

4.6 - APPLICATIONS DIVERSES des LASERS.

4.6.1 - INTRODUCTION.

Les lasers ont trouvé un grand nombre d'applications dans les domaines les plus divers. Il n'est pas possible, même brièvement, de passer en revue toutes les applications existantes, d'autant plus que leur nombre ne cesse d'augmenter. Les études faites sur l'utilisation des lasers dans l'industrie montre la répartition par ordre d'importance en 2006 [*Laser Focus, janvier 2006*] : le traitement et l'usinage des matériaux, les applications médicales, l'instrumentation et la mesure ; les autres applications citées sont l'inspection et le contrôle, les loisirs et spectacles, le stockage d'informations, la lecture de codes barres.

Parmi les applications qui n'ont pas été décrites dans les chapitres précédents et qui ont pris une importance considérable, on peut citer l'utilisation des lasers :

- dans les études atmosphériques,
- en photochimie,
- dans le domaine biomédical.

On peut peut-être ajouter que les lasers ont trouvé également des applications dans le domaine militaire.

Parmi les applications pouvant toucher (très) directement chacun d'entre nous on peut citer :

- le médical, parce que les soins dentaires, la correction de la vue ou la chirurgie sont autant d'opérations aujourd'hui possibles par laser,
- le nucléaire : un prototype de 'laser Mégajoule' est en préparation pour étudier les phénomènes liés à la fusion nucléaire, source peut-être d'une énergie sans limite pour le futur

Pour plus de détails, lire par exemple [*"Applications des lasers". R. FARCY - Masson. 1993*] ou [*"Le laser : 50 ans de découvertes", Fabien Bretenaker- EDP SCIENCES, ISBN : 978-2-7598-0517-4, Avril 2010*].

4.6.2 ÉTUDES ATMOSPHÉRIQUES

Le laser est un outil commode pour sonder à distance la composition des zones polluées de l'atmosphère. En effet on connaît l'action des molécules les plus fréquentes sur le rayonnement laser: diffusion, absorption. On réalise ainsi des LIDAR, analogue optique du radar, permettant de localiser des particules dans l'atmosphère et de déterminer leur concentration.

La reconnaissance des molécules est possible par l'effet Raman: changement de fréquence dans la lumière diffusée, caractéristique de la molécule rencontrée.

Enfin, quand une étude par transmission est possible, les mesures d'absorption fournissent des informations sur la nature des milieux traversés. On utilise alors l'ajustement de fréquence offert par les lasers à colorant.

4.6.3 PHOTOCHEMIE. CARACTÉRISATION DE MATÉRIAUX.

La lumière laser, contrairement à la lumière ordinaire, peut être décrite par des relations très simples. Nous avons vu en particulier que l'étendue transverse d'un faisceau laser dans le mode fondamental est décrite par une fonction exponentielle. D'autre part, la lumière laser est quasi-monochromatique. Dans l'interaction entre rayonnement laser et matière, un ou plusieurs paramètres du rayonnement est modifié. Dans certains cas le matériau est également modifié.

En étudiant les modifications apportées sur l'un des paramètres du rayonnement (intensité, fréquence, répartition spatiale) par le matériau on peut caractériser ce dernier. L'étude de la pollution

atmosphérique citée ci-dessus en est un exemple, mais le principe est couramment utilisé dans les laboratoires d'analyse. La spectroscopie laser a permis de faire de grands progrès dans la connaissance de la matière. La spectroscopie d'absorption en particulier est très simple à mettre en œuvre: le rayon laser traverse une faible épaisseur du matériau étudié, est partiellement absorbé puis détecté. On fait varier la fréquence du laser pour enregistrer le spectre de l'absorption. Les trous observés dans ce spectre permettent de caractériser le matériau.

D'autres techniques comme la spectroscopie Raman ou la spectroscopie d'absorption permettent des analyses très fines.

La chimie a également progressé grâce au laser. En effet, le rayonnement accordable des lasers à colorants permet de stimuler un état énergétique bien particulier d'une molécule sans affecter les autres états. Il devient ainsi possible de catalyser certaines réactions, de provoquer la rupture de certaines liaisons moléculaires, d'amorcer une polymérisation

L'application qui suscite le plus d'efforts depuis quelques années, c'est la séparation isotopique en vue de la production économique d'uranium enrichi.

4.6.4 APPLICATIONS BIOMÉDICALES DES LASERS

Le laser a trouvé dans le domaine biomédical de nombreuses applications. Parmi celles-ci on peut citer :

- les opérations chirurgicales en ophtalmologie. Le laser est utilisé pour le traitement du glaucome et de la cataracte (le décollement de rétine peut également être arrêté par soudage au faisceau laser), le remodelage de la cornée ;
- les opérations chirurgicales en neurologie, en oto-rhino-laryngologie et en gynécologie;
- l'endochirurgie ;
- le traitement de maladies de la peau ;
- l'acupuncture par faisceau de laser He-Ne ;
- le traitement de lésions hémorragiques par photocoagulation.

Les lasers sont aussi utilisés pour établir des diagnostics. C'est le cas avec les vélocimètres à effet Doppler pour mesurer la vitesse d'un flux sanguin. On trouve aussi des :

- des trieurs de cellules qui évaluent la taille de celles-ci par diffractométrie,
- des fluorimètres pour étudier le métabolisme par une mesure de fluorescence des tissus excités par rayonnement ultra-violet.

Différents **effets** sont observés lors de l'interaction rayonnement-tissus biologiques¹ : thermique, photochimique, électromécanique, photoablatif.

- Effets thermiques. L'absorption par les tissus du rayonnement focalisé entraîne un échauffement rapide puis une déshydratation, suivie par une vaporisation si l'intensité est suffisante. Les changements observés sont dus essentiellement à la conduction ; la convection qui s'accompagne d'un flux de matière est négligeable. L'effet thermique est utilisé en chirurgie pour le traitement de tumeurs bénignes (peau, larynx, estomac, angiomes, tatouages) ou dans certains cas, la destruction de cellules cancérogènes (au stade expérimental).

La photocoagulation par laser est due à un effet thermique ; on chauffe modérément les tissus afin que ceux-ci se contractent par déshydratation. Cet effet peut être obtenu par d'autres techniques, mais

¹ J.M. Brunelaud et B. Decomps. *Les lasers en médecine. Le Recherche Vol.13 n° 137, p.1122-1129*, (Oct. 1982)

le laser présente l'avantage d'une plus grande précision et surtout de l'absence d'un contact direct entre l'outil et la plaie.

Les lasers utilisés sont : le laser à CO₂, les lasers solides.

- Effets photochimiques. Une absorption sélective de rayonnement à une longueur d'onde donnée par un composant de la cellule peut mener à la destruction ou la transformation de celle-ci. Les effets photochimiques du rayonnement laser sont à la base d'applications biomédicales en cours d'étude. Certaines substances chimiques absorbées par l'organisme sont retenues de façon sélective par les tumeurs malignes, qui deviennent alors très sensibles aux rayonnements visibles². L'irradiation par un faisceau laser de faible intensité, entraîne alors une destruction des tumeurs, sans effets sur les tissus voisins.

- Effet photoablatif obtenus par

- la brièveté des impulsions ou

- par un rayonnement de courte longueur d'onde (ultra-violet).

Actions des impulsions laser de courte durée (nanoseconde à femtoseconde).

Un autre mode d'action du rayonnement sur les tissus est observé lorsque le faisceau laser se présente sous la forme d'impulsions brèves et intenses. La durée d'impulsions des lasers déclenchés est inférieure au temps de diffusion thermique dans les matériaux biologiques. Ces impulsions ne provoquent donc pas d'effet thermique mais créent une vaporisation instantanée suivie d'un plasma limité à la tache de focalisation: sous l'action du champ électrique élevé, le matériau "claque" comme un isolant soumis à une trop grande tension. Les lasers Nd:YAG sont utilisés en chirurgie de l'œil pour traiter des cataractes. Cette action est aussi recherchée pour les soins dentaires.

Les lasers à impulsions ultra-brèves (centaine de femtosecondes) ont trouvé un domaine d'application en chirurgie de l'œil : le faisceau laser est utilisé pour faire une découpe de quelques microns de la cornée avec l'opération de remodelage par un laser émettant dans l'ultra-violet.

Actions des rayonnements ultra-violets.

Le rayonnement UV provoque la dissociation des chaînes polymérisées organiques dont les fragments se dispersent ensuite. La précision d'ablation est meilleure que 1 μm. Les lasers utilisés sont des lasers à excimères. L'effet photoablatif est utilisé dans les applications suivantes :

- le remodelage de la cornée dans le cas de défauts importants,

- le désencombrement des artères.

L'effet photoablatif peut être utilisé également pour obtenir un effet de coupe sans coagulation des tissus.

- Effet électromécanique. Si l'amplitude du champ électrique de l'onde lumineuse incidente est voisine de celle du champ électrique à l'intérieur des molécules (10^7 à 10^{12} V/m), il se crée un phénomène d'**ionisation**, suivi d'une rupture des liaisons de la matière. Le **plasma** créé est en effet à l'origine d'une **onde de choc** dont les effets peuvent être destructeurs. L'effet électromécanique est utilisé pour la destruction de calculs rénaux et biliaires (lithotritie).

- Effet de biostimulation. On utilise des rayonnements de faible intensité (puissance de 100 mW et densité de puissance de 50 mW/cm²) pour provoquer ou accélérer la coagulation, obtenir un

² R.J. Lone and J.J. Wynne, *Medical applications of excimer lasers, Laser Appl.*, vol.3, n°11, p.59 (Nov. 1984)

soulagement de la douleur, activer le flux sanguin, stimuler les nerfs, remplacer les aiguilles de l'acupuncture. Dans toutes ces applications l'interaction du faisceau laser avec les tissus organiques est très difficile à modéliser ; tout au plus peut-on obtenir quelques ordres de grandeur utiles pour choisir un type de laser ou un niveau de puissance.

- Effet multiphotonique. Il s'agit de la transition entre deux états énergétique de l'atome ou molécule, obtenue par absorption simultanée de deux photons. L'effet multiphotonique joue un rôle secondaire dans de nombreux processus.

4.6.5 LE LASER ET L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'énergie produite par un laser est la forme d'énergie permettant une concentration spatiale théoriquement sans limite (contrairement à l'énergie portée par un flux d'électrons). Pour cette raison, des lasers fournissant des impulsions de grande énergie ont été développés ou sont en cours de développement, comme le laser MégaJoule à Bordeaux ou le *National Ignition Facility* à Livermore (États-Unis). Ces lasers servent à simuler les conditions qui apparaissent lors d'une explosion nucléaire et rechercher les conditions nécessaires à la production d'énergie par fission. Les astrophysiciens y trouvent également un intérêt car les densités d'énergie produites, sont comparables aux conditions qui règnent dans les étoiles.

La fusion nucléaire fait rêver l'humanité depuis qu'Einstein a établi l'équivalence entre matière et rayonnement qui s'exprime par la célèbre relation $E = m c^2$. Sachant que la masse d'un atome par nucléon est une fonction du nombre total de nucléons, et que le minimum s'observe pour un nombre atomique $A \approx 50$, la fusion d'éléments légers (isotopes H) ou la fission d'éléments lourds (isotopes de l'atome d'uranium), entraîne la production d'une quantité d'énergie $E = \Delta m c^2$.

Pour la fusion les réactifs les plus faciles à utiliser sont le Deutérium et le Tritium. La réaction est la suivante :

$D + T \rightarrow He^4 + n + 17,6 \text{ MeV}$. L'énergie produite apparait sous forme d'énergie cinétique des produits de fusion.

Les ordres de grandeur des énergies mises en jeu sont les suivants.

- Dans 1 litre d'eau on trouve quelques milligramme de Deutérium
 → Un processus de fusion de ces atomes fournirait l'énergie correspondant celle produite par la combustion de 300 litres d'essence.

Parmi les avantages du procédé de fusion atomique pour la production d'énergie, on peut citer :

- la grande facilité de séparation des isotopes, le rapport massique étant égal à 2 contrairement à l'Uranium pour lequel les masses sont voisines, rendant le processus de tri des isotopes utiles, très compliqué;
- les réserves naturelles sont importantes (sauf pour le Tritium qui peut être obtenu à partir du Lithium, 15 fois plus abondant que l'Uranium.
- la pollution est limitée (le Tritium radioactif a une durée de vie de 12 ans)

L'inconvénient à souligner est la pollution thermique (la centrale serait une machine thermique dont 60 % de l'énergie produite servirait à chauffer l'environnement de la centrale, comme dans le cas des centrales à fission actuelles.

Problème à résoudre : Il faut vaincre les forces électrostatiques pour amorcer les forces nucléaires qui réagissent à 10^{-14} m . Pour cela il faut une énergie cinétique obtenue par une température de plasma de 10^6 K et une haute densité pour rendre les chocs probables.

→ La condition doit être maintenue pendant plusieurs nanosecondes, ce qui est très difficile à obtenir de façon contrôlée.

Il existe un **critère** dit **de Lawson** qui doit être vérifié pour que la réaction démarre, qui stipule que

$$n T t_E > 10^{21} \text{ keV.m}^{-3}.\text{s} ,$$

avec n la densité du plasma, T la température du plasma (de l'ordre de 10 à 20 keV), t_E le temps de confinement de l'énergie [<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/fusion/physique/lawson2.htm>] . Cela signifie que le plasma produit doit suffisamment chaud et maintenu suffisamment longtemps, ce qui est technologiquement difficile. Aucune enceinte ne peut résister à de telles conditions. Deux solutions ont été envisagées et sont expérimentées :

- le confinement magnétique (tokamak),
- le confinement inertiel dans lequel on réalise une compression de 1000 fois la densité liquide pendant un temps inférieur à la durée de ré expansion ; par inertie, le confinement est conservé quelques nanosecondes.

Quelle source d'énergie utiliser pour l'amorçage ? faisceau d'électrons, d'ions lourds, des lasers ?

Des expériences sont en cours. Dans la solution 'laser' (projet MégaJoule en France et NIF aux USA), un grand nombre de faisceaux lasers sont amenés sur une cible constituée du mélange Deutérium-Tritium, enfermé dans une sphère de Si.

Le résultat prévisible l'interaction est le suivant :

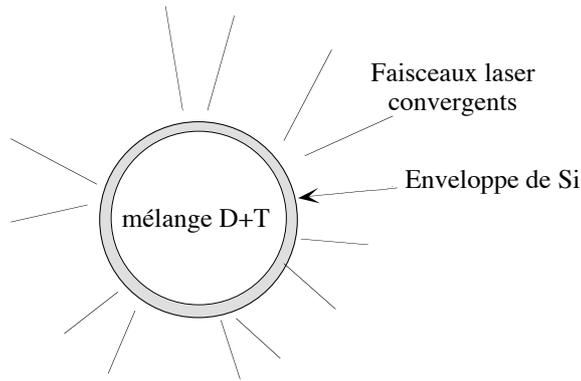
- Vaporisation de l'enveloppe,
- Création d'un plasma chaud absorbant suivi d'une compression du cœur de la cible
- Création au centre d'un point chaud (10^8 K)
- Explosion dans laquelle l'énergie cinétique des produits de réaction chauffe les parois du réacteur. La chaleur peut est convertie en énergie électrique.

L'énergie nécessaire au chauffage, pour 1 milligramme de mélange D-T devrait être

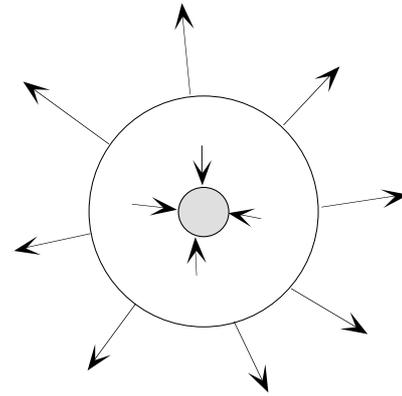
1 Mégajoule en 1 nanoseconde

ce qui, ramenée à une puissance moyenne continue, correspondrait à plusieurs fois la puissance électrique consommée dans le monde.

Pour obtenir la rentabilité, il faut récupérer 100 fois l'énergie injectée (pour compenser le faible rendement des lasers et des machines thermiques)



(1) : Focalisation de multiples faisceaux laser de façon homogène tout autour de la cible.



(2) : Compression du cœur de la cible par chauffage du plasma.

Quel laser utiliser ?

Les contraintes sont les suivantes :

- des impulsions de 0,1 à quelques MJ suivant la quantité de matière et l'efficacité
- un bon rendement pour le laser (>10%),
- une durée d'impulsion voisine de 1 ns,
- une longueur d'onde courte (pour assurer un bon transfert d'énergie au plasma,
- une bonne répartition spatiale,
- une fréquence de quelques tirs seconde.

Un tel laser est à encore à concevoir !!

- Le laser à CO₂ peut être écarté à cause de sa longueur d'onde trop grande.
- Le laser à Nd:verre à 1,06 μm , 0,53 et 0,35 μm donne satisfaction pour l'expérimentation mais ne conviendrait pas pour la réalisation d'une centrale, les problèmes thermiques dans le barreau étant trop gênants.
 - Un laser à iode à 1,3 μm pourrait être envisagé.
 - Les lasers à Excimère posent problème avec des impulsions trop longues (plus de 10 ns).
 - Pourquoi pas des lasers à semi-conducteur suivis de chaînes d'amplificateurs. C'est peut-être ce que le programme 'Mégajoule' du CEA vérifiera au cours des prochaines années. Ce laser, d'une dimension de 300 m de long sur 150 m de large, en construction près de Bordeaux est prévu pour fournir lorsqu'il sera terminé (entrée en service prévue en 2014), une énergie de 1,8 MJ à partir de 240 faisceaux concentrés sur une cible de 2 mm au centre d'une sphère d'expérience de 10 m de diamètre [<http://www-lmj.cea.fr/>].