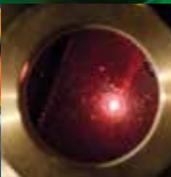
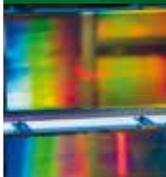


9 → Le laser : un concentré de lumière

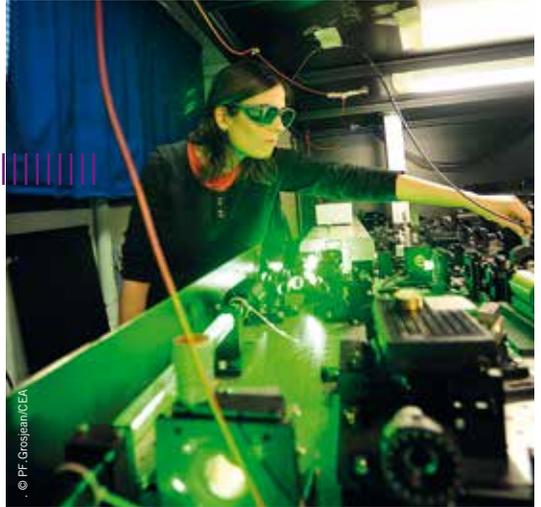


LA FABRICATION DE LA LUMIÈRE LASER
LES PROPRIETES DES LASERS
LES LASERS DE RECHERCHE
LES LASERS INDUSTRIELS



Le laser : un concentré de lumière

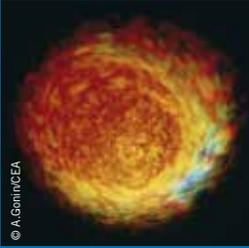
LA FABRICATION DE LA LUMIÈRE LASER	4
L'émission stimulée	6
L'inversion de population	7
L'oscillateur laser	7
Les amplificateurs laser	8
LES PROPRIETES DES LASERS	9
La couleur d'un laser	10
La puissance d'un laser	10
L'intensité d'un laser	11
La cohérence d'un laser	12



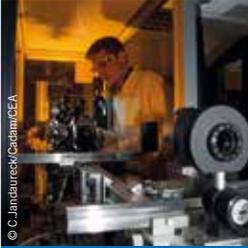
Démarrage du laser Luca, alignement du faisceau et contrôle de l'énergie des impulsions.

LES LASERS DE RECHERCHE	13
Pour la fusion	14
Pour la recherche fondamentale	16

LES LASERS INDUSTRIELS	20
Des microlasers	21
Pour le soudage et la découpe	21
Pour le traitement de surface	23
Principales utilisations des lasers	24
Des applications innovantes	25
Indispensables, mais attention !	27



© A.Gonin/CEA



© C.Jandereck/Cadarn/CEA



© Photo 123

Les caractéristiques particulières de la lumière laser sont exploitées dans de multiples domaines.

“Au service de la science, de la médecine, du transport de l’information, de l’industrie et au cœur de notre vie quotidienne, le laser est partout présent.”

Dans les années 60 naissent les premiers LASERs, acronyme de “*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*” (amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement). Très vite, leur lumière magique a trouvé de multiples applications. Les lasers se sont installés dans notre vie quotidienne : CD, DVD, dans nos imprimantes et les lecteurs de codes-barres des supermarchés. Ils font la beauté des spectacles qui portent leur nom. D’autres, dans l’industrie, coupent, soudent et percent. Les faisceaux rectilignes des lasers servent aussi à aligner des routes, des tunnels... En médecine, ils réparent ou brûlent les zones malades sans toucher aux parties saines. Mais pourquoi les lasers sont-ils capables de faire toutes ces choses alors que la lumière ordinaire, émise par le Soleil ou une ampoule, ne peut pas les réaliser ?

Le CEA travaille depuis longtemps sur toutes les formes de lasers. Les chercheurs les utilisent dans leurs travaux pour des applications classiques (alignement, perçage, spectroscopie...) et en développent de nouveaux pour des usages spécifiques et innovants. C’est le cas de nombreux lasers de puissance grâce auxquels ils étudient, par exemple, l’interaction d’une impulsion lumineuse très intense avec la matière. Outils indispensables pour de nombreuses applications, il ne faut pourtant pas ignorer les risques associés à leur manipulation, puisqu’ils véhiculent de l’énergie, ni oublier les précautions d’utilisation.

CONSTANT ET ORDONNÉ, LE FAISCEAU LASER RESTE
MONOCHROMATIQUE, FIN ET DIRECTIONNEL.

La fabrication de la lumière laser



© P. Stroppa / CEA

Caractérisation d'un faisceau laser nanoseconde
pour l'étude de l'interaction laser-matière et le traitement de surfaces.

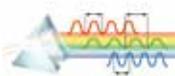
Les lasers produisent une lumière bien différente de la lumière ordinaire produite par le Soleil ou les ampoules.

Le tableau ci-dessous dresse leurs portraits robots et liste leurs dissemblances.

COMPARAISON DE LA LUMIÈRE ORDINAIRE ET DE LA LUMIÈRE LASER

LA LUMIÈRE ORDINAIRE EST...

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



- **Multidirectionnelle** : les différentes ondes lumineuses se déplacent dans toutes les directions de l'espace à partir de la source.
- **Désordonnée** : les différentes ondes lumineuses ne sont pas émises en même temps. Elles oscillent de manière désordonnée, indépendamment les unes des autres.

→ Il est possible de comparer la lumière ordinaire à une foule de personnes se déplaçant au hasard.

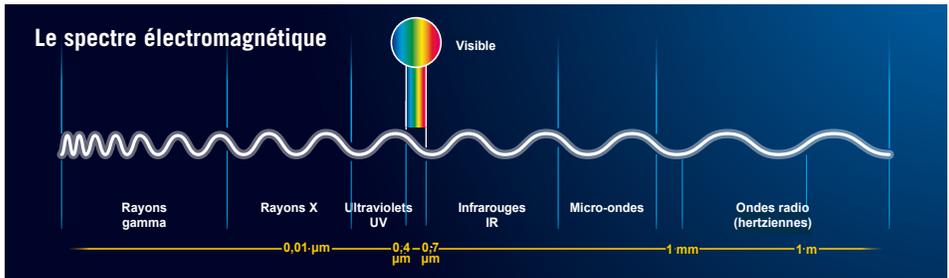
LA LUMIÈRE LASER EST...

- **D'une seule couleur** : on dit qu'elle est monochromatique. Il existe de nombreux types de lasers de couleurs différentes.



- **Unidirectionnelle** : toutes les ondes lumineuses se déplacent dans la même direction et forment un faisceau de lumière étroit, très peu divergent.
- **Ordonnée (ou cohérente)** : toutes les ondes sont en phase, c'est-à-dire avec leurs « bosses » et leurs « creux » aux mêmes endroits. C'est le caractère ondulatoire de la lumière laser.
- Peut-être émise en continu ou sur des temps très courts
- Peut être fortement concentrée, dans le temps et dans l'espace.

→ Il est possible de comparer la lumière laser à une armée de petits soldats « marchant au pas cadencé ».



Le photon est la particule de lumière.

Le spectre du rayonnement électromagnétique s'étend des ondes radio aux rayons gamma en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet et les rayons X. Ces rayons se distinguent par leur longueur d'onde (leur « couleur »), mesure de l'énergie que chaque photon transporte. Plus les ondes sont rapprochées (longueur d'onde plus courte), plus chaque photon associé transporte d'énergie. Inversement, les grandes longueurs d'onde sont caractéristiques de photons moins énergétiques.

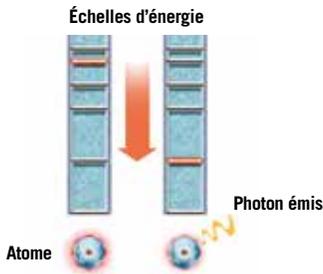
L'ÉMISSION STIMULÉE

Un atome, un ion ou une molécule **excité** peut libérer son énergie par « émission spontanée » d'un photon.

L'excitation d'un système est l'augmentation de son énergie.

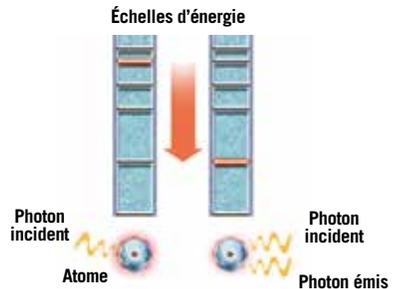
Il existe un autre mode prévu par Albert Einstein en 1917. Une particule (atome, ion ou molécule) excitée, qui reçoit un photon de la même énergie que celui qu'elle pourrait émettre de manière spontanée, émet un photon par l'effet dit « d'émission stimulée ». La particularité de ce type d'émission est que le photon stimulé prend strictement les mêmes caractéristiques (couleur, direction et phase) que le photon incident, comme si le second était la photocopie du premier.

Désexcitation spontanée d'un atome



Après un certain temps, un atome excité peut libérer de l'énergie spontanément sous forme de photons.

Désexcitation d'un atome par émission stimulée



Un atome excité peut libérer instantanément son trop-plein d'énergie par une émission stimulée lors de son interaction avec un photon identique à celui qu'il aurait libéré spontanément.



Etude des variations induites dans les matériaux lasers par pompage optique.

L'INVERSION DE POPULATION

L'émission stimulée agit donc comme une duplication de la lumière. En répétant de nombreuses fois ce phénomène, il est possible de créer une lumière qui est composée de photons tous identiques, de même couleur, émis dans la même direction comme s'ils étaient la copie conforme les uns des autres : c'est la lumière laser.

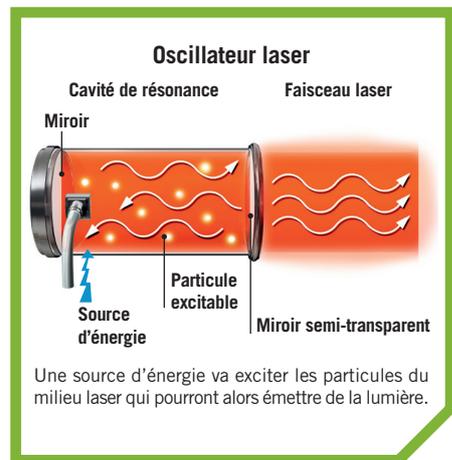
La seule découverte de l'émission stimulée n'a cependant pas été suffisante pour créer des lasers. En effet, dans la matière, les atomes, les ions ou les molécules sont beaucoup plus nombreux dans un état non excité que dans un état excité. Un photon incident a ainsi une probabilité plus grande d'être absorbé que d'engendrer un photon par émission stimulée. Pour produire de la lumière laser, il faut trouver un moyen de renverser la tendance et d'obtenir un milieu contenant plus de particules excitées que de particules au repos. Ce processus est appelé inversion de population.

Le physicien français Alfred Kastler, en 1949, a apporté une solution à ce problème : le pompage optique, qui permet de transférer de l'énergie lumineuse à des atomes. Ces résultats lui valurent le prix Nobel de physique en 1966. Le premier milieu utilisé a été le rubis : éclairé par de la lumière blanche, il absorbe une partie des couleurs (du vert au bleu) et émet de la lumière rouge (694,3 nanomètres de longueur d'onde), de manière stimulée ou non. Le pompage optique n'est pas la seule façon d'obtenir l'inversion de population, celle-ci peut aussi être provoquée, puis entretenue et par décharge électrique et certaines réactions chimiques.

L'OSCILLATEUR LASER

Pour fabriquer la lumière laser, il faut une source d'énergie et un oscillateur laser.

L'oscillateur est une sorte de cylindre allongé avec un miroir à chacune de ses extrémités. Il est rempli du milieu laser, matériau solide, liquide ou gazeux contenant des particules capables d'émettre des photons. Par exemple, le rubis est un milieu laser solide dont les atomes excitables sont ceux du chrome.



Comment l'oscillateur laser produit la lumière ?

Imaginons un photon émis spontanément dans le milieu laser dont la trajectoire est perpendiculaire aux plans des miroirs. En rencontrant une particule excitée, il va stimuler l'émission d'un deuxième photon. Les deux photons identiques peuvent à leur tour stimuler d'autres émissions de photons et ainsi de suite, jusqu'à ce que le groupe de photons rencontre le miroir. Leur trajectoire étant perpendiculaire au plan de celui-ci, ils seront renvoyés strictement en sens inverse et continueront de nouveau à provoquer des émissions stimulées. Dans cette réaction en chaîne, le nombre de photons identiques qui vont et viennent entre les miroirs va donc augmenter à chaque passage : la lumière laser est amplifiée. Pour que l'amplification soit efficace, il faut que les ondes de photons restent en phase après un aller-retour, c'est ce qui donne sa cohérence à la lumière. Pour que le faisceau sorte de l'oscillateur laser, l'un des deux miroirs est partiellement transparent, comme peut l'être un miroir sans tain. La plupart des photons sont réfléchis mais certains le traversent, permettant ainsi au faisceau laser de sortir.

Pour qu'un oscillateur produise de la lumière laser en continu, il faut que la source d'énergie, de type lumineuse, électrique ou chimique, soit elle-même continue. Après une rapide phase de mise en route, la lumière garde une **puissance** constante. Il existe des cavités

Energie délivrée par unité de temps.

L'énergie est mesurée en joule (J) et la puissance en watt (W).
 $1 \text{ W} = 1 \text{ J/seconde}$.

laser capables d'émettre la lumière laser de manière discontinue, par impulsions brèves et intenses. On dit alors que le laser est impulsionnel.

LES AMPLIFICATEURS LASER

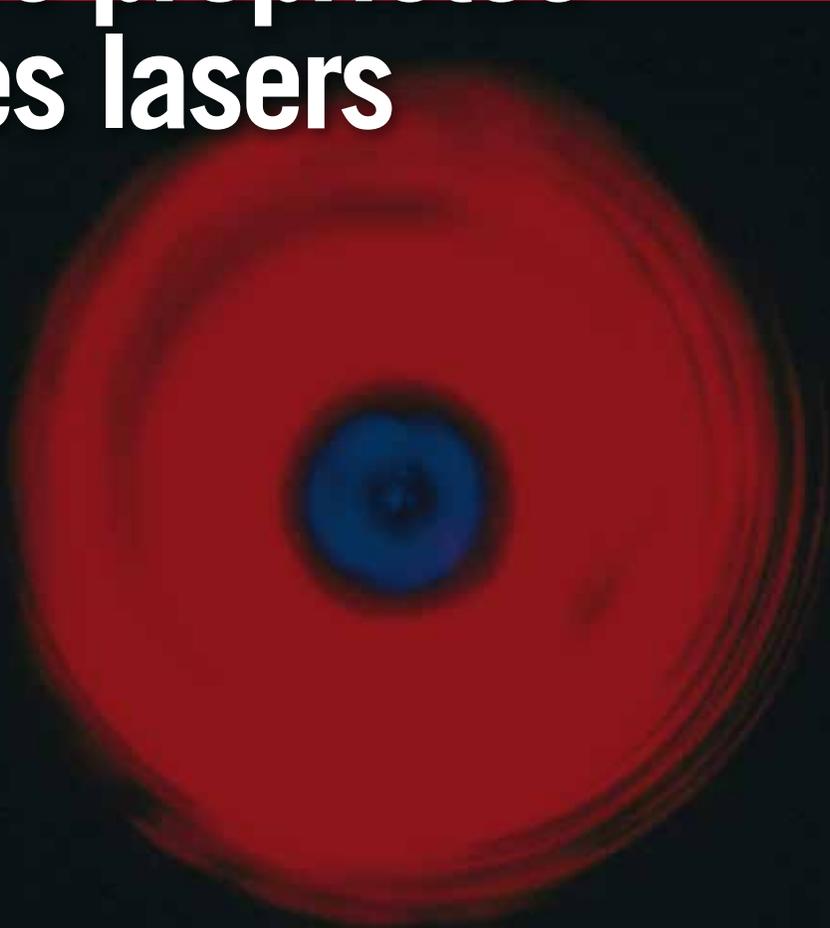
La lumière laser produite par un oscillateur peut, pour certaines applications, être utilisée directement. Mais dans le cas où il est nécessaire d'avoir une puissance beaucoup plus grande, il faut amplifier la puissance véhiculée par la lumière laser émise par l'oscillateur par une série d'amplificateurs. L'amplificateur est constitué d'un milieu laser. Son principe de fonctionnement est le même que celui de l'oscillateur. Les particules du milieu laser de l'amplificateur sont excitées par le faisceau laser sortant de l'oscillateur et les photons qui vont traverser l'amplificateur vont produire par réaction en chaîne de nombreux autres photons identiques : la puissance de la lumière laser est amplifiée. Pour obtenir la puissance recherchée, plusieurs amplificateurs sont placés sur la trajectoire du faisceau laser. Au fur et à mesure de l'augmentation de la puissance, il faut augmenter le diamètre du faisceau et des amplificateurs, pour éviter que les composants optiques (milieux laser en verre, miroirs, lentilles...), soumis à l'énergie grandissante de la lumière laser, ne soient endommagés. La série constituée de l'oscillateur, des amplificateurs et des autres composants optiques constitue une chaîne laser.



Maquette 1/5 de la chaîne laser de la Ligne d'intégration laser (LIL). Elle a permis de développer des logiciels d'alignement systémique des divers éléments (amplificateurs, miroirs...).

POUR REMPLIR LEUR MISSION, LES LASERS CHANGENT
DE COULEUR, DE PUISSANCE, ÉMETTENT
EN CONTINU OU PAR IMPULSIONS...

Les propriétés des lasers



LA COULEUR D'UN LASER

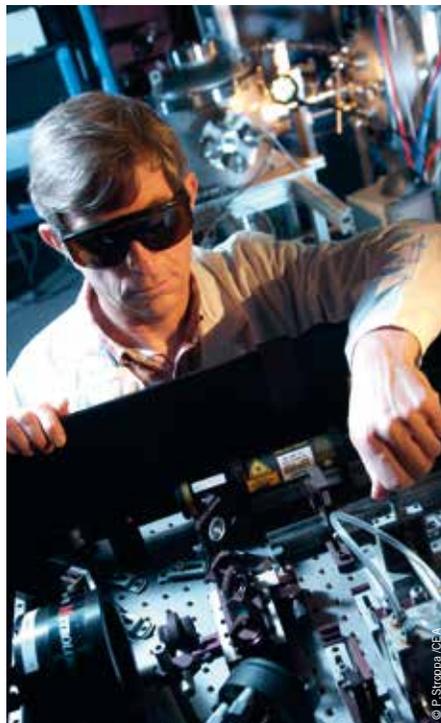
Elle est définie par le choix du milieu laser. Il existe des lasers de toutes les couleurs : rouge, bleu, vert... Certains d'entre eux sont même constitués de lumière invisible comme les ondes infrarouges ou ultraviolettes. Ces multiples couleurs font la beauté de nombreux spectacles son et lumière.

La plupart des lasers ne peuvent émettre que sur une seule longueur d'onde. L'utilisation de cristaux possédant des propriétés optiques non linéaires permet de convertir la longueur d'onde d'un laser pour obtenir des faisceaux de longueur d'onde doublée ou triplée. Il existe de plus des lasers dont on peut faire varier continuellement la longueur d'onde sur une certaine plage. On dit qu'ils sont accordables. Leur milieu laser a longtemps été un liquide contenant des molécules de colorant qui, une fois excitées, ont la particularité d'émettre sur un grand intervalle de longueurs d'onde. Maintenant, ils tendent à être remplacés par les **oscillateurs paramétriques optiques** (OPO)

Un OPO utilise un cristal non linéaire qui a la propriété d'émettre deux ondes complémentaires de longueurs d'onde différentes, qui changent avec l'orientation du cristal et la température.

et les diodes laser accordables, présentant l'avantage d'éviter l'utilisation de solvants.

Les diodes laser sont les sources les plus couramment utilisées actuellement. Leur rendement énergétique élevé et leur fabrication peu coûteuse ont permis leur industrialisation massive.



Réglage d'un laser à solide pompé par diodes de forte puissance, utilisé pour générer la lumière extrême UV (13,4 nm) pour des applications de photolithographie.

LA PUISSANCE D'UN LASER

La puissance se définit classiquement comme la quantité d'énergie émise par unité de temps. Un laser délivrant un joule pendant une seconde aura une puissance d'un watt. Dans le cas des lasers continus, l'étendue des puissances de sortie va classiquement de 1 mW pour des petites diodes laser, à 50 kW pour les lasers de soudage.



Mise en place de composants optiques d'un laser sur la Plate-forme Laser Femtoseconde Accordable (PLFA).

Dans le cas de lasers impulsionnels, il faut distinguer :

- la puissance moyenne délivrée, qui tient compte des intervalles de temps entre chaque impulsion,
- la puissance de crête, qui est la puissance atteinte lors d'une l'impulsion.

Ainsi, un laser d'un watt délivrant sa lumière de façon continue aura une puissance d'un watt ; mais s'il concentre une énergie d'un joule en une décharge lumineuse d'une milliseconde, sa puissance de crête va être multipliée par mille et atteindra un kilowatt.

En délivrant leur énergie sur des temps très courts (nanoseconde voire picoseconde ou

Nanoseconde : 10^{-9} s, soit un milliardième de seconde.
Picoseconde : 10^{-12} s, donc mille fois plus petit que la nanoseconde.
Femtoseconde : 10^{-15} s, donc mille fois plus petit que la picoseconde.

même femtoseconde), certains lasers d'étude peuvent atteindre des puissances de crête extrêmement élevées (jusqu'à 10 petawatts).

Petawatt : 10^{15} watts, soit un million de milliards de watts.

Plus modeste, un laser industriel dédié au soudage, de puissance moyenne de 1 kW, dispose d'une puissance de crête de 25 kW.

L'INTENSITÉ D'UN LASER

L'intensité, c'est la puissance par unité de surface, qui s'exprime en nombre de watts par centimètre carré (W/cm^2). Par exemple, l'intensité du Soleil peut atteindre $0,1 W/cm^2$. En focalisant cette lumière avec une loupe, celui-ci est porté à $100 W/cm^2$, ce qui suffit pour enflammer une feuille de papier.

Le diamètre des faisceaux de lumière émis par les lasers (plusieurs dizaines de mm pour les lasers industriels) est souvent trop grand et leur intensité trop faible pour une utilisation directe efficace. Il faut focaliser les faisceaux pour augmenter leur intensité. Dans certains lasers, la focalisation est obtenue par des systèmes optiques à lentilles. D'autres utilisent des dispositifs à miroirs, plus rarement des montages à réseau de diffraction focalisant.

Un laser de 20 W focalisé sur quelques micromètres produit une intensité de l'ordre du milliard de W/cm^2 . Avec un laser impulsionnel de quelques mJ, on atteint très facilement les centaines de milliards de W/cm^2 . La focalisation est alors obtenue par des systèmes optiques plus ou moins complexes, constitués de lentilles et de miroirs, qui sont adaptés aux longueurs d'onde et aux fortes énergies utilisées.

La focalisation est, par exemple, indispensable pour les opérations industrielles de perçage, soudage et découpage. Elle est aussi utile pour les lasers de puissance utilisés par les chercheurs pour étudier l'interaction lumière-matière.

LA COHÉRENCE D'UN LASER

La cohérence du laser regroupe les propriétés d'uni-directionnalité et de monophasage. C'est elle qui permet à la lumière laser de pouvoir être fortement concentrée, dans le temps et dans l'espace ; elle est souvent à la base des applications des lasers.

Cette propriété va permettre le transfert et le transport d'informations comme pour la lecture des disques optiques ou les liaisons internet, par faisceaux laser dans des fibres optiques. Les ondes lumineuses qui composent la lumière laser se propagent toutes dans la même direction, de manière parfaitement rectiligne.



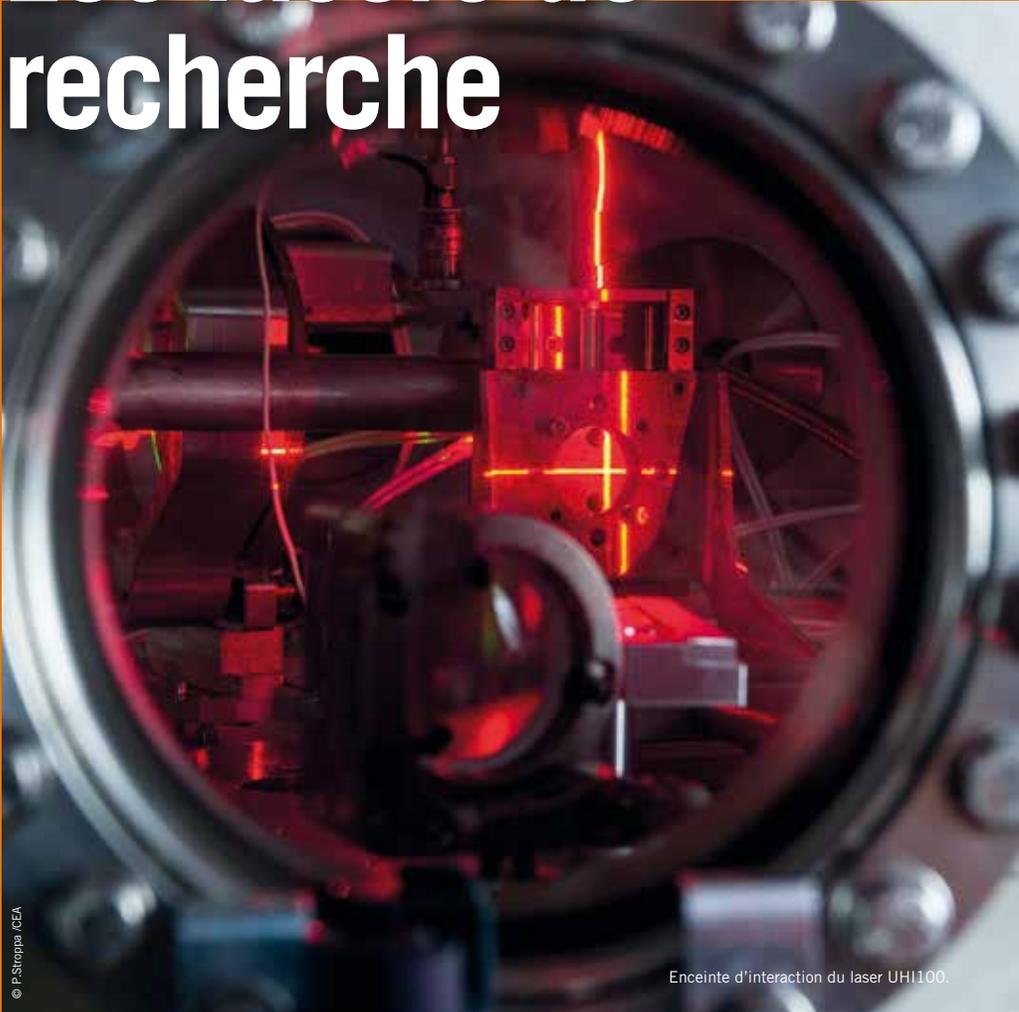
Inspection d'un miroir en verre servant au transport des faisceaux lasers du «laser Mégajoule (LMJ), et analyse des impacts ou défauts constatés.

Un faisceau laser est très peu divergent, ce qui le rend visible sur de grandes distances. Cette propriété est utilisée pour l'alignement des tracés de routes et de tunnels comme, par exemple, lors de la construction du tunnel sous la Manche ou de la tour Montparnasse. Les lasers servent aussi dans la télémétrie, c'est-à-dire la mesure de distances. Le faisceau laser atteint une cible, qui en renvoie une partie en sens inverse. La vitesse de la lumière étant connue, il est possible, en mesurant le temps mis par le faisceau laser pour faire l'aller-retour, de connaître la distance séparant la source laser d'un obstacle. Cette méthode a permis le calcul précis de la distance Terre-Lune.

La diffusion par les poussières et les aérosols de l'atmosphère rend visible ce rayon lumineux jusque loin dans l'espace et en fait l'outil des spectacles laser.

ULTRAPUISSANTS ET ULTRARAPIDES :
DES PERFORMANCES AU SERVICE DES SCIENTIFIQUES.

Les lasers de recherche



© P. Stroppa / CEA

Enceinte d'interaction du laser UHI100.

Grâce à ses propriétés uniques, le laser peut concentrer des énergies (relativement) importantes à la fois dans l'espace (focalisation) et dans le temps (impulsions brèves) pour atteindre des intensités gigantesques, capables de changer l'état de la matière, et en dévoiler les secrets. Afin d'utiliser des lasers spécifiques à leurs recherches, les chercheurs jouent sur ces deux critères principaux : la brièveté des impulsions laser, jusqu'à la femtoseconde (10^{-15} s), pour étudier les phénomènes de physique à très haute intensité, et l'énergie des faisceaux pour la physique à très haute densité d'énergie (plasmas, fusion nucléaire...).

DES LASERS POUR LA FUSION

Pionnier dans ce domaine, le CEA a conçu et assemblé, sur le centre du Cesta à proximité de Bordeaux, le laser Mégajoule (LMJ) précédé par la Ligne d'intégration laser (LIL), pour étudier la fusion par confinement inertiel.

La Ligne d'intégration laser, un prototype

La Ligne d'intégration laser avait une longueur de 150 m, une largeur de 70 m et une hauteur de 23 m.

Prototype de quatre faisceaux laser du laser Mégajoule, la LIL a été développée et mise au point pour en valider les choix technologiques et physiques (optiques). Depuis sa mise en fonctionnement en 2002 et jusqu'à son arrêt en 2014, la LIL a permis d'optimiser l'ensemble de la chaîne laser en vue de son utilisation au sein du LMJ. La méthode d'alignement, le lissage des faisceaux de lumière ou encore la fiabilité des composants ont été évalués et améliorés en vue d'une utilisation, à

Vue extérieure du bâtiment du laser Mégajoule (LMJ).



coût minimal, dans la future installation. Les premiers diagnostics pour le contrôle des futurs faisceaux et ceux du dispositif de mesures pour les expériences de physique y ont été mis au point. Au départ prototype, la LIL est devenue, de par ses caractéristiques, un grand instrument de physique pour la recherche ; elle a été utilisée pour mener des expériences préfigurant celles qui seront réalisées avec le LMJ.



La chambre d'expériences du LMJ en cours d'installation, fin 2010.

Le laser Mégajoule

Le laser Mégajoule (LMJ) est une installation majeure du programme Simulation de la Direction des applications militaires du CEA. Cette installation exceptionnelle, dimensionnée pour accueillir jusqu'à 240 faisceaux, sert à étudier, à toute petite échelle, les conditions extrêmes atteintes par les matériaux lors du fonctionnement des armes nucléaires.

Son utilisation doit permettre en particulier :

- de valider les modèles fondamentaux (équations de physique) décrivant la physique du fonctionnement des armes nucléaires, et de vérifier que la modélisation prend en compte tous les phénomènes ;
- de réaliser des expériences mettant en jeu l'enchaînement et l'imbrication de ces modèles. Ces expériences sont essentielles pour démontrer la maîtrise des chaînes de logiciels reproduisant par le calcul le fonctionnement des armes. La validation de la simulation repose sur de nombreuses catégories d'expériences ; les plus complexes conduisent à la combustion d'une micro-cible contenant un mélange deutérium-tritium porté à 70 millions de degrés (l'ignition).

Caractéristiques LIL

Mode de fonctionnement : impulsionnel

Durée de l'impulsion : 1 nanoseconde
(10^{-9} seconde)

Énergie laser de sortie : 30 000 joules

Puissance : 15-60 térawatts (TW)

Milieux laser : verre dopé au néodyme

Longueur d'onde fondamentale : infrarouge

Longueur d'onde de sortie : ultraviolet

Caractéristiques LMJ

Mode de fonctionnement : impulsionnel

Durée de l'impulsion : quelques nanosecondes
(10^{-9} seconde)

Énergie laser de sortie : 1,8 million de joules

Puissance : 500 térawatts (TW)

Milieux laser : verre dopé au néodyme

Longueur d'onde fondamentale : infrarouge

Longueur d'onde de sortie : ultraviolet

Le laser Mégajoule délivrera une énergie lumineuse pouvant atteindre 1,8 million de joules. Pour amener l'énergie jusqu'à la cible, une impulsion laser de très faible énergie est amplifiée progressivement, sur une très grande distance (450 m). La chaîne laser se déploiera sur 300 m de longueur, 160 m de largeur, dans quatre halls de 128 m de longueur et 14 m de hauteur.

LE LASER PETAL

Dans la dynamique d'ouverture et de partage de l'utilisation du laser Mégajoule, le laser petawatt Petal sera implanté auprès du LMJ pour constituer un outil expérimental exceptionnel ouvert à la communauté scientifique civile. L'Institut laser et plasma est le point d'entrée ; il recueille et évalue les propositions d'expériences.

Le laser Petal est un laser de haute énergie et de haute puissance générant des impulsions à 3,5 kilojoules durant 0,5 à 10 picosecondes. Son éclairement peut atteindre 10^{20} W/cm², soit la concentration sur un centimètre carré de la lumière émise par 1 000 millions de milliards d'ampoules de 100 W. Avec cet outil de recherche extrêmement puissant, le champ des études de la fusion contrôlée pourrait être étendu à la physique du noyau atomique et même à des applications médicales. Il permettra de reproduire à une échelle réduite les conditions physiques qui n'apparaissent par exemple qu'au cœur des étoiles, comme notre Soleil, où les mécanismes de fusion sont à l'origine d'un formidable dégagement d'énergie.

“Le laser Mégajoule délivrera une énergie lumineuse pouvant atteindre 1,8 million de joules.”

DES LASERS POUR LA RECHERCHE FONDAMENTALE

Les lasers ultra-brefs permettent d'étudier toute une série de phénomènes extrêmement rapides, aussi bien physiques que chimiques. Les études portent sur les systèmes atomiques et moléculaires simples, dans lesquels on observe en particulier la dynamique électronique (ce que deviennent les électrons après ou pendant la réception de l'impulsion lumineuse) à l'échelle de temps attoseconde (10^{-18} s), aux systèmes biomoléculaires complexes (l'ADN par exemple) étudiés à des échelles de temps allant de la femtoseconde à la milliseconde, jusqu'à l'optique relativiste dans les plasmas.



Zones de préparation du faisceau (lumière verte), notamment l'amplificateur du laser PLFA.

A l'échelle de la femtoseconde

Les lasers à impulsions femtosecondes (10^{-15} s) permettent ainsi d'étudier les phénomènes extrêmement fugitifs lors d'expériences de

femtochimie, comme des appareils photo

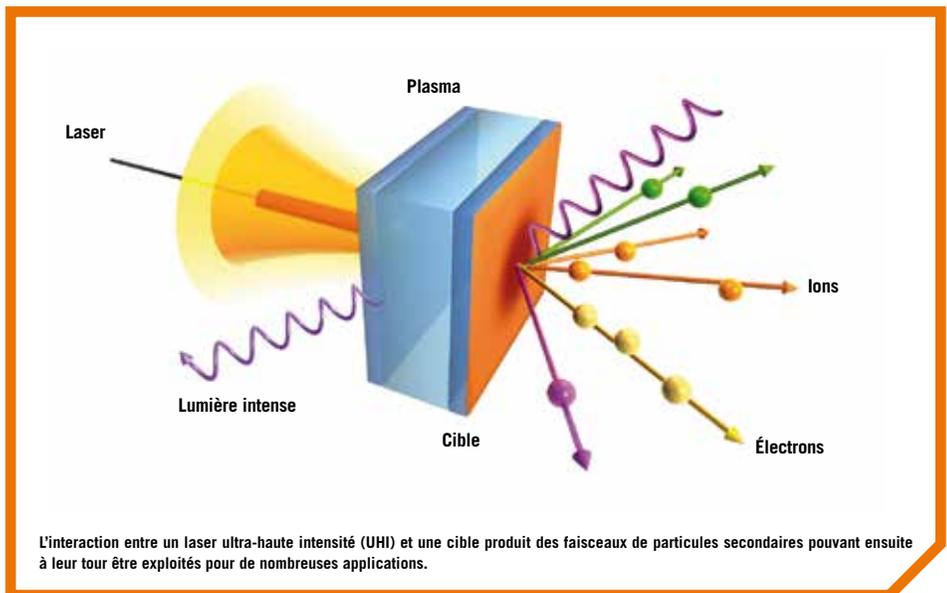
Grâce à ces lasers, les réactions chimiques peuvent être suivies en temps réel.

dont le temps de pause est suffisamment

court pour suivre le mouvement des atomes. En faisant varier le retard entre une première impulsion laser qui déclenche la réaction chimique et une seconde qui en teste l'état d'avancement, le « film » de cette réaction, dont la durée totale est typiquement de l'ordre d'un millionième de seconde, est reconstitué.

Les lasers ultra-brefs permettent également de développer des sources secondaires, c'est-à-dire issues elles-mêmes de l'interaction du laser avec la matière, ultra-brèves comme des faisceaux d'électrons ou de protons, ou de rayonnement cohérent de courte longueur d'onde.

D'une certaine manière, l'énergie véhiculée par la lumière est transférée, par interaction avec la matière, vers des particules massives ultra-rapides ! Ces particules et ce rayonnement sont utilisés à leur tour pour des études de dynamique électronique dans des gaz et dans des biosystèmes, des solides et des matériaux, ainsi que dans le cadre de recherches médicales (perspectives de traitement de tumeurs cancéreuses par exemple).



Dans un horizon plus lointain, ces mécanismes très efficaces d'accélération remplaceront peut-être les accélérateurs de particules, par exemple au CERN, l'organisation européenne pour la recherche nucléaire dédiée à la physique fondamentale. Les accélérateurs y portent des faisceaux de particules à des énergies élevées puis les font entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes, afin de découvrir les constituants de l'Univers et les lois de la Nature.

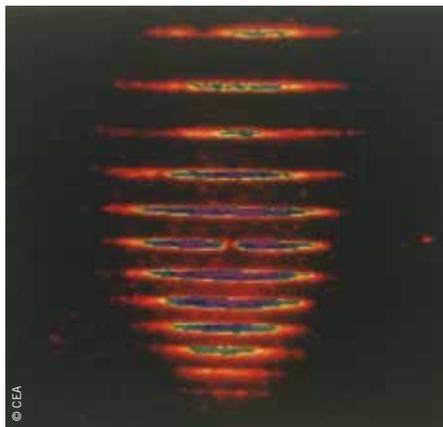
Le principe de la haute-intensité

En concentrant l'énergie de l'impulsion laser sur des temps très courts, les puissances très élevées atteintes permettent d'étudier le comportement de la matière soumise à très forte intensité. Les électrons deviennent relativistes ; autrement dit, leur vitesse devient dans le champ du laser très proche de la vitesse de la lumière dans le vide (environ 300 000 000 mètres/seconde, soit 7,5 fois le tour de la Terre par seconde). Cela a déjà révélé des phénomènes spectaculaires comme l'accélération des particules ou la génération d'harmoniques d'ordres élevés. Ceux-ci sont des rayonnements de lumière cohérents produits par interaction d'un laser intense avec un gaz ou un plasma, et dont la longueur d'onde est un sous-multiple de la longueur d'onde du laser intense. Des rayonnements de courte longueur d'onde (de 2 à 100 nm) peuvent ainsi être obtenus à partir d'un laser émettant dans le proche infrarouge.

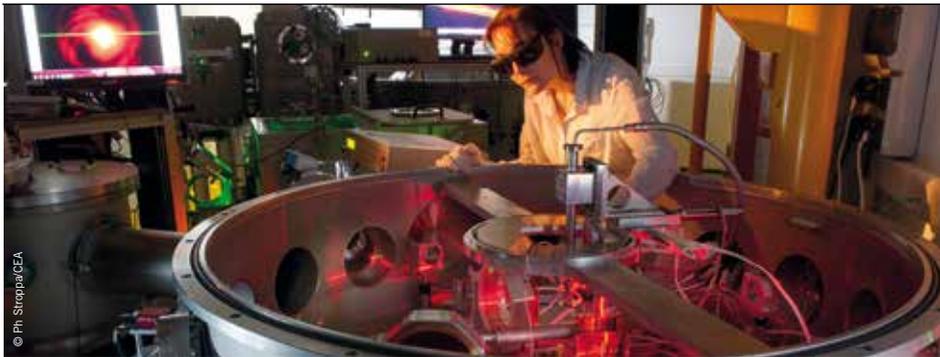
Le centre CEA de Saclay va accueillir en 2015 le laser APOLLON, qui sera alors le laser le plus puissant du monde puisqu'il atteindra une puissance de 10 PW par impulsion !

Ceci correspond à la puissance fournie par 10 millions de tranches de centrales nucléaires actuelles, délivrée pendant un temps correspondant à un milliardième de milliardième de clin d'œil !

Les scientifiques espèrent observer une nouvelle classe de phénomènes fondamentaux, comme la création lumineuse de paires électrons-positrons (phénomène aussi appelé « claquage du vide ») ou la génération de faisceaux de particules poussées par la lumière elle-même (pression de radiation) !



Harmoniques générés par l'interaction d'un laser intense dans un jet de néon.



Expérience utilisant le laser 100 TW de Saclay.

Les lasers térawatts

Pour réaliser leurs études, les chercheurs du centre CEA de Saclay exploitent et développent des lasers capables de produire des impulsions lumineuses à la fois très brèves (quelques dizaines de femtosecondes) et très puissantes (jusqu'à 100 TW). La brièveté des impulsions laser permet non seulement d'atteindre ces puissances gigantesques pour un faible investissement énergétique, mais autorise également la mise au point d'expériences à grande résolution temporelle.

Le parc laser actuel permet de couvrir un vaste champ disciplinaire, de la femtobiologie à l'optique relativiste. La dynamique de la matière (gaz, solides, plasmas) excitée par la lumière laser y est étudiée jusqu'aux échelles de temps les plus courtes (attoseconde-femtoseconde).

Un pas supplémentaire dans cette direction sera franchi avec le développement d'une nouvelle facilité laser Attolab dès 2015 sur le site de l'Orme des merisiers.

Caractéristiques

Mode de fonctionnement : impulsionnel

Durée de l'impulsion : 25 femtosecondes

Énergie laser par impulsion : 2,5 Joules

Puissance moyenne : 50 watts

Puissance crête maximale : 100 térawatts (TW)

Taux de répétition : 10 Hertz

Les lasers à électrons libres

A la différence des autres lasers, les lasers à électrons libres n'exploitent pas les électrons liés au sein des atomes d'un milieu amplificateur, mais des électrons libres issus d'un accélérateur de particules qui sont dirigés vers une structure magnétique périodique. Ils peuvent émettre du rayonnement cohérent depuis le domaine micro-onde jusqu'aux rayons X.

Les lasers ELI, européens

ELI (pour *Extreme light infrastructure*) est une infrastructure de recherche associant 40 organismes de recherche européens, dont le CEA. Elle hébergera quatre lasers les plus puissants du monde, atteignant une puissance de lumière jamais obtenue sur Terre : 10^{18} W en 10^{-18} s. Trois sont en cours de construction, en Hongrie, République tchèque et Roumanie. Ils seront dédiés à la recherche fondamentale, la physique des particules, la physique nucléaire, l'astrophysique et la cosmologie.

SIMPLES, FIABLES, ROBUSTES ET PEU COÛTEUX,
CE SONT DES TRAVAILLEURS DE PRÉCISION.

Les lasers industriels



© S.Le Coustier/CEA

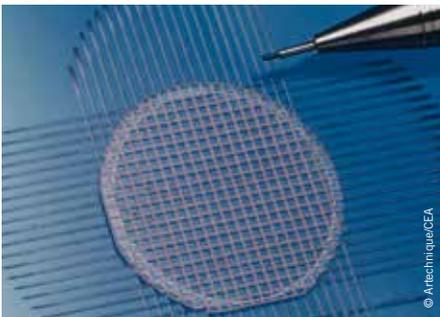
Bras esclave de découpe laser de la plate-forme Hera.

DES MICROLASERS

Lasers « puce », les micros

Les lasers « puces » (traduction du terme anglais « *microchip laser* ») sont des microlasers solides les plus simples et les plus compacts possible, avec une dimension typique de $0,5 \text{ mm}^3$. Ils sont fabriqués en utilisant des procédés collectifs permettant de réaliser simultanément et sans aucun réglage plusieurs milliers de pièces. Ainsi, leur coût de fabrication peut être très faible. De plus, ils sont extrêmement fiables, robustes et simples à utiliser, sans aucune nécessité de réglage ou de maintenance. Le laser « puce » est pompé par une simple diode laser et se comporte comme un transformateur de lumière laser. Il permet d'obtenir un faisceau laser naturellement circulaire et peu divergent, monofréquence et de forte puissance de crête impulsionnelle, le rendant très utile pour de nombreuses applications comme :

- la télémétrie laser (mesure de distance et de vitesse sans contact) ;
- le micromarquage et la microdécoupe sur tous types de matériaux ;
- les oscillateurs avant les amplificateurs des lasers de très forte puissance ;
- la fabrication de lasers visibles (verts) compacts ;
- la détection de gaz polluants.



Plaque de lasers puces.

DES LASERS POUR LE SOUDAGE ET LA DÉCOUPE

Ces lasers de forte puissance moyenne ont de multiples applications pour le travail des matériaux : trempe, soudure, perçage, ponçage, découpe, etc.

Le principe de soudage laser repose sur la fusion d'un point du matériau sur lequel le faisceau va se concentrer grâce au système optique. Après focalisation, son éclairement peut atteindre plus de 1 MW/cm^2 . Les densités d'énergie étant très importantes, il suffit de quelques microsecondes pour obtenir la fusion et la vaporisation du matériau à souder.

Les lasers permettent la découpe de plaques d'acier inox jusqu'à 20 cm d'épaisseur.

Lasers CO_2

Pour les lasers CO_2 , l'excitation moléculaire doit se faire avec de forts courants. L'émission résultante est très puissante. Cependant, ils nécessitent l'utilisation de sous-ensembles actifs volumineux (tubes à gaz, excitateurs...) et donc lourds. Cela est d'autant plus vrai que la puissance de sortie demandée est élevée (pour une application telle que l'usinage). Outre les travaux de soudage, ils sont utilisés pour décaper et découper des objets dans des environnements difficiles d'accès, sur des chantiers de démantèlement par exemple.

Caractéristiques

Mode de fonctionnement : continu

Puissance maximale en continu : de 500 W à 6 kW selon machine et énergie

Amplificateur laser : mélange de gaz carbonique, d'azote et d'hélium

Faisceau infrarouge $10,6 \mu\text{m}$

Poids d'un laser CO_2 de forte puissance : plusieurs tonnes

Transport du faisceau par miroirs

Lasers YAG dopés au néodyme

Le faisceau d'un laser **YAG** peut être transporté par fibre optique (fibre de silice d'1 mm de diamètre ou moins) sur des longueurs de plusieurs mètres, ou dizaines de mètres, et pour des puissances moyennes allant jusqu'à 2 kW. Il peut aussi être transporté grâce à des miroirs ou des lentilles.

Grenat d'aluminium et d'yttrium.

Caractéristiques

Mode de fonctionnement : continu ou impulsionnel

Durée de l'impulsion : 1 à 20 millisecondes

Fréquence de répétition : 1 à 1 000 Hz, selon la machine et l'énergie

Énergie maximale par impulsion : 150 joules

Puissance moyenne maximale : 70 watts à 1,5 kilowatt selon machine

Puissance de crête maximale : 30 kilowatts

Amplificateur laser : grenat d'aluminium et d'yttrium dopé au néodyme

Faisceau infrarouge 10,6 µm

Poids d'un laser de puissance : plusieurs centaines de kilos

Lasers à fibre

Apparus plus tardivement et actuellement en très forte croissance, les lasers à fibre apportent de nouveaux avantages en termes de fiabilité, compacité, facilité d'utilisation et consommation électrique. Ils offrent un rendement énergétique 10 fois supérieur aux lasers classiques, CO₂ ou YAG, et la puissance qu'ils délivrent, leurs qualités spectrales et spatiales en font d'excellents candidats pour les applications dans les secteurs industriels, médicaux, des communications et scientifiques.

Caractéristiques

Mode de fonctionnement : continu (ou impulsionnel)

Puissance moyenne maximale : 10 kW

Amplificateur laser : fibre optique dopée

Faisceau infrarouge 1,07 mm

Poids d'un laser à fibre de puissance : plusieurs centaines de kilos

Salle de commande du robot de découpe laser de la plate-forme Héra.





Système de décapage des surfaces par laser, utile dans les domaines nucléaire et hors-nucléaire : micro-marquage, micro-usinage, décapage...

DES LASERS POUR LE TRAITEMENT DE SURFACE

Les lasers industriels impulsionnels peuvent aussi être utilisés pour modifier les propriétés de surface d'un matériau, par exemple pour en améliorer la résistance à la corrosion ou au frottement, sans pour autant en altérer les propriétés mécaniques massives. Ils se rencontrent en particulier dans l'industrie automobile, et leur domaine d'utilisation tend à s'étendre.

Ces lasers, grâce à leur durée d'impulsion comprise entre 10 et 200 nanosecondes, ont l'avantage de réaliser du micro-usinage de très grande précision pour une large gamme de matériaux, avec peu d'échauffement. Comparé à des méthodes classiques telles que la photolithographie, ils permettent de réduire le nombre d'étapes de fabrication, et leur facilité à modifier la géométrie des dispositifs à graver en font des atouts incontournables pour les laboratoires de microélectronique. Une autre application consiste à réaliser le décapage de surfaces par balayage d'un faisceau laser intense qui conduit à une ablation superficielle.

Ce procédé peut être utilisé pour le nettoyage de monuments, ou à plus petite échelle pour le décapage de pièces mécaniques de précision. Un dispositif original, nommé Aspilaser, est utilisé pour décaper automatiquement des murs, sans émettre ni poussière, ni odeur. Les surfaces sont abrasées sur une épaisseur de 0,1 mm seulement, limitant ainsi le volume des déchets. Jusqu'à présent considéré comme le domaine de prédilection des lasers Nd-YAG en impulsions, le marché du micro-usinage de précision s'ouvre dorénavant aux lasers à fibres impulsionnels.

Caractéristiques

Mode de fonctionnement : impulsionnel

Durée de l'impulsion : quelques dizaines de nanosecondes

Fréquence de répétition : 100 000 hertz (impulsions par seconde)

Énergie laser par impulsion : 1 mJ

Puissance moyenne : 50 W

Puissance de crête : 10 kilowatts

Amplificateur laser : fibre optique dopée

PRINCIPALES UTILISATIONS DES LASERS EN FONCTION DE LEUR

Type de laser	Milieu laser	Particules excitables	Couleur	Utilisation	Puissance
Diodes laser	semi-conducteur	électrons-trous	rouge (780 nm)	lecture DVD et codes-barres	quelques mW
			infrarouge (IR) (1,3 μm , 1,55 μm)	télécommunications	quelques dizaines de mW
			rouge - IR	source d'énergie pour les lasers à solide	dizaines de W
Hélium - néon	gaz hélium - néon	atomes de néon	rouge - 633 nm	alignement travaux publics - guidage d'engins - carrossiers	10 mW
				discothèques - spectacles laser	qqs W
Argon	gaz d'argon	ions argon	bleu - vert - ultraviolet (UV)	discothèques - spectacles laser	quelques W
Krypton	gaz de krypton	ions krypton	rouge	microlithographie	
A excimères	mélange de gaz rares et halogènes (xénon-chlore ou krypton-fluor)	groupement de 2 atomes	UV	nettoyage, décapage et préparation de surface	10^7 à 10^8 W en crête
CO ₂	mélange gazeux azote-hélium-dioxyde de carbone	molécules de CO ₂	IR - 10,6 μm	chirurgie interne et externe	
				soudage des métaux	quelques dizaines à 50 kW
				découpage de matériaux	1 à 3 kW
Nd - YAG	grenat d'aluminium et yttrium (YAG) dopé au néodyme (Nd)	ions Nd	IR - 1,06 μm	chirurgie interne et externe	
				soudage des métaux	quelques dizaines à 50 kW
				découpage de matériaux	1 à 3 kW
				nettoyage, décapage et préparation de surface	10^7 à 10^8 W en crête
A fibre	fibre optique dopée avec des ions de terres rare	ions dopants	IR - 1,03 μm	marquage	
OPO	cristal non linéaire	ions	accordable		

PUISSANCE

Mode de fonctionnement	Remarques
continu ou impulsif	
continu ou impulsif	via fibres optiques
continu ou impulsif	
continu	
continu	
continu	
continu	
impulsif (quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes)	
continu ou impulsif	puissance en fonction des applications
continu ou impulsif	puissance en fonction de l'épaisseur
continu ou impulsif	
continu ou impulsif	puissance en fonction des applications
continu ou impulsif	puissance en fonction de l'épaisseur
continu ou impulsif	
impulsif (quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes)	
continu ou impulsif	tend à remplacer les lasers Nd - YAG
impulsif	tend à remplacer les lasers à colorants

DES APPLICATIONS INNOVANTES

L'analyse LIBS

Laser induced breakdown spectroscopy

Cette analyse spectroscopique sur plasma induit par un laser permet de caractériser la composition chimique de la surface des matériaux (solides, liquides, gaz ou aérosols). Cette technique consiste à envoyer un faisceau laser sur le matériau pour créer un plasma, analyser sa signature spectrale et déterminer en temps réel la nature et la concentration des éléments présents. Les sondes développées au CEA sont capables de réaliser une cartographie au micron près. Le champ d'applications est très large : du vieillissement des matériaux à l'exploration martienne. Le CEA a en effet adapté cette technologie pour la mission *Mars science laboratory* de la Nasa, en participant à la conception et au dimensionnement de l'instrument ChemCam, qui analyse depuis août 2012 le sol martien, dans un rayon de 7 mètres autour du robot Curiosity.

La technique Lidar

Light detection and ranging

Cette technique s'appuie sur le principe des radars (dont l'acronyme « *radio detection and ranging* » signifie détection et positionnement par ondes radio). Elle permet de contrôler à distance la pollution de l'atmosphère par des particules. L'émission d'un faisceau laser vers la zone à étudier, puis l'analyse de sa rétro-diffusion déterminent la densité, la localisation, la nature et la géométrie des particules. La longueur d'onde utilisée (355 nm) est adaptée pour repérer les particules inférieures au micromètre, qui composent 99 % des aérosols de pollution. Cette technique a servi à l'étude de l'impact de la circulation automobile et à la surveillance de l'atmosphère dans des endroits confinés comme des gares ou le métro.

Impulsions femtosecondes pour la détection

Détecter à distance des explosifs ou autres produits dangereux, analyser rapidement des substances illicites ; c'est chose possible grâce aux lasers femtosecondes. Tout matériau, tout être humain, possède une signature térahertz qui lui est propre. D'où l'idée d'utiliser cette gamme pour identifier des substances explosives, ou distinguer de la cocaïne d'autres poudres... Pour générer de telles sources, dont la fréquence est comprise entre 1 et 100 THz, il faut combiner deux impulsions lasers de fréquences différentes. Pour l'instant étudiées en laboratoire, ces sources laser devront devenir plus compactes et plus intenses pour une utilisation grand-public. Une seconde technique s'apparente à la Libs (présentée page précédente). Grâce à des impulsions de moins de 100 femtosecondes et d'une puissance supérieure au térawatt, les mesures sont possibles à des distances de plusieurs centaines de mètres.

Guidage avec une fibre laser sur un fantôme en silicone et modélisation 3D de prostate, dans le cadre de recherches sur le diagnostic et traitement de cancer par laser.

Des lasers pour la santé

En chirurgie, les lasers utilisés sont assez puissants. Ils peuvent brûler une partie endommagée à l'intérieur du corps de façon non-traumatique, être utilisés comme un bistouri, soigner des caries dentaires et des décollements de rétine. Les caractéristiques exceptionnelles d'ablation du laser UV émettant à 193 nm sont utilisées en chirurgie de la cornée, afin de traiter les myopies : par exemple, pour corriger d'une **dioptrie**, 1 μm (10^{-6} m) de la surface de la cornée est retirée. En médecine, les lasers sont utilisés en imagerie, radiothérapie et protonthérapie.

La dioptrie, de symbole δ , est l'unité de mesure de la vergence (1/focale).

Une lentille d'une vergence de 20 δ aura une distance focale image de 5 centimètres (un vingtième de mètre).

La protonthérapie consiste à détruire une tumeur cancéreuse avec un faisceau de protons, de façon précise ; seule une zone très localisée est traitée, sans endommager les tissus alentour. Le projet Saphir, auquel participe le CEA, étudie la possibilité de générer par accélération laser des faisceaux de protons d'énergie suffisante pour le traitement de certaines pathologies.



© P. Latron/Inserm-U703

INDISPENSABLES, MAIS ATTENTION !



Les rayonnements laser présentent des risques plus ou moins importants pour l'œil et la peau en fonction de leur puissance (dès 1 mW), du temps d'exposition, de la dimension du faisceau et de la longueur d'onde (ultraviolet, infrarouge, voire visible). En fonction de ces paramètres, les effets biologiques ne sont pas les mêmes.

Les mécanismes d'interaction sur les tissus peuvent être thermiques, photochimiques, électromécaniques ou photo-ablatifs. Pour éviter cela, les laseristes isolent le plus possible les faisceaux laser (on parle de capotage de faisceau) et portent des lunettes spéciales.

→ Le domaine ultraviolet (100-400 nanomètres)

Les effets photochimiques néfastes des rayonnements ultraviolets naturels (UV) sont bien connus. Ainsi, sur la peau, les lasers UV peuvent engendrer des brûlures photochimiques, un vieillissement prématuré voire des cancers. Certains lasers sont susceptibles de provoquer des coupures (ablations) dans le tissu cutané.

Pour ce qui concerne les yeux, et notamment la conjonctive et la cornée, des surexpositions au faisceau laser peuvent entraîner des brûlures. Grâce à des expérimentations cellulaires, les chercheurs ont montré que l'irradiation laser (193 nm) était considérée comme un stress par les cellules et que ce rayonnement pouvait déclencher un mécanisme de mort programmée (apoptose) dans des cellules de cornée en culture. L'activation d'une protéine régulatrice du devenir des cellules (la p53, « gardienne du génome ») a été également démontrée. Dans les cellules survivantes, l'induction d'un processus de photo-vieillessement est suggérée par les résultats obtenus.

→ Le domaine visible et proche infrarouge (400-1 400 nm)

Ce domaine de rayonnement laser peut être extrêmement dangereux en raison de sa pénétration à travers les milieux oculaires. Les rayons sont focalisés par la cornée et le cristallin sur la rétine, entraînant des diminutions de l'acuité visuelle, voire des risques de cécité. Les lésions peuvent être révélées lors d'examen angiographiques. Sur la peau, une surexposition aux rayonnements occasionnera des brûlures.

→ Le domaine infrarouge (1 400 nm-1 mm)

Ces rayons n'atteignent pas la rétine, mais entraînent des lésions thermiques de la cornée, ainsi que des pertes de transparence du cristallin. Des brûlures cutanées ont également été observées.

Les recherches réalisées au CEA permettent de mieux connaître les effets des rayonnements laser sur l'organisme, d'en apprécier les mécanismes moléculaires et de trouver des marqueurs biologiques des lésions de la cornée. Ces travaux sont nécessaires pour définir ou améliorer les limites d'exposition du fait de l'évolution technologique des lasers. Ils contribuent également à une meilleure utilisation du rayonnement laser dans le génie biomédical.

LA COLLECTION

- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène
- 13 → Le soleil
- 14 → Les déchets radioactifs
- 15 → Le climat
- 16 → La simulation numérique
- 17 → Les séismes
- 18 → Le nanomonde
- 19 → Energies du XXI^e siècle
- 20 → La chimie pour l'énergie

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2014
Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif sur Yvette cedex - www.cea.fr

ISSN 1637-5408.

