

**LES**

**LASERS**

# LASERS SOLIDES

UNE source laser solide comprend un barreau cylindrique usiné dans une « matrice » neutre (du verre ou un cristal), supportant les ions actifs qui constituent le « dopant ». Ce sont ces ions qui présentent les transitions de fluorescence exploitées pour l'effet laser ; ils constituent par conséquent des centres actifs de l'effet laser.

Le barreau est soumis au rayonnement lumineux d'une lampe en régime d'arc, étroitement couplée optiquement avec le barreau.

Sous l'effet du rayonnement, les ions actifs du barreau emmagasinent de l'énergie en passant à un état excité ; c'est le « pompage optique du barreau ». La durée de vie de l'état excité doit être suffisamment grande pour permettre d'inverser la « population » du barreau, c'est-à-dire avoir plus d'ions excités que d'ions au repos : lorsqu'un ion revient spontanément à son état normal, il libère son énergie d'excitation en produisant un photon, dont l'énergie correspond parfaitement à l'énergie emmagasinée par cet ion.

## PHOTON SUR ION

Si le photon produit rencontre sur sa trajectoire un ion au repos, il sera absorbé donnant naissance à un ion excité.

Si le photon rencontre un ion excité, il provoque la désexcitation de ce dernier avec émission d'un nouveau photon ayant même énergie (donc même longueur d'onde), même direction et même phase que le photon générateur.

Lorsque l'inversion de population est réalisée, la probabilité de rencontre d'un photon et d'un ion excité est beaucoup plus forte que la probabilité d'absorption du photon par un ion au repos. On obtient alors un phénomène de réaction en chaîne, donc d'amplification, donnant naissance à des trains de photons de même direction, de même longueur d'onde et de même phase... donc à de la lumière cohérente.

La plupart des lasers à solides dopés se prêtent naturellement à un fonctionnement en impulsions. Cela tient essentiellement à ce que leurs rendements de pompage sont,

en général, très faibles, de l'ordre de quelques  $10^{-3}$ . L'importante fraction de la puissance de pompage qui n'est pas transformée en inversion de population se dissipe dans le matériau sous forme de chaleur : or l'élévation de température résultante tend à réduire l'inversion de population et, par là-même, à arrêter l'effet laser.

L'emploi des techniques de déclenchement permet d'obtenir des impulsions extrêmement brèves, de l'ordre de quelques nanosecondes ( $10^{-9}$  s). Des techniques de modulation de la surtension du résonateur interne au laser, plus sophistiquées, permettent de réduire considérablement la durée de l'impulsion jusqu'à quelques picosecondes et les puissances obtenues se chiffrent en gigawatts, voire en térawatts ( $10^{12}$  W).

## LES LASERS DE LA C.I.LAS

Le 1<sup>er</sup> février 1966, la Compagnie générale d'électricité créait, avec la Compagnie de Saint-

Gobain, la Compagnie industrielle des lasers (C.I.LAS), avec mission d'industrialiser et de commercialiser les matériels issus de nombreuses années d'études.

Trois types de sources sont actuellement industrialisés à la C.I.LAS. Ces sources utilisent respectivement comme matériau laser :

— Le rubis, cristal de corindon (équivalent, chimiquement, à l'aluminium) dopé avec des impuretés de chrome ;

— Le verre, dopé aux ions de « terre rare », particulièrement aux ions de néodyme trivalent ( $Nd^{+++}$ ) ;

— Le cristal de grenat d'yttrium et d'aluminium, dénommé YAG par les spécialistes (YAG : Yttrium Aluminium Garnet), dopé, lui aussi au néodyme.

C'est en particulier l'association d'un oscillateur et d'une cascade d'amplificateurs à verre dopé qui a permis d'atteindre les records de puissance en crête d'impulsion, qui se chiffrent en térawatts, et les records d'énergie par impulsion, qui sont de l'ordre du kilojoule.

Le laser YAG est remarquable, quant à lui, car il permet le fonctionnement en continu ou en régime d'impulsions à haute cadence.

## CRISTAUX POUR LASERS

Les cristaux utilisables dans les lasers doivent être constitués d'espèces chimiques remplissant plusieurs conditions : être transparentes aux radiations de pompage et d'émission laser ; pouvoir être préparées de façon homogène ; rester insensibles, dans toute la mesure du possible, aux agents atmosphériques (oxygène, gaz carbonique, vapeur d'eau) ; résister aux chocs thermiques créés lors des échanges ou des transformations énergétiques. Ces substances doivent aussi accepter dans leur réseau microscopique, sans séparation de phase, les substances fluorescentes responsables de l'effet laser lui-même.

Au cours des diverses recherches, on a sélectionné un certain nombre de matériaux, qu'on peut classer en trois groupes principaux :

- Les oxydes ;
- Les fluorures ;
- Les tungstates et molybdates.

Les substances fluorescentes, utilisées comme dopants, sont des dérivés des « métaux de transition », principalement de la famille chimique « des terres rares » : praséodyme, néodyme, samarium, europium, dysprosium, holmium, erbium, thulium ; citons également le chrome ( $Cr^{+++}$ ) et l'uranium ( $U^{+++}$ ), trivalents. Les éléments sont statistiquement répartis sous forme d'ions, dans l'édifice cristallin, qui joue le rôle de matrice bien ordonnée. Lors de l'élaboration du cristal laser, ils sont introduits, de préférence, à l'état de composés, ayant un ion commun avec l'espèce chimique constituant la matrice : ainsi on ajoute de l'oxyde de chrome à l'oxyde d'aluminium pour former le rubis ; du fluorure d'uranium trivalent au fluorure de calcium ; du tungstate de néodyme au tungstate de calcium.

A l'heure actuelle, l'une des méthodes les plus utilisées pour préparer des cristaux laser est le « tirage vertical de Czochralski » ; elle permet d'obtenir ces cristaux suivant une orientation choisie, avec des dimensions assez grandes et des vitesses de croissance relativement élevées tout en conservant une très bonne qualité cristalline.

Dans cette méthode, imaginée en 1918 par J. Czochralski, la matière première est chauffée dans un creuset (Fig. 1), à une température légèrement supérieure à son

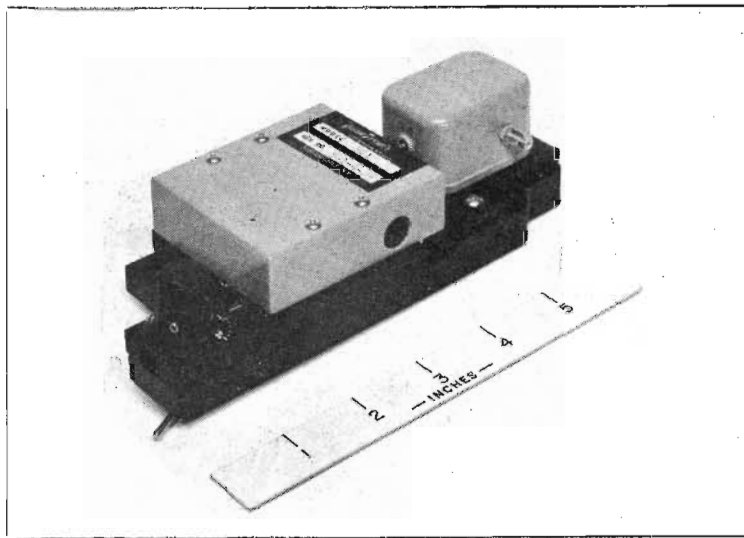


Photo n° 1. — Laser Yag : celui-ci émet des impulsions à la fréquence de 50 kHz. (Cliché Quantronix)

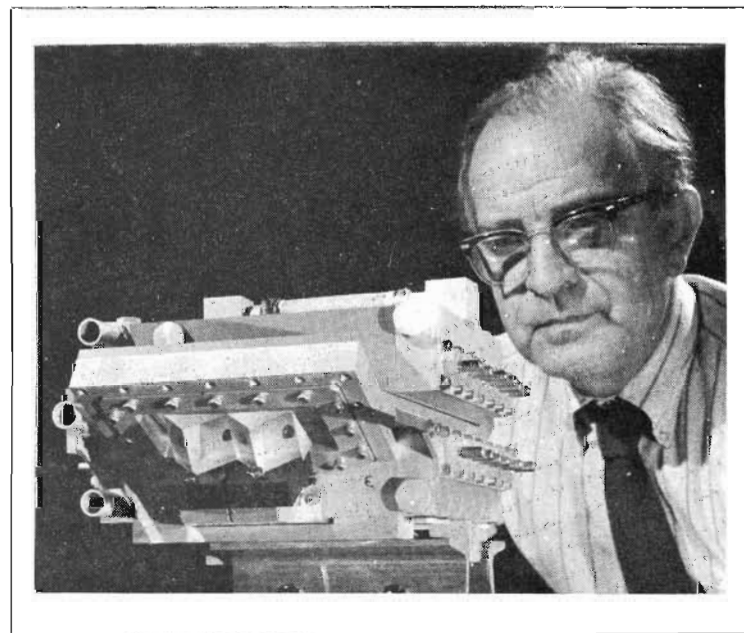


Photo n° 2. — Léonard M. Goldman a développé le laser « Big-Mini FPL » qui fournit une puissance moyenne de 105 W. (Cliché General Electric)

point de fusion. On trempe partiellement un germe cristallin au centre de la surface du bain et, lorsqu'il est bien mouillé par le liquide, on élève lentement le germe tout en l'animant d'un mouvement de rotation en vue de favoriser les échanges de chaleur et de régulariser de la sorte la croissance. Le cristal qui se forme se refroidit par conduction de chaleur à travers le germe et l'axe de tirage qui le supporte.

## QUELQUES PERFORMANCES

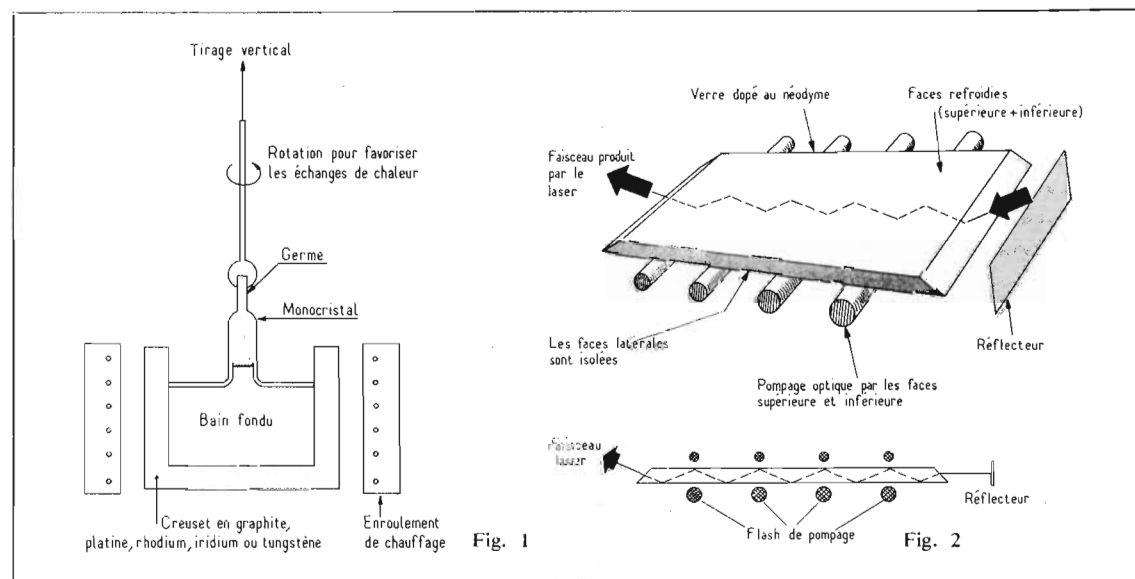
Tous les lasers au néodyme fonctionnent à une longueur d'onde voisine du micromètre, dans le proche infrarouge, ce qui les rend très intéressants, en particulier grâce à leur « discrétion », dans des applications militaires.

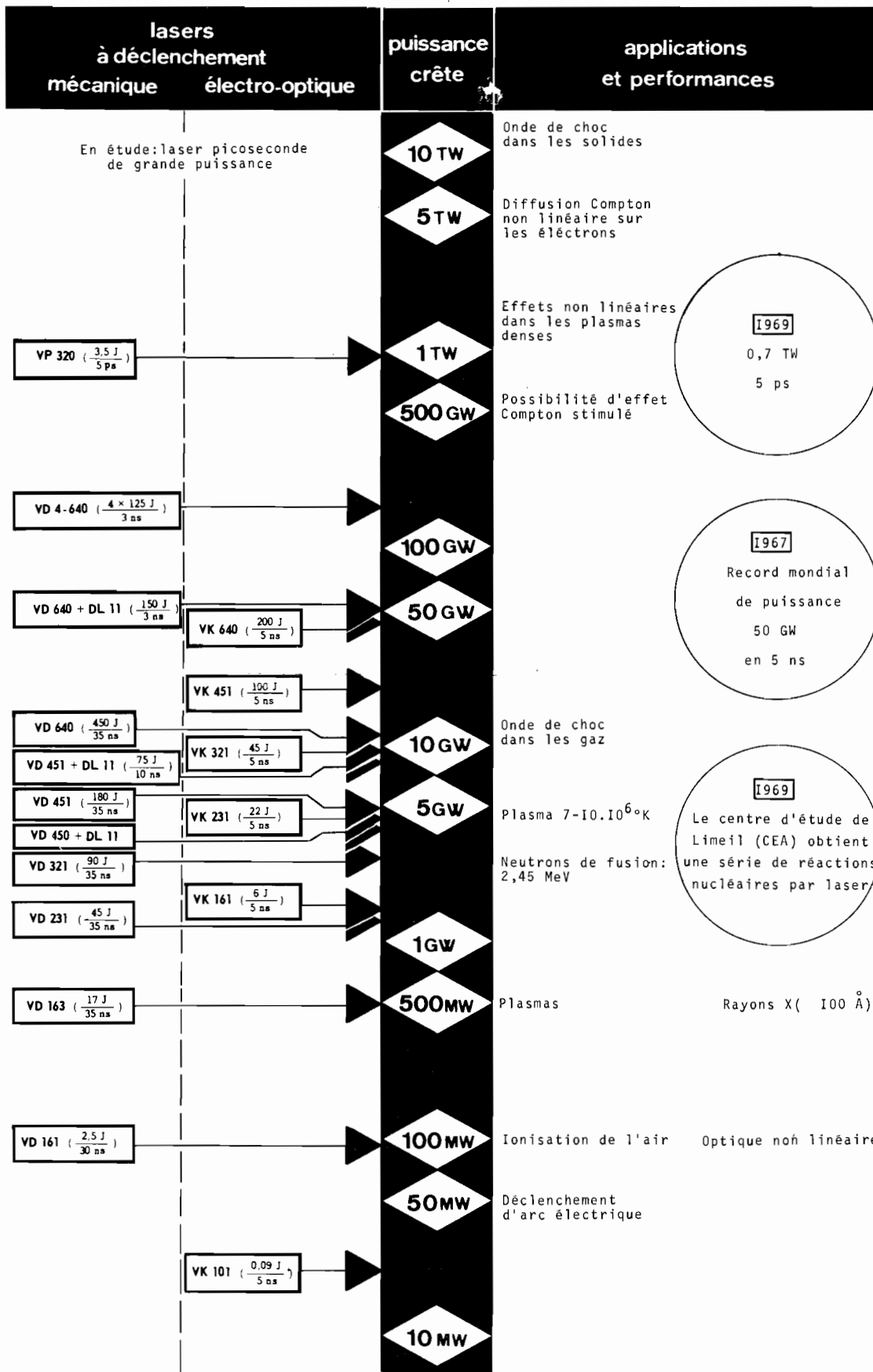
Matériau amorphe et parfaitement homogène, le verre délivre des faisceaux laser d'une grande qualité optique : divergence faible, révolution parfaite autour de l'axe du barreau donnant des impacts circulaires de très petite dimension au foyer d'une lentille. La reproductibilité des caractéristiques est parfaite d'un barreau à l'autre.

Les lasers reviennent moins cher à fabriquer que les cristaux. Néanmoins, parmi les lasers solides, le laser à cristal de grenat d'aluminium-yttrium est celui ayant le meilleur rendement. Cette propriété, jointe à une bonne conductibilité thermique du cristal, lui permet de fonctionner à grandes cadences dans des conditions parfaitement acceptables économiquement. La qualité des cristaux assure, par ailleurs, une bonne homogénéité optique au faisceau délivré par le laser YAG.

## LES LASERS ZIG-ZAG...

General Electric développe une série de lasers solides, dits « zig-zag » : le faisceau optique décrit, au sein du matériau actif, une ligne brisée en zig-zag.





**TABLEAU II LES CRISTAUX POUR LASERS**

<p>● <b>LES OXYDES :</b>                  - Oxyde d'aluminium : <math>Al_2O_3</math> ;                  - Grenat d'yttrium-aluminium (YAG) : <math>Y_3Al_5O_{12}</math> ;                  - Grenat d'yttrium-gallium (YGaG) : <math>Y_3Ga_5O_{12}</math>.</p> <p>● <b>LES FLUORURES :</b>                  - Fluorure de calcium : <math>CaF_2</math> ;                  - Fluorure de baryum : <math>BaF_2</math> ;                  - Fluorure de strontium : <math>SrF_2</math> ;                  - Fluorure de lanthane : <math>LaF_3</math>.</p>	<p>● <b>LES TUNGSTATES ET MOLYBDATES</b>                  - Tungstate de calcium : <math>CaWO_4</math> ;                  - Tungstate de strontium : <math>SrWO_4</math> ;                  - Molybdate de calcium : <math>CaMoO_4</math> ;                  - Molybdate de strontium : <math>SrMoO_4</math> ;                  - Molybdate de plomb : <math>PbMoO_4</math>.</p>
---	--

**TABLEAU III. — LES LASERS SOLIDES**

Support	Ion actif	Longueur d'onde ( $\mu m$ )
$Al_2O_3$ (alumine) .....	$Cr^{+++}$	0.69
$CaF_2$ (fluorure de calcium).....	$U^{+++}$	2.6
$WO_3Ca$ } (tungstate de calcium) .....	$Nd^{+++}$	1.06
	$Tm^{+++}$	1.91
Verre .....	$Nd^{+++}$	1.06
Verre .....	$Gd^{+++}$	0.31
$CaF_2$ } (fluorure de calcium) .....	$Sm^{+++}$	0.71
	$Dy^{+++}$	2.36

**TABLEAU IV. — LES LASERS SOLIDES : CARACTÉRISTIQUES ET APPLICATIONS**

Laser	Milieu utilisé	Longueur d'onde* (nanom.)	Rendement maximal (%)	Régime de fonctionnement	Mode de pompage optique	Energie (joules) ou puissance (watts)	Durée des impulsions	Applications
Yag en impulsions	Grenat d'yttrium aluminium dopé au néodyme	1 060 nm	4 %	Pulsé	Flash ou lampe au krypton	Quelques joules	200 nano-secondes 0,1 à 10 millisecondes	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ajustage de résistances</li> <li>● Usinage de couches minces ou épaisses</li> <li>● Soudage par points</li> <li>● Perçages de petits diamètres</li> </ul>
Yag en continu	Idem	1 060 nm	4 %	Continu	Lampe au krypton	Jusqu'à 100 watts		Au stade du laboratoire pour des puissances supérieures à 10 watts
Verre	Verre dopé au néodyme	1 060 nm	2 %	Pulsé	Flash xénon	Jusqu'à 500 joules	0,1 à 10 millisecc.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Perçages</li> <li>● Soudage par points</li> <li>● Equilibrage de gyroscopes</li> <li>● Spectrographie par laser</li> </ul>
Rubis	Corindon dopé au chrome	694 nm	1 %	Pulsé	Flash xénon	Jusqu'à 500 joules	0,1 à 10 millisecondes 30 nanosec.	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Micro-perçages</li> <li>● Ajustage de résistances et capacités</li> <li>● Travaux biologiques</li> <li>● Photocoagulateur</li> <li>● Prise d'hologrammes d'objets en mouvement.</li> </ul>

\* 1 nanomètre =  $10^{-9}$  m =  $10^{-3}$   $\mu$  m.

Le premier laser zig-zag fut présenté dans le courant 71. Dans la première configuration le milieu actif était constitué d'une succession de barreaux de verre, placés suivant une ligne brisée, et le faisceau laser traversait chacun des barreaux de part en part.

Dans une seconde configuration, annoncée à la mi-mai 72, le barreau de verre dopé au néodyme est parallélépipédique, de section droite rectangulaire. Le faisceau optique traverse le barreau droit tout en étant réfléchi par les deux faces latérales ; le pompage optique du laser, à l'aide de lampes flash, s'opère au travers des faces supérieures et inférieures du barreau de verre (Fig. 2).

Ce dernier laser s'appelle « Mini-Face Pumped Laser », ou « Mini-FPL ». Il présente l'avantage de réduire considérablement les distorsions optiques résultant de l'échauffement du verre.

Dans une étape ultérieure, General Electric envisage d'employer des cristaux YAG à la place du verre.

Les essais actuels ont montré qu'avec un barreau en verre de 23 cm de longueur, 10,2 cm de largeur et 1,27 cm d'épaisseur, pompé par des lampes flash au xénon, on peut obtenir des impulsions laser à la cadence de 3 impulsions par seconde, de puissance moyenne égale à 105 W (soit une énergie moyenne par impulsion de 35 J).

**... ET SUPERFICIELS**

Une autre voie de recherches est entreprise par Frank L. Varsanyi, à l'université de Stanford. L'effet laser prend place à la surface de cristaux excités par une « pompe optique ».

Un tel laser superficiel pourrait jouer un rôle important dans les futures mémoires d'ordinateurs à circuits intégrés optiques.

Varsanyi a éclairé, avec un faisceau intense de lumière monochromatique provenant d'un laser à colorant (lui-même excité par un laser pulsé à azote), des prépara-

tions fraîches de trichlorure de praséodyme ( $PrCl_3$ ) et de tribromure de praséodyme ( $PrBr_3$ ). Le faisceau d'excitation pompe les ions sur une profondeur voisine du micromètre sous la surface des cristaux. La densité ionique est très élevée de sorte que le rendement du laser superficiel se trouve également très élevé. L'effet laser apparaît alors dès que l'énergie du faisceau de pompage atteint un seuil très faible (de l'ordre du microjoule).

Lorsque la densité d'énergie de la source de pompage augmente, un second seuil apparaît au-delà duquel un phénomène de saturation se présente : l'épaisseur de la région active augmente et brusquement le phénomène laser superficiel disparaît ; c'est tout le matériau qui émet à ce moment un faisceau laser, de même longueur d'onde que le laser superficiel.

Outre l'application dans les mémoires d'ordinateurs, Varsanyi envisage même de disperser les matériaux actifs dans un milieu

adéquat (qu'il faudrait définir) : on pourrait ainsi créer de nouvelles technologies d'unités d'affichage, à lasers solides.

**LASER SOLAIRE POUR LES COMMUNICATIONS SPATIALES**

Dans un autre domaine, la firme GTE Sylvania a mis au point un laser YAG dopé au néodyme, fournissant une puissance de 1,5 W et ayant comme source de pompage : le soleil. L'énergie solaire d'excitation est collectée par un miroir de 60 cm de diamètre et focalisée sur le matériau actif du laser. Selon Sylvania un tel laser pourrait avoir une durée de vie de 7 années, soit une durée de vie supérieure aux lasers industrialisés « conventionnels ». Un tel laser pourrait servir pour les télécommunications spatiales de demain.

**Marc FERRETTI.**