernier pourra être émis dans n'importe quelle direction. L'énergie du photon émis sera égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux atomiques.

l'émission stimulée

une particule (atome, ion, molécule) excitée par un photon émet un autre photon ayant les mêmes caractéristiques (comme s'il était un clone du photon incident). Cette émission stimulée est à la base du fonctionnement des lasers.



La "boîte à photons" dans laquelle les chercheurs ont enregistré la vie et la mort d'un photon unique. (© CNRS Photothèque)



A noter

La théorie des quanta a servi de pont entre la physique classique et la physique quantique. Le symbole de la physique quantique, la mécanique quantique, est née en 1925.

La diffraction est la propriété qu'ont les ondes à "contourner" un obstacle qui ne leur est pas complètement transparent. Représentative de la nature ondulatoire de la lumière, elle s'observe avec la lumière, mais également avec le son, les vagues, les neutrons ou la matière.





7

LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation...



Oscillateur paramétrique compact pour la détection d'espèces chimiques (© Oniva)

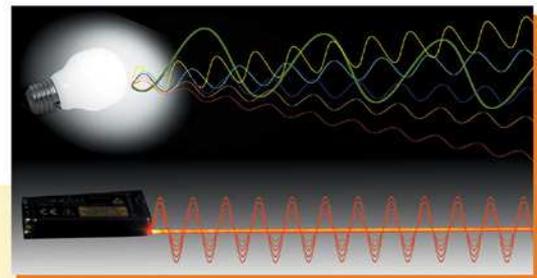
Si le principe d'amplification optique a été découvert par Einstein en 1917, il a fallu près de 50 ans pour que le 1^{er} laser voie le jour...



LUMIÈRE BLANCHE ET LASER

La lumière blanche (soleil, ampoule...) :

- est constituée de plusieurs couleurs, ...avec un prisme, la lumière blanche est décomposée en plusieurs couleurs.
- émet de la lumière dans toutes les directions, ...elle est dite multidirectionnelle,
- est désordonnée. ...les ondes qui la composent ne sont pas émises en même temps et oscillent de manière désordonnée.



La lumière laser :

- émet une lumière très intense, ...d'où l'importance de ne jamais recevoir un faisceau laser dans les yeux.
- est constituée d'une seule couleur (monochromatique), ...cette couleur est définie par le choix du milieu laser. Il en existe de toutes les couleurs. Certains lasers sont même constitués de lumière invisible comme les ondes infrarouges ou ultraviolettes.
- émet de la lumière dans une seule direction, ...le faisceau laser est parfaitement rectiligne et visible sur de grandes distances. Il est peu divergent contrairement, par exemple, à la lumière d'une lampe de poche. Cette propriété est utilisée pour de nombreuses applications.
- est ordonnée ou cohérente. ...toutes les ondes sont en phase : elles oscillent en même temps, de la même manière, avec ordre. La directivité de la lumière laser, conséquence de cette cohérence, va par exemple, permettre la lecture des disques compacts.

A noter

Les 2 propriétés qui font le succès du laser sont sa **cohérence** (tous les photons qui le composent sont des clones) et sa **densité de puissance** (possibilité de concentrer beaucoup de puissance sur une petite surface).

Contrairement à la lumière du soleil, la **lumière laser** est monochromatique et directionnelle. On peut la guider sur de longues distances et la concentrer (grâce à des lentilles) pour obtenir des puissances phénoménales.





8 FONCTIONNEMENT D'UN LASER

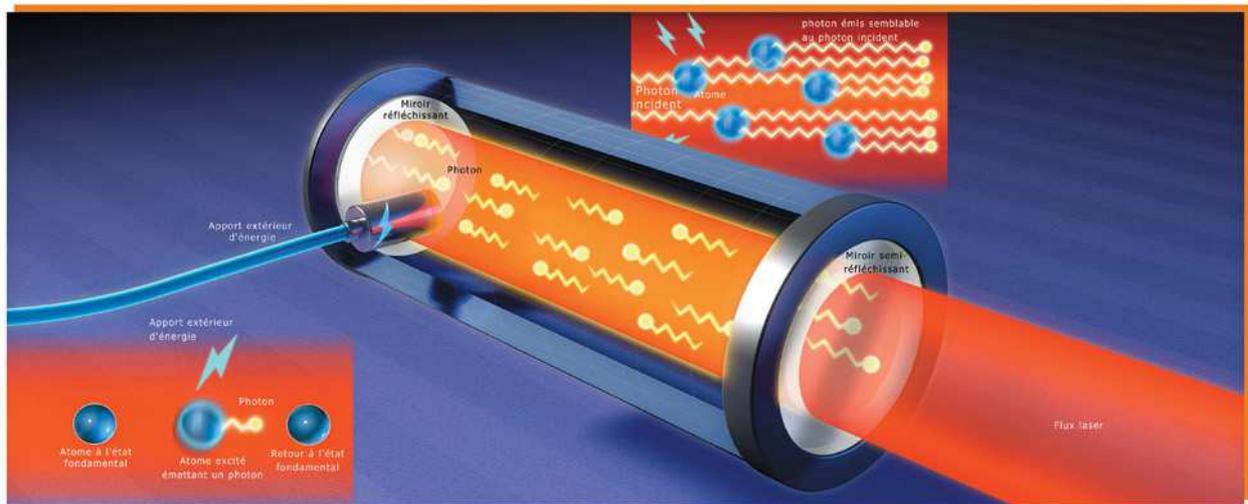
1 LES COMPOSANTES

- Un laser est constitué de trois éléments :
- un milieu actif (*solide, liquide ou gazeux*) dans lequel la lumière peut être amplifiée par le processus d'émission stimulée,
 - un mécanisme dit "de pompage" qui confère de l'énergie à ce milieu,
 - et un résonateur optique qui sert à multiplier l'amplification.

2 LE POMPAGE

Lorsqu'un atome est excité, il émet un photon d'une longueur d'onde caractéristique pour revenir à un niveau d'énergie plus bas.
Pour obtenir la lumière laser, il faut donc en premier lieu exciter les atomes du milieu actif en leur fournissant de l'énergie (*électrique, chimique ou lumineuse*). C'est le pompage.

"Inventé par Alfred Kastler, le pompage optique permet de réaliser une inversion de population", explique Claude Cohen-Tannoudji du laboratoire Kastler-Brossel, prix Nobel de physique en 1997.
Le milieu actif possède alors d'avantage d'atomes d'énergie élevée que d'atomes de basse énergie.



© Illustration : WWW.GREGCIRADE.COM / textes : Fabrice Demarthon pour le journal du CNRS

3 L'AMPLIFICATION

La production de lumière par un atome excité peut être soit spontanée, le photon part alors dans n'importe quelle direction, soit stimulée.
Dans ce cas, c'est un photon dit incident qui "pousse" l'atome à se désexciter en émettant un photon en tout point identique au premier (*même longueur d'onde et même direction*).
Ce second pourra à son tour désexciter d'autres atomes, qui généreront eux aussi des photons identiques. Petit à petit, les photons s'ajoutent les uns aux autres et forment la lumière amplifiée.

4 PRODUCTION DU FAISCEAU

Le milieu actif du laser est enfermé dans un résonateur optique qui sert à multiplier l'amplification de la lumière afin de créer le faisceau laser.
Le plus souvent, il s'agit d'une cavité aux extrémités de laquelle se trouvent deux miroirs, l'un totalement réfléchissant, l'autre faiblement transparent (*dans le cas des diodes laser, les miroirs ont disparu et c'est la structure cristalline de la diode elle-même qui forme les parois réfléchissantes du résonateur optique*).

Les photons sont renvoyés dans le milieu actif par les miroirs qui se font face, accroissant ainsi l'amplification.
Une faible fraction de cette lumière traverse le miroir faiblement transparent : c'est le faisceau laser.





9

LA PUISSANCE DES LASERS

Le fait de délivrer l'énergie sur des temps très courts permet à certains lasers d'atteindre des puissances "de crête" extrêmement élevées, jusqu'à plusieurs térawatts. C'est le cas du fameux laser femtoseconde apparu au milieu des années 80.



Lasers bleus fabriqués par la société Oxixus (© Essat / Laurent Felchot)

PETIT LEXIQUE DU LASER

LONGUEUR D'ONDE λ	La longueur d'onde est la distance entre 2 crêtes d'une onde. La couleur d'un laser est directement liée à sa longueur d'onde. En fonction de l'utilisation souhaitée on utilisera des lasers rouge, bleu, vert... ou invisibles (infrarouge ou ultraviolet). Il existe des lasers "accordables" dont on peut régler la longueur d'onde.	Le mètre (m) 1 m = 10 ³ millimètres (mm) 1 m = 10 ⁶ micromètres (μ m) 1 m = 10 ⁹ nanomètres (nm)
FREQUENCE ν	La fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde. Elle désigne le nombre de fois qu'un phénomène périodique se reproduit par unité de temps.	Le hertz (Hz) 1 mégahertz (MHz) = 10 ⁶ Hz 1 gigahertz (GHz) = 10 ⁹ Hz 1 térahertz (THz) = 10 ¹² Hz
ENERGIE Q	L'énergie d'un faisceau laser dépend de l'énergie des photons émis et du nombre de photons présents dans le faisceau. Plus il y a de photons, plus le faisceau sera énergétique.	Le joule (J) 1 kilojoule = 1000 J 1 mégajoule = 10 ⁶ J
PUISSANCE P	La puissance est la quantité d'énergie émise par unité de temps. L'unité de puissance est le watt qui correspond à 1 joule fourni par seconde. Dans le cas de lasers impulsions, il faut distinguer la "puissance moyenne de sortie" et la "puissance crête".	Le watt (W) 1 térawatt = 10 ¹² W 1 pétawatt = 10 ¹⁵ W
DUREE IMPULSION	Elle permet de mesurer la durée de chaque impulsion émise par le laser. Elle ne s'applique pas aux lasers à émission continue. Le laser femtoseconde produit des impulsions ultra-courtes dont la durée est de l'ordre de quelques femtosecondes.	La seconde (s) 1 s = 10 ¹² picosecondes (ps) 1 s = 10 ¹⁵ femtosecondes (fs)
INTENSITE	L'intensité se définit en nombre de watts par mètre carré. Bien que certains lasers semblent peu puissants, leur lumière est concentrée sur une toute petite surface. C'est pourquoi il est très important de ne jamais recevoir un faisceau laser directement dans les yeux. L'éclairement du laser térawatt peut atteindre 10 ¹⁴ W/cm ² , soit la concentration sur un centimètre carré de la lumière émise par 10 millions de milliards d'ampoules de 100 W.	Le watt par mètre carré (W/m ²) ou watt par centimètre carré (W/cm ²)

LASERS CONTINUS OU IMPULSIONNELS

La lumière émise par un laser peut être continue ou impulsionnelle.

Laser impulsionnel

Si la pompe envoie par intermittence une décharge d'énergie, la lumière laser est produite de manière discontinue, par impulsions très brèves et très intenses. Le laser sera dit **impulsionnel**. On distinguera :

- la **puissance moyenne de sortie**, qui tient compte des intervalles de temps entre chaque impulsion,
- la **puissance crête**, qui est la puissance maximale atteinte lors de l'impulsion.

Laser continu

Lorsque la source d'énergie excite en continu les particules du milieu laser, l'oscillateur produit de la lumière laser **en continu**.

Après une rapide phase de mise en route, le rayon sortant garde une puissance constante.

Dans le cas des lasers continus, l'étendue des puissances de sortie va classiquement de la dizaine de nanowatts à 50 kilowatts.

Dans certaines conditions, des lasers pompés en continu peuvent émettre des impulsions répétitives et très brèves (laser à blocage de modes).

COMPARAISON DE LA PUISSANCE ET DE L'INTENSITE DE DIFFERENTES SOURCES LUMINEUSES

Source	Puissance (W)	Intensité (W/m ²)
Soleil	4 x 10 ²⁶	1400 (à la surface de la terre)
Ampoule à incandescence	100	8 (à 1m de l'ampoule)
Laser hélium néon	0,005	1100
Laser CO ₂	20	4 000 000

A noter

Un laser d'un watt qui donnera sa lumière de façon continue aura une puissance d'un joule par seconde. Par contre, s'il concentre une énergie d'un joule en une décharge lumineuse d'une milliseconde, sa puissance crête sera multipliée par mille et sera d'un kilowatt.





10 LES DIFFÉRENTS TYPES DE LASERS

En fonction de la nature du milieu d'émission des photons, on peut classer les lasers en différentes familles : les lasers cristallins, les lasers à liquide colorant, les lasers à gaz, les lasers à semi-conducteurs, les lasers à fibre...

1960



© the International Commission for Optics

LASER À RUBIS

Particularité : le premier laser inventé par Théodore Maiman.
Famille : gaz
Milieu laser : rubis
Couleur : rouge
Applications : holographie, suppression de tatouages.
Type émission : impulsion
Pompage optique

1962



© administration américaine

LASER CO₂

Particularité : laser à gaz utilisé surtout pour sa forte puissance.
Famille : gaz
Milieu laser : Mélange gazeux, CO₂
Couleur : invisible (infrarouge)
Applications : usinage des matériaux (coupe, soudure), chirurgie...
Type émission : impulsion et continu
Pompage électrique

1962



© CNRS Photothèque / Vrignaud François (labo XLIM)

LASER À FIBRE

Particularité : dernier né de la technologie laser.
Famille : solide
Milieu laser : fibre optique dopée
Couleur : visible ou infrarouge (fonction du dopant)
Applications : usinage, télémétrie, télécoms...
Type émission : continu et impulsion
Pompage optique par un autre laser

1966



© Han-Kwan (IPAM - Amsterdam, Hollande)

LASER À COLORANT

Particularité : très grande précision, très grande accordabilité.
Famille : liquide
Milieu laser : colorant dans solvant
Couleur : fonction du colorant
Applications : spectroscopie, suppression taches naissance, séparation isotopique...
Type émission : continu et impulsion
Pompage optique par un autre laser

1960

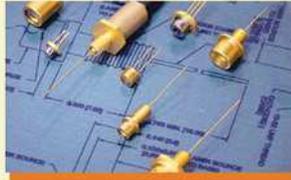


© Laboratoire Kastler-Brossel

LASER HÉLIUM NEON

Particularité : premier laser à gaz construit. Connu pour sa pureté et la directivité du faisceau obtenu. Peu coûteux à produire.
Famille : gaz
Milieu laser : gaz hélium-néon
Couleur : rouge, vert, jaune, infrarouge
Applications : holographie, code-barres, alignement, spectroscopie, spectacles...
Type émission : continu
Pompage électrique

1962



DIODE LASER

Particularité : représente l'immense majorité des lasers utilisés dans le monde.
Famille : solide
Milieu laser : semi-conducteur
Couleur : visible, infrarouge
Applications : lecteurs optiques, télécommunications, imprimantes, pompage pour lasers, pointeurs, usinage, armes, etc...
Type émission : continu et impulsion
Pompage électrique

1964



© CNRS Photothèque / GODEFROY S (Labo Aime Cotton)

LASER Nd YAG

Particularité : laser parmi les plus courants.
Famille : solide
Milieu laser : grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd)
Couleur : invisible (infrarouge)
Applications : ophtalmologie, métallurgie, spectacles, télémétrie, chirurgie...
Type émission : continu et impulsion
Pompage optique (lampes flash ou laser)

1966



LASER À EXCIMÈRES

Particularité : grande puissance d'émission et grande efficacité.
Famille : gaz
Milieu laser : mélange de gaz rare et d'halogène.
Couleur : invisible (ultraviolet)
Applications : micromécanique, industrie des semi-conducteurs, chirurgie des yeux...
Type émission : impulsion
Pompage électrique

A noter



Les rayonnements laser présentent des risques plus ou moins importants pour la santé. Afin de prévenir d'éventuels risques, des normes de sécurité, allant de la classe 1 (lasers inoffensifs) à la classe 4 (précautions extrêmes) ont été mises en place.





11

DES LASERS SI DIFFÉRENTS

Si le laser mégajoule est le projet de laser le plus énergétique du monde, les diodes lasers à semi-conducteurs, petites et performantes, sont de loin les lasers les plus utilisés et les plus vendus !...



Le laser le plus vendu !

Module diode laser

1962



LA DIODE LASER UN CONCENTRÉ DE PUISSANCE

Les diodes laser à semi-conducteurs ont aujourd'hui atteint un niveau de maturité technologique garantissant leur omniprésence dans de nombreux secteurs d'applications.

Si les communications par fibre ont d'abord été le moteur principal de leur développement, d'autres applications comme la lecture et le stockage de l'information sur disque optique ou le pompage optique de laser de puissance ont pris le relais.

On les retrouve également dans les dispositifs électroniques de mesure de distance, de vitesse, de guidage et de pointage précis.

Si l'on considère :

- le rapport entre leur taille (couche active de 0,1 à 2 μm) et leur puissance (jusqu'à plusieurs watts),
- leur efficacité très appréciable (proche de 50 %),
- leur facilité à être produite en masse à faible coût.

Les diodes lasers sont très performantes et leur densité de puissance, proche du gigawatt par cm^2 , est monstrueuse !...

Ce sont également les lasers les plus utilisés.



Le laser le plus énergétique au monde !

Mise en place de la chambre d'expérience vers laquelle convergeront les lasers du Laser Mégajoule (© R. Laquerrière - CEA)

2011



LE LASER MEGAJOULE UNE PUISSANCE CONCENTRÉE

Le laser Mégajoule (CEA) est le projet de laser le plus énergétique d'Europe. Installé sur la commune du Barp (Gironde), il sera opérationnel fin 2011.

Le bâtiment mesurera plus de 300 m et abritera 60 chaînes laser de 4 faisceaux chacune (soit 240 faisceaux).

Il sera capable de concentrer (à l'aide de miroirs, d'optiques, de lentilles...) une très forte quantité d'énergie - environ 1,8 mégajoules - sur une microbille de 2,5 millimètres de diamètre, dans un temps relativement long (ce qui explique que l'on batte des records d'énergie et pas de puissance).

Les caractéristiques de cette installation exceptionnelle ont été définies pour obtenir les conditions de température et de pression requises pour atteindre la fusion thermonucléaire.

Le laser Mégajoule permettra d'étudier en laboratoire les processus physiques mis en oeuvre dans l'étape finale du fonctionnement d'une arme nucléaire.

Certains mouvements pacifiste et anti-nucléaire s'opposent à la construction du Mégajoule ou demandent à ce qu'il soit exclusivement consacré à la recherche civile.

A noter

Le 10 mars 2009, les 192 lasers du National Ignition Facility (équivalent américain du laser Mégajoule), situé en Californie, ont concentré 1,1 mégajoule sur une cible minuscule. C'est le premier laboratoire au monde à dépasser le mégajoule pour des faisceaux laser en ultraviolet.





12

LE LASER ET SES APPLICATIONS



Spectacle Son et lumière sur l'île d'Ada Ciganlija à Belgrade, Serbie (© Stock xchng)

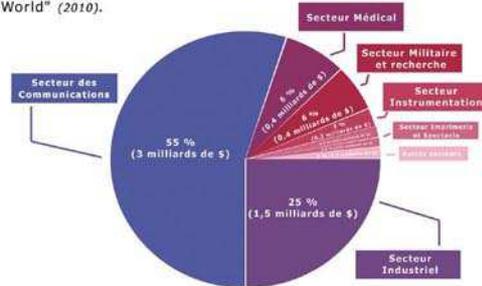
Il existe actuellement plus d'une centaine de modèles de lasers différents. A cette grande variété correspondent de nombreuses applications.



LE MARCHÉ DES LASERS EN 2010

- Le laser représente au niveau mondial un marché d'environ 5,5 milliards de dollars.
- Plus de 50% des lasers vendus sont destinés au secteur des communications.
- La seconde demande provient du secteur industriel où le laser est utilisé pour la découpe, la soudure de matériaux...
- Les diodes lasers représentent 60% du marché total.

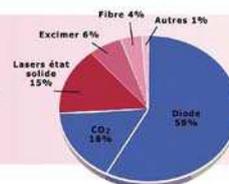
Tableau présentant le marché des ventes de lasers lors de ces 5 dernières années. Les chiffres proviennent du magazine américain "Laser Focus World" (2010).



Marché Total=5 Milliards de \$

A noter

Pourcentage des recettes mondiales liées à la vente des différents types de laser (magazine "Laser Focus World")





13

TELÉCOMS ET DISQUE COMPACT

Les télécoms et le stockage optique sont les deux secteurs d'activité en tête des ventes de lasers.

Le laser (avec la fibre optique) a contribué à l'explosion des télécommunications et a assuré le bon fonctionnement de nos fameux CD, DVD et autres Blu-Ray.



LES TÉLÉCOMS

Qui aurait pu penser en 1960, lorsque le laser a été inventé, que l'on puisse un jour l'utiliser pour écouter de la musique ou pour communiquer à travers des fils en verre ?

Certain avaient bien pensé à l'exploiter comme moyen de communication...

Hélas, en traversant l'atmosphère et les différents obstacles naturels ou artificiels, notre faisceau

laser va subir des pertes considérables qui le rendront inutilisable...

C'est en 1966 qu'un ingénieur anglo-américain démontre qu'une fibre optique dans laquelle circulerait de la lumière peut être utilisée comme moyen de télécommunication.

Pour ses travaux, Charles Kao recevra le Prix Nobel de physique en 2009.



Charles Kao au travail dans son laboratoire de Harlow (Angleterre) en 1966. (© Standard Telecommunications Laboratories Ltd. archive)

Une fibre optique est constituée d'un cœur et d'une gaine, tous les deux en verre, mais possédant un indice de réfraction différent. Cet agencement coaxial permet de conserver les photons à l'intérieur de la fibre, celle-ci jouant le rôle de guide d'ondes. Une configuration qui, alliée à l'utilisation d'un verre sans impuretés, réduit les pertes de manière importante et permet à la lumière de circuler sur de très grandes distances. (Photo © Stock xchng)



STOCKAGE INFORMATIQUE

Les CD ont supplanté les disques en vinyle à la fin des années 1980. Dès les années 2000, ce sont, les cassettes magnétiques VHS qui disparaissent au profit des DVD.

Le disque compact a été lancé en 1979 par la firme Philips.

La surface du CD est parsemée de minuscules alvéoles qui réfléchissent le rayon laser émis par la tête de lecture. Un détecteur mesure les variations de la lumière réfléchi qui lui parviennent sous la forme d'un code binaire.

La taille de ces alvéoles dépend de la longueur d'onde du laser à semi-conducteurs utilisé pour la lecture.

Les CD utilisent une longueur d'onde de 780 nanomètres (infrarouge proche) et peuvent stocker jusqu'à 700 mégaoctets, soit près de 80 minutes

En 1995 apparaît le DVD.

Utilisant une longueur d'onde de 650 nm (rouge), plus petite que celle du CD, il permet un meilleur stockage de l'information. Un DVD classique peut contenir 4,7 gigaoctets.

Les progrès technologiques permettent de développer au début des années 2000 des lasers à semi-conducteurs émettant dans la couleur bleue violette (longueur d'onde nettement plus petite que le rouge).

En 2006, le Blu-Ray Disc...

... bat tous les records de stockage d'information.

Utilisant une longueur d'onde de 405 nm, il peut contenir jusqu'à 50 gigaoctets.



A noter

Les recettes liées aux lasers utilisés dans le secteur des communications sont, en 2010, de l'ordre de 3,3 milliards de dollars.

En 2010, une seule fibre optique est capable de transmettre l'équivalent de 500 DVD en une seconde ou bien la totalité des communications téléphoniques entre l'Europe et les Etats Unis. (Sébastien Bigo, Alcatel-Lucent)





14

INDUSTRIE ET MÉDECINE

Les lasers sont capables de couper, marquer, percer de très nombreux matériaux. C'est la raison pour laquelle on les retrouve aussi souvent dans le milieu industriel. Les applications lasers sont également nombreuses en médecine où près de 200 000 interventions les utilisent chaque année en France.



Tête d'un laser industriel (© Stock xchng)

APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Les applications industrielles du laser dans le micro-usinage et comme moyen de lecture (lecteurs de codes barres) se sont développées dans les années 1970.

On utilise les lasers pour leur puissance et leur précision dans des opérations de marquage, soudage, perçage, découpage (de tôle métalliques de plusieurs centimètres d'épaisseur) ou découpage.

On emploie également des faisceaux-lasers pour aligner des machines sur une chaîne de montage ou implanter des bâtiments sur un terrain.

La précision du laser permet de réaliser ou de marquer des pièces à l'échelle du micromètre (horlogerie, contrefaçon).

La télémétrie

Le laser est aussi utilisé dans la télémétrie.

Un télémètre sert dans la construction des bâtiments pour, par exemple, connaître la largeur, la hauteur ou la largeur d'une pièce.

A une autre échelle, la télémétrie laser est employée pour mesurer précisément la distance Terre-Lune grâce à des miroirs placés sur la Lune lors des missions Apollo. La mesure du temps d'aller retour de la lumière permet de déterminer la distance avec une très faible incertitude (3 mm en 1999).

Ces mesures ont permis de montrer que notre satellite unique s'éloigne de nous... de 3,8 m par siècle !

APPLICATIONS MÉDICALES

Les lasers ont de nombreuses applications médicales.

En ophtalmologie (traitement de la myopie et de la cataracte), en dermatologie (épilation, détatouage), en dentisterie (soins des gencives et traitement des caries), en phlébologie (traitement des varices), en allergologie...

Les techniques les plus récentes permettent d'observer des processus de taille microscopique, à l'intérieur de cellules vivantes par exemple.

En chirurgie, on peut sectionner, réparer des tissus, coaguler des vaisseaux sanguins, détruire des lésions sans léser les zones voisines...

Le laser peut également générer une lumière tueuse de cellules malades qui absorbent préférentiellement un marqueur chimique.

La thérapie photodynamique permet une détection précoce et des traitements sélectifs pour certains cancers.



La technique du Lasik est une intervention chirurgicale de l'œil. © Clear Vision Laser Clinic

A noter

Les recettes liées aux lasers utilisés dans le domaine industriel sont, en 2010, de l'ordre de 1,5 milliards de dollars.

Les recettes liées aux lasers utilisés dans le domaine médical sont, en 2010, de l'ordre de 360 millions de dollars.

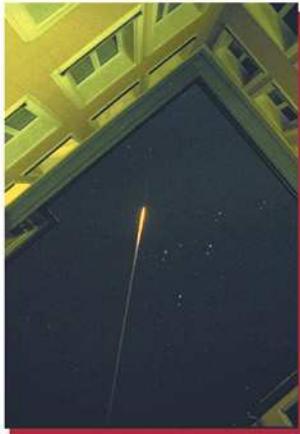




15

RECHERCHE ET DÉFENSE

Le laser a révolutionné de nombreuses disciplines scientifiques (télécoms, astronomie, refroidissement d'atome...). Il a également permis le développement de différents types d'armes essentiels pour les applications militaires.



A cause de sa grande puissance, le laser "Téramobile" initialement invisible devient blanc.
© CNRS Photothèque (Téramobile / WEDEKIN Karsten)



RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Quelques exemples de recherches liées aux technologies lasers...

Atomes ultra-froids

En 1997, Claude Cohen-Tannoudji a reçu le prix Nobel de physique pour ses travaux relatifs au refroidissement des atomes (aux environs de un milliardième de degré Kelvin au-dessus du zéro absolu) !

Le projet Téramobile

Ce projet franco-allemand permet d'effectuer des mesures de guidage de foudre sur le terrain. L'énergie produite étant concentrée dans un temps très bref, la puissance de ce laser est exceptionnellement grande : cinq térawatts.

Fusion thermonucléaire

Une des voies vers la fusion thermonucléaire contrôlée passe par l'usage de lasers ultra puissants, comme le laser Mégajoule en développement à Bordeaux.

Les réseaux d'accès haut-débit du futur

Devant notre consommation de plus en plus importante et intense des technologies internet, il est nécessaire de développer des systèmes optiques fiables, peu coûteux et économes en énergie. C'est l'objectif poursuivi par le laboratoire Foton et par la plate-forme Persyst à travers divers projets nationaux et européens. Certains de ces projets (TELDOT par exemple) proposent l'utilisation de lasers innovants, appelés "lasers à ilots quantiques".

Le laser en chimie

Grâce à des impulsions ultra brèves délivrées par certains lasers "femtosecondes, il est possible de suivre à l'échelle atomique et moléculaire le déroulement d'une réaction chimique. En 1999, Ahmed Hassan Zewail a reçu le Prix Nobel de chimie pour ses travaux en femtochimie.



APPLICATIONS MILITAIRES

La guerre du Golfe et le début des années 90 ont constitué un tournant dans l'utilisation des technologies optiques qui peuvent devenir des liens de synchronisation, des armes, des outils de guidage, des outils de vision, des leurres optiques pour tromper des missiles ...

Des systèmes de guidage...

à laser ont été développés pour les missiles, les avions et les satellites.

Des canons laser...

ont également été proposés comme nouvelle classe d'armement antimissile par le président américain Ronald Reagan en 1983 dans son programme IDS (Initiative de Défense Stratégique); plusieurs tests ont été conduits.

Bombes nucléaires...

D'autre part, la capacité que possèdent les lasers à liquide d'effectuer une excitation sélective des atomes pourrait ouvrir la voie à de nouveaux systèmes de séparation des isotopes, trouvant des applications notamment dans la fabrication des **bombes nucléaires**.

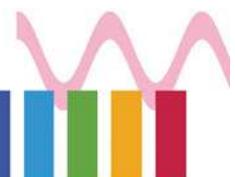
Recherches militaires sur les lasers
(© Air Force Research Laboratory)



A noter

Les recettes liées aux lasers utilisés dans les domaines militaire et de la recherche sont, en 2010, de l'ordre de 310 millions de dollars.

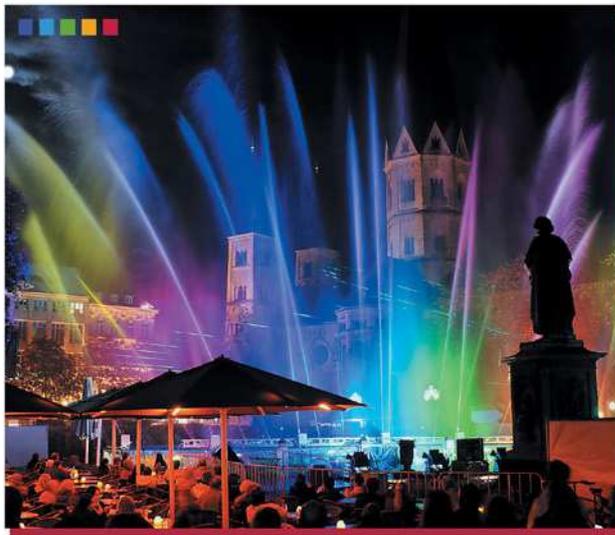
Au cours des années 1960 les physiciens ont découvert dans certains nuages interstellaires de véritables **lasers naturels** ! Les émissions y étaient si intenses qu'elles ne pouvaient résulter que d'une amplification par émission stimulée...





16 ... ET DANS NOTRE VIE QUOTIDIENNE

Les lasers se sont installés dans notre vie quotidienne, au coeur de nos lecteurs de disques compacts ou dans les lecteurs des codes-barres dans les supermarchés. Ils font également la beauté des spectacles qui portent leur nom.



PARTOUT ET POUR TOUS !

Les lasers font partie de notre quotidien.

On les retrouve pour :

- la mesure de distances et les niveaux dans le bricolage,
- les exposés et les cours avec les **pointeurs lasers**,
- imprimer les affiches, posters...
- lire les codes-barres,
- mesurer la vitesse des voitures sur les routes.

Les lasers sont également utilisés pour des raisons esthétiques :

- l'**holographie couleur** permet de réaliser de la photographie d'art en trois dimensions, tandis que les shows laser font depuis longtemps partie du monde du spectacle.
- ballets et arabesques de pinceaux lumineux dans le ciel, éclairages de concerts et spectacles son et lumière ont propulsé la technique laser aux avant-postes de l'art contemporain.

Le spectacle laser "Klangwelle" est proposé tous les ans dans la ville de Bonn en Allemagne.

CHERCHEZ L'INTRUS !



A noter

Dans le film "La Guerre des étoiles", on peut voir des sabres laser ! Malheureusement, ça n'est que du cinéma... Si ces lames étaient des vrais lasers, elles n'auraient pas de fin. En effet, un rayon laser ne peut s'arrêter que s'il y a un obstacle devant lui.

