

Mardi 22 Mai 1984

Le laser et ses multiples applications
(médecine, métrologie, micro-usinage,
holographie, télécommunication)

Les adhérents pourront se reporter au fascicule Janvier 1982-Mars 1982 où ils trouveront la théorie du laser.

Le mardi 22 mai, Monsieur De Botton, chef adjoint de la section physique au Palais de la découverte, nous a entretenus du laser. Un film sur les fibres optiques a ensuite été projeté.

Ce compte rendu reprend les principaux points abordés ce jour, complétés par quelques additifs permettant de cerner plus complètement le sujet.

Le laser connaît depuis 20 ans un attrait exceptionnel.

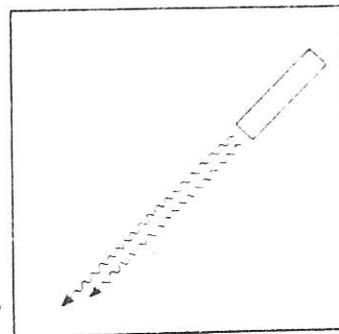
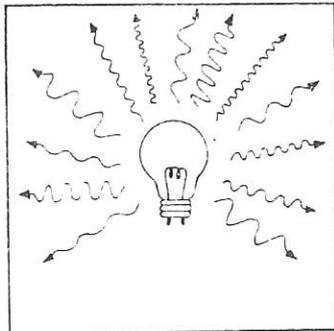
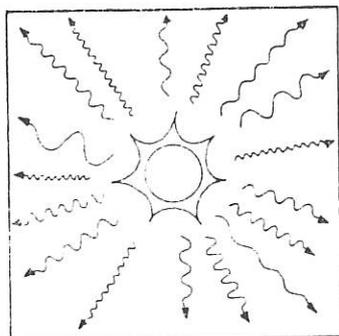
Le principe de son fonctionnement fut établi par des universitaires en 1958, Schawlow et Townes, et deux ans plus tard, le premier de ces appareils vit le jour dans un laboratoire de recherche industriel. Il fut inventé par T.H. Maiman. Il utilisait un petit cristal de rubis synthétique, taillé en forme de cylindre totalement argenté à un bout et partiellement à l'autre, pour constituer une cavité optique résonnante.

Depuis lors, le laser a complètement transformé les méthodes d'investigation dans de nombreux domaines de la recherche, tant fondamentale qu'appliquée. Bien plus, il est devenu un composant essentiel de l'instrumentation destinée aux techniques de pointe de l'électronique, de la métallurgie ou de la télématique, et ses applications militaires sont nombreuses. Enfin, ces dernières années ont vu l'utilisation du laser dans le domaine biomédical.

Formé des initiales de "light amplification by stimulated emission of radiation" ou "amplification de lumière par émission simultanée de rayonnements", le laser produit une lumière cohérente, d'une seule longueur d'onde et d'une seule couleur, puisqu'à chaque couleur correspond une longueur d'onde précise. C'est sa cohérence qui fait l'intérêt du laser : le faisceau lumineux ne s'étend pas avec la distance mais reste concentré, ce qui permet de transporter, même à grande distance, l'énergie émise et de viser une zone avec une extrême précision (fig. 1).

SOLEIL & LAMPE ORDINAIRE

LASER
(lumière cohérente)



émettent toutes sortes de longueurs
d'ondes dans tous les sens

émet une seule
longueur d'onde,
dans une seule direction

Fig. 1.-

Quand on tord une petite barre de métal rapidement, plusieurs fois de suite, on constate une apparition de chaleur au sein du métal. Un apport d'énergie sur de la matière entraîne donc ici une restitution d'énergie sous une autre forme. D'une manière très simple, on peut dire que le laser fonctionne sur le même principe. Au lieu de tordre de la matière, on va plutôt l'exciter avec des éclairs de flash ou avec des forts courants électriques. Résultat : la matière va atteindre un niveau supérieur d'énergie, entier dans une sorte d'état second et émettre de la lumière quand elle reprendra son niveau initial d'énergie.

Une analogie hydraulique permet de mieux saisir le passage entre deux niveaux d'énergie (fig. 2).

Quand je tire un seau que j'ai rempli d'eau dans le fond d'un puits (niveau fondamental d'énergie) je dépense de l'énergie pour l'amener sur la margelle du puits.

Sur cette margelle, le seau est en équilibre instable ; bousculé, l'eau se renverse et rejoint son niveau fondamental en fournissant de l'énergie qu'on pourrait utiliser.

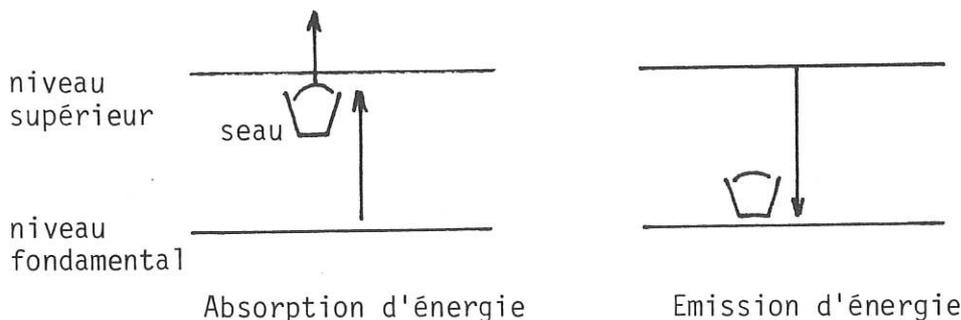


Fig. 2.-

Absorption d'énergie

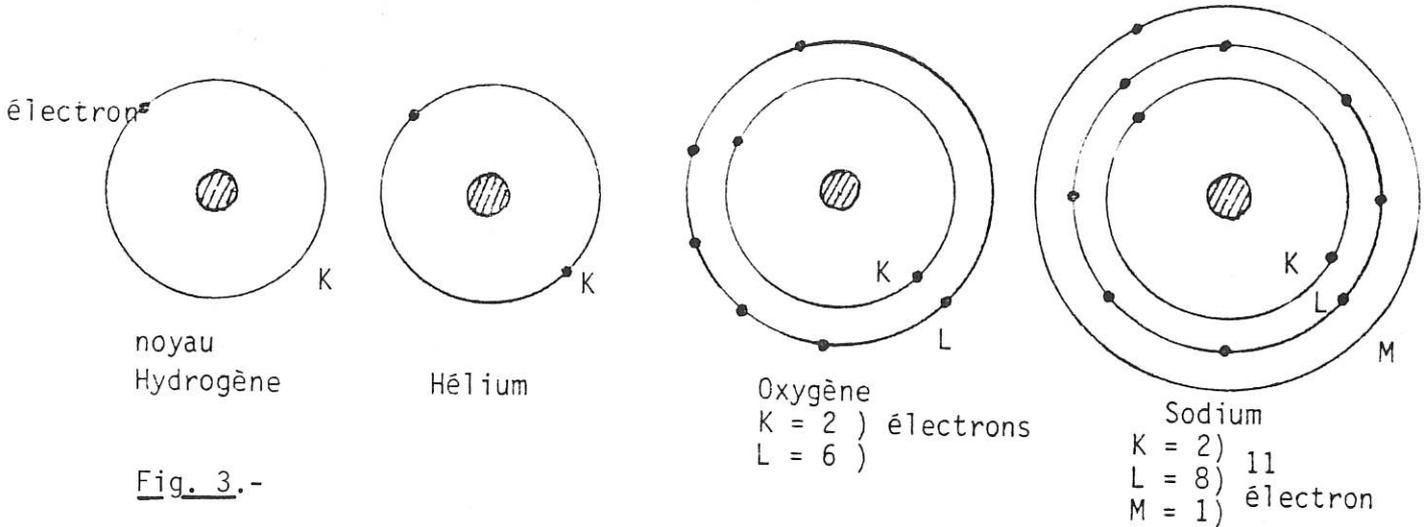
Emission d'énergie

Dans le cas du laser, la matière utilisée est généralement transparente ; elle peut être solide (rubis), gazeuse (néon, argon) ou liquide (colorants).

Ces matières sont agencées dans des tubes en verre et font partie d'un ensemble mécanique et optique dont le but sera d'obtenir un rayon de lumière exploitable.

Rappelons quelques données de physique pour bien comprendre ce phénomène.

- Structure de l'atome (fig. 3).



L'atome comprend :

- . Un noyau,
- . et des couches d'électrons ; chaque couche ne peut porter au maximum qu'un nombre déterminé d'électrons :

$$K = 2 \quad L = 8 \quad M = 18 \quad N = 32 \quad O = 18 \quad P = 8$$

- Lorsque les électrons sont dans leur position normale sur les couches électroniques, l'atome ne "rayonne" pas : son énergie est stationnaire (niveau fondamental stable).

- L'atome peut être "excité" sous l'action du choc d'un corpuscule, sous l'action d'un champ électrique intense ... Un ou plusieurs électrons passent alors d'une couche à une couche plus externe ; ce passage exige qu'on fournisse à l'atome une certaine énergie. C'est un état instable. L'opération s'appelle "pompage" (voir l'analogie hydraulique, fig. 2).

Lorsque les électrons excités reprennent leurs places normales, au bout d'un millième de seconde par exemple, l'atome restitue sous forme rayonnante (lumineuse, par exemple) l'énergie qu'il avait reçue.

La production de lumière est ainsi discontinue et irrégulière : elle est incohérente.

Dans le laser, on rendra cette lumière cohérente.

Considérons un modèle d'atome très simple, (fig. 4) avec deux orbitales électroniques, soit deux niveaux d'énergie, un niveau fondamental E_1 et un niveau supérieur E_2 qui est celui d'une orbite extérieure à la première. Un photon de lumière monochromatique, par son énergie, peut faire passer un électron du niveau E_1 au niveau E_2 . L'énergie de l'atome est augmentée.

Il est dit alors en état excité, état instable.

L'électron spontanément peut retourner au niveau fondamental E_1 et émettre un photon, un rayonnement dont la fréquence est proportionnelle à l'énergie mise en jeu. C'est ce qui se passe dans une lampe à incandescence allumée.

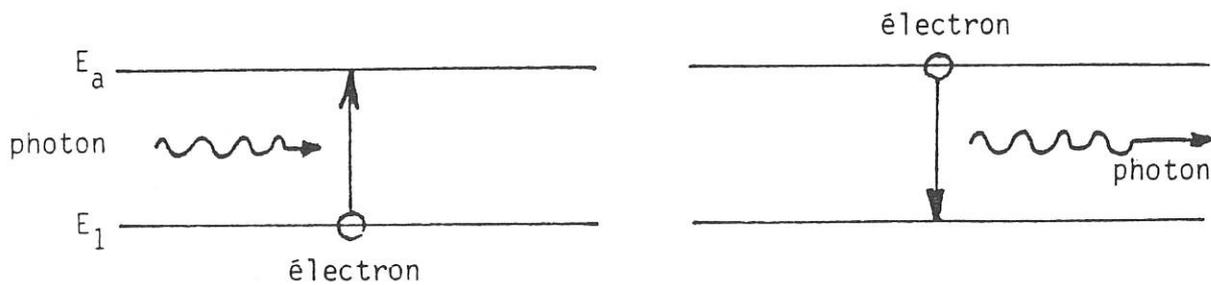


Fig. 4.- absorption

émission

Mais si un atome excité reçoit un photon de même énergie, on obtient alors, en plus du photon incident, un autre photon de même longueur d'onde et en phase avec le premier : c'est l'émission stimulée (fig. 5). L'onde résultant de l'addition des deux ondes a même fréquence, mais son amplitude est plus grande : il y a eu amplification.

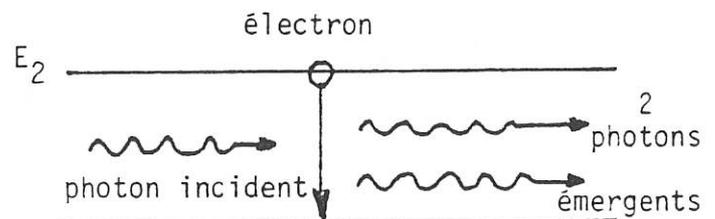
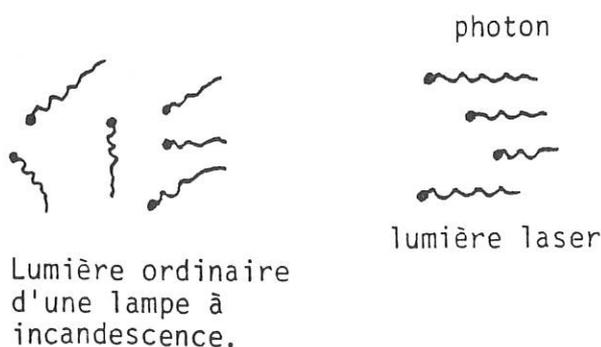


Fig. 5.- Représentation schématique de l'émission stimulée.



Si les photons émergents rencontrent d'autres atomes excités, il y aura émission de nouveaux photons de même phase ; au fur et à mesure de sa propagation, l'onde incidente engendrera une cascade d'émission.

sions stimulées et se trouvera fortement amplifiée. C'est une émission en chaîne d'un grand nombre de photons sous l'action d'un seul dans un milieu contenant un nombre convenable d'atomes excités.

Mais à côté des lasers classiques, on a mis au point un laser à électrons libres, qui a fonctionné pour la première fois à l'université d'Orsay fin juin 1983, capable de couvrir différents domaines, physique, chimie, chirurgie, industrie etc ... Il serait alors possible de régler sa fréquence, c'est-à-dire son rayonnement, à la différence des lasers classiques, qui n'émettent que sur une seule longueur d'onde : un peu comme un instrument de musique qui, au lieu de donner une note unique, couvrirait un grand nombre de notes différentes.

Comment fonctionne ce futur laser ?

Un faisceau d'électrons, qui se déplacent à la vitesse de la lumière, pénètre dans un champ magnétique sinusoïdal, établi cette fois encore entre deux miroirs, dont l'un n'est que semi-réfléchissant. Freinés par le champ magnétique, les électrons vont produire un rayonnement, chacun émettant un photon (grain de lumière). Comme dans le laser classique, les photons effectuent des allers-retours entre les 2 miroirs. Ils traversent un miroir semi-réfléchissant quand ils ont atteint une puissance suffisante, et donnent le rayon laser. Pour ce type de laser, la longueur d'onde est choisie au départ en réglant l'énergie du faisceau électronique (fig. 6-6').

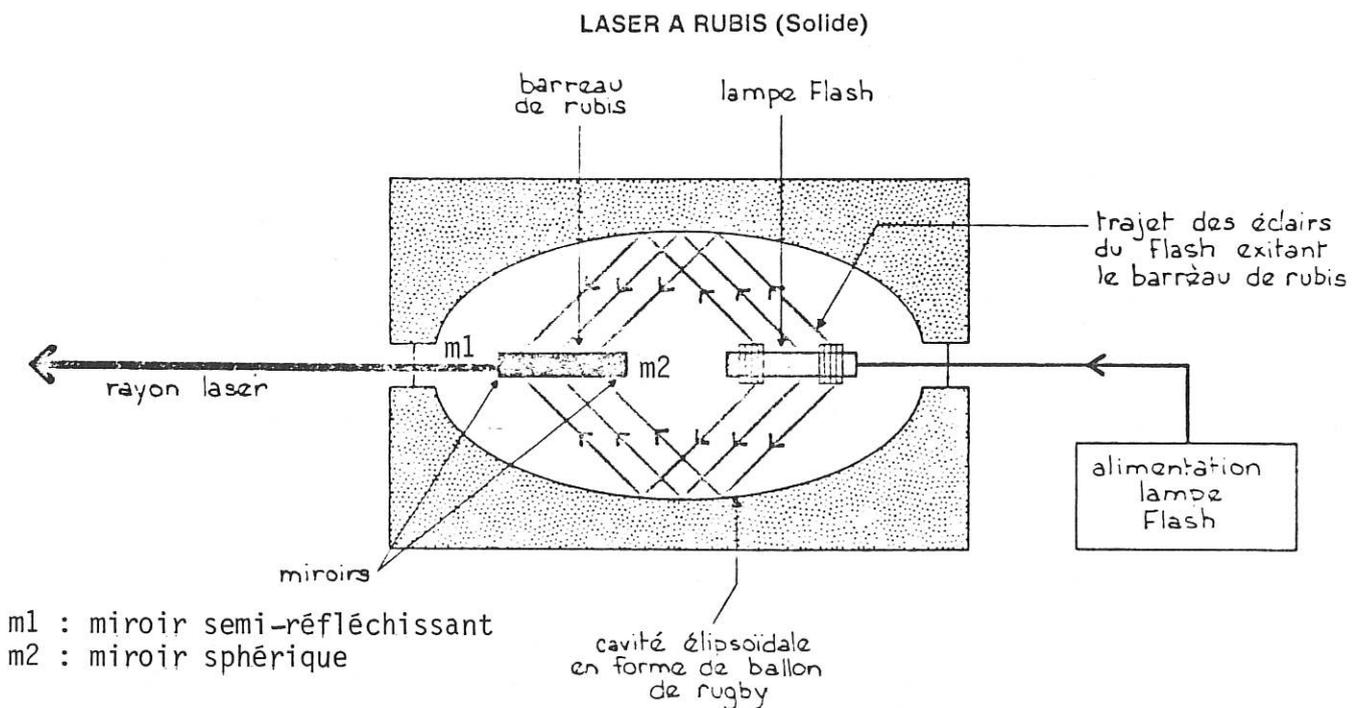


Fig. 6

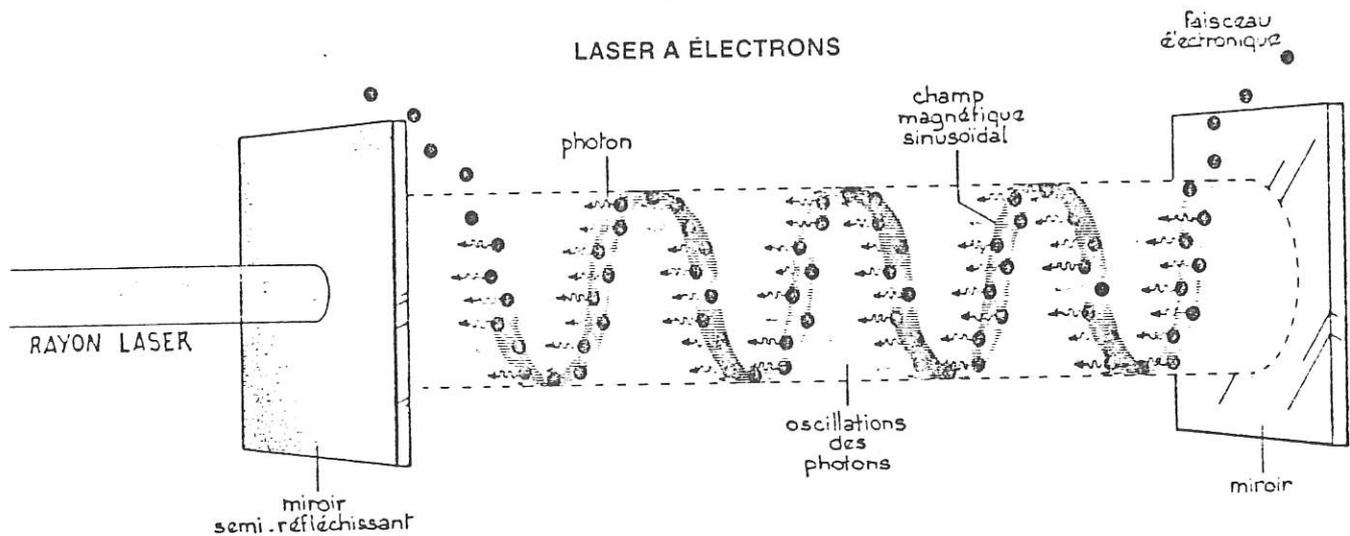


Fig. 6^a

QUELQUES APPLICATIONS DU LASER.-

. Lecture optique d'un disque : plus de frottement ni d'usure, le disque peut tourner inlassablement puisque l'emploi du diamant est supprimé. Le compact disc élimine tous les inconvénients du disque traditionnel, poussière, rayures, traces de doigts.

La musique n'est plus "inscrite" en surface, mais à l'intérieur du disque : une couche de plastique transparente protège la couche aluminisée qui réfléchit le rayon laser. C'est par cette réflexion du rayon que s'opère la lecture optique.

. Application militaire : Archimède pourrait être considéré, avec beaucoup d'audace, comme le grand-père du rayon laser.

On lui attribue la destruction de la flotte romaine devant Syracuse, en 212 av. J.C. ; il aurait eu l'idée de concentrer, à l'aide de miroirs, le rayonnement solaire sur les navires pour les faire flamber.

Aujourd'hui, c'est l'espace que l'on présente comme le champ de tir privilégié des militaires, avec l'avènement du canon-laser : il permet d'atteindre une cible avec précision à des distances allant jusqu'à plusieurs milliers de kilomètres.

L'émission du rayon est subordonnée à un système optique d'une extrême précision.

Signalons cependant qu'il faut énormément d'énergie pour faire fonctionner le laser capable de détruire de la matière, et que cette énorme quantité d'énergie n'est pas évidente à produire et surtout extrêmement difficile à transporter. Par ailleurs, si cette arme est fixe, il sera plus facile de la détecter et de la détruire, et puis il faut dire aussi que le rayon est facilement absorbable par l'atmosphère (vapeur d'eau, nuages, poussière, etc ..) et qu'un simple miroir suffirait à le renvoyer d'où il vient (voir conférence sur l'utilisation militaire de l'Espace du 13 décembre 1983).

Bien que la recherche s'y attache, l'utilisation de l'arme-laser dans l'espace et sur terre relève encore de la science-fiction. Il peut cependant être efficace comme aide de tir, pour guider un missile, éclairer une cible, aveugler les capteurs stellaires d'un satellite et le destabiliser à vue.

. Détection et photographie de particules à vie très courte dans l'espace de l'ordre du $1/100\ 000\ 000\ 000\ 000$ e de seconde soit un cent mille milliardième de seconde.

Le parcours de ces particules dans l'espace est extrêmement court. Là où les techniques classiques de photographie échouent, les physiciens utilisent l'holographie : elle permet de distinguer des éléments distants parfois de 5 à 10 microns.

. Médicale : l'aventure médicale du laser a débuté dès le milieu des années 1960.

L'action purement thermique du rayonnement lumineux sur les tissus vivants constitue de très loin le mécanisme prédominant dans les applications thérapeutiques du laser. En concentrant la lumière sur une surface réduite, on chauffe localement les tissus qui se rétractent par suite de l'évaporation d'une partie de leur contenu en eau. Cette nécrose dite de coagulation est irréversible et les tissus atteints vont ensuite s'éliminer : c'est le phénomène de détersion qui sera suivi de cicatrisation. Si l'on chauffe encore plus intensément encore, les tissus peuvent être volatilisés. La coagulation est utilisée soit pour détruire de petits phénomènes tumoraux qui seront éliminés lors de processus de détersion, soit pour arrêter une hémorragie. Dans ce cas la rétraction thermique des tissus provoque la fermeture des vaisseaux ouverts qui seront secondairement oblitérés par des caillots formés sur place. Par volatilisation il est possible de détruire des tumeurs plus importantes que lors d'une simple coagulation.

La photocoagulation à l'aide de lasers à argon présente, en ophtalmologie, deux indications principales : la prévention du décollement de la rétine et le traitement de certaines rétinopathies diabétiques.

Des lasers à argon plus puissants se sont révélés intéressants en otorhinolaryngologie, pour la chirurgie de l'oreille interne et pour certains actes au niveau des fosses nasales. Mais pour traiter le larynx, cavité accessible en ligne droite et en particulier pour soigner les lésions bénignes des cordes vocales, on emploie des lasers à CO_2 pilotés par biomicroscope.

On utilise également le laser en gynécologie, etc ...

Le laser a fait également une apparition remarquable en chirurgie réparatrice. La chirurgie des brûlures apparaît la plus intéressante.

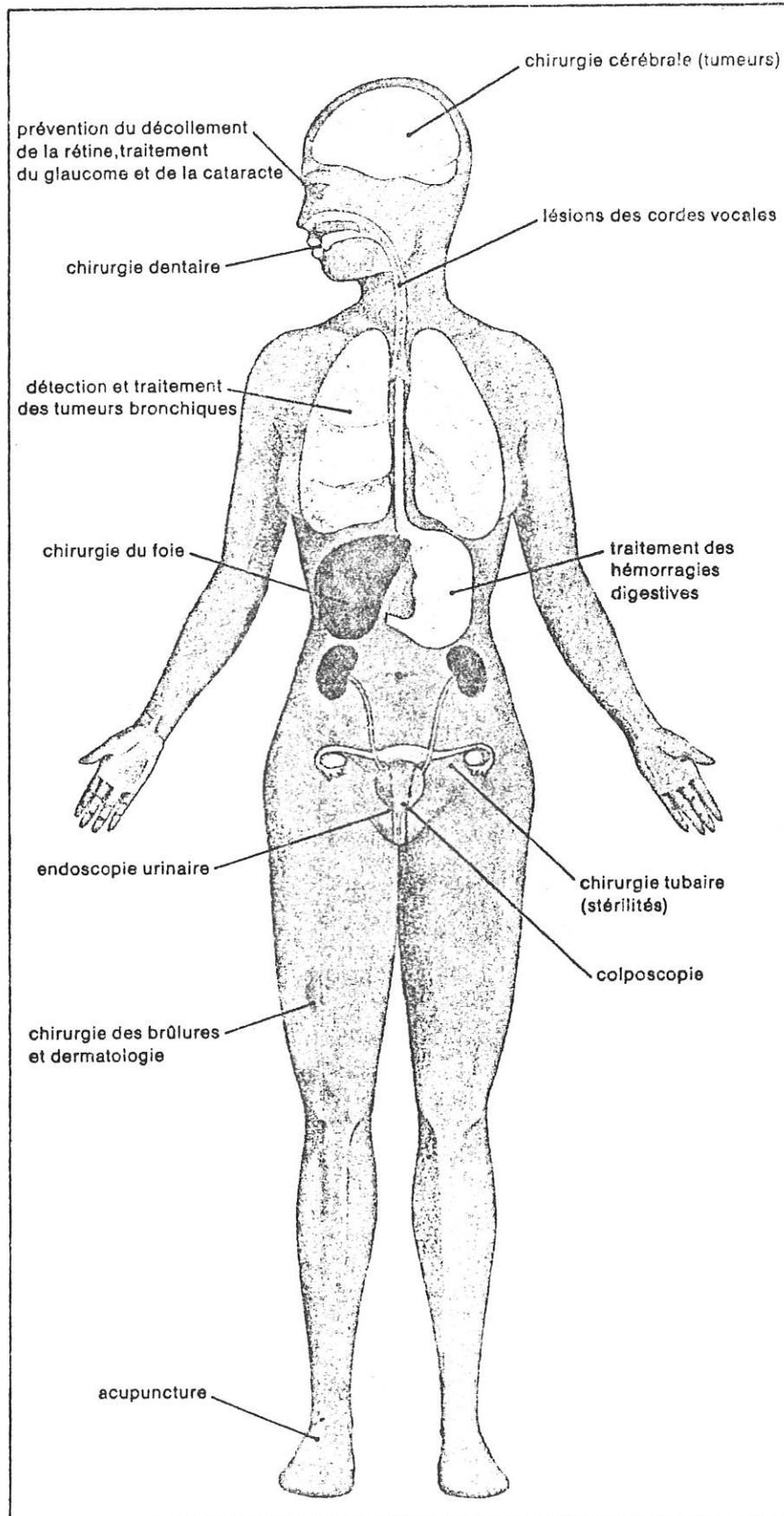
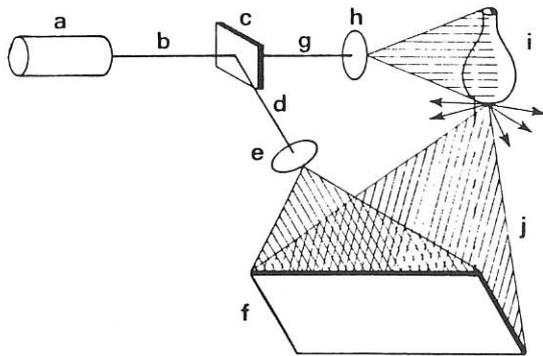


Fig. 7.- Les lasers peuvent être utilisés pour soigner des lésions touchant des parties variées du corps humain, ainsi que pour des diagnostics topographiques précis en cancérologie. Ils ont aujourd'hui conquis une place de choix en ophtalmologie, otorhinolaryngologie, et renouvellent certaines techniques d'intervention chirurgicale.

De nombreux travaux expérimentaux ont été réalisés sur la prophylaxie des caries. Le but de ce traitement est d'augmenter la résistance de l'émail au niveau des zones à haut risque, en réalisant une "vitrification de surface" au moyen d'une brève impulsion laser. La partie superficielle de l'émail, après avoir été liquéfiée se resolidifierait sans présenter les micro-failles qui sont un point d'appel au processus infectieux à l'origine de la carie.

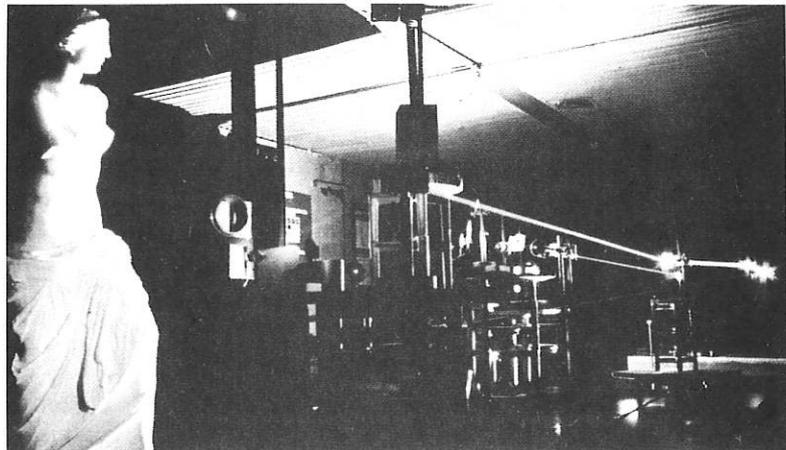
. L'holographie : l'image holographique est obtenue en projetant un faisceau de lumière laser sur un objet choisi ; la lumière réfléchie et diffusée par l'objet forme un "réseau d'interférence" (l'hologramme) avec un deuxième faisceau laser, dit de référence, qui n'a subi aucune diffusion. L'hologramme enregistré sur une plaque photographique spéciale est ensuite visualisé par simple éclairage de la plaque au moyen d'un rayon laser.

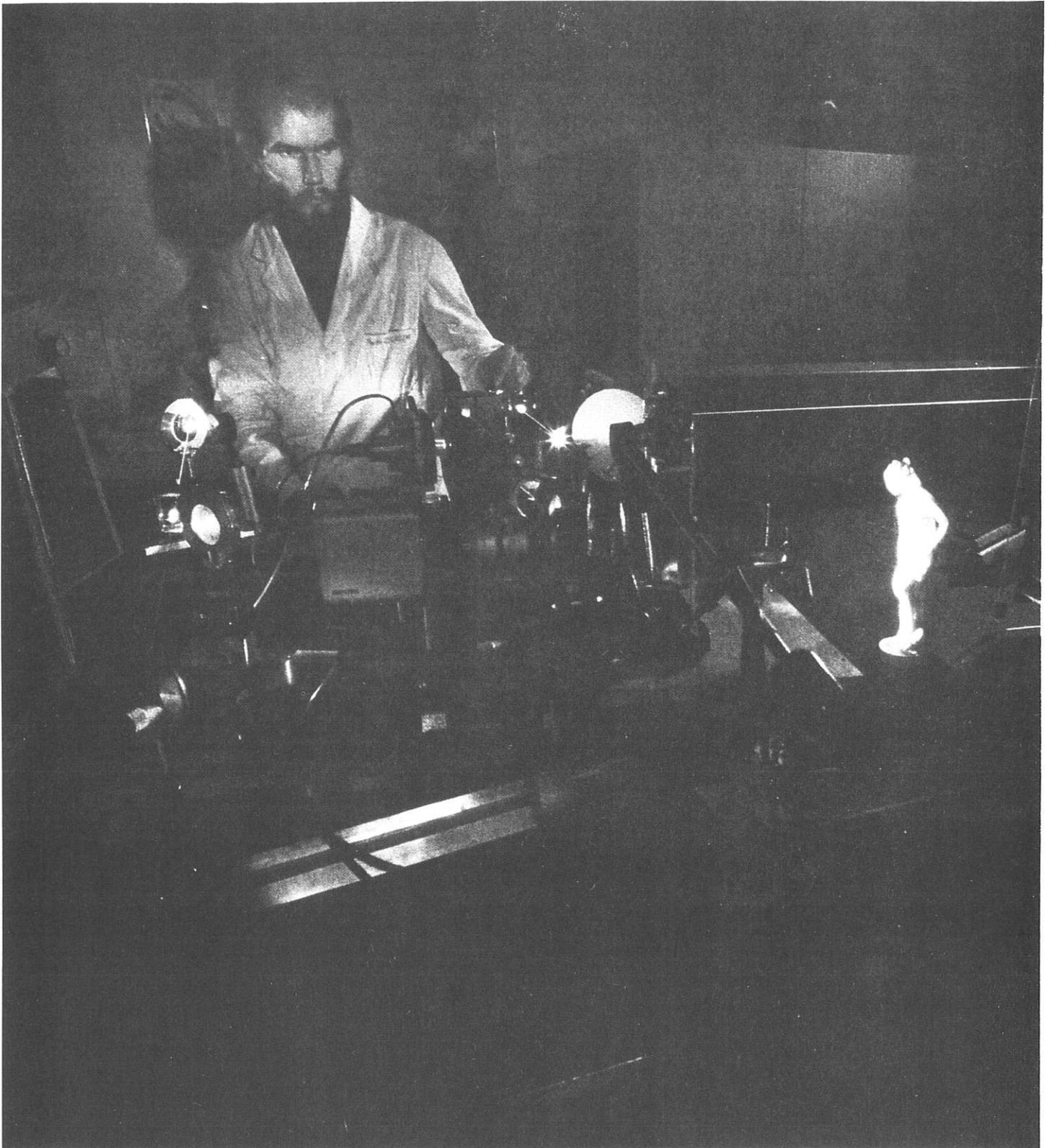
Enregistrement d'un hologramme



Le principe de l'hologramme est simple ; un laser (a) émet une radiation lumineuse vers un objet (i). Cette radiation (b) traverse un miroir semi-transparent (c). Elle est étalée par une lentille (h), et va alors (g) éclairer l'objet qui réfléchit la lumière (j) vers une plaque holographique recouverte d'une émulsion argentique (f). L'autre partie de la radiation (d) est, d'abord réfléchiée par le miroir (c), puis étalée par une lentille (e). Elle vient enfin frapper la plaque photographique (f) qui sera développée comme en photographie traditionnelle.

Image holographique de la Vénus de Milo restituée en lumière laser Argon à partir d'une plaque holographique de 1,50m par 1m. Un observateur situé à quelques mètres voit l'image de la Vénus de la même taille (2,18m) que celle du Louvre.





Réglage des trajets optiques des lasers argon
à partir d'une statuette et de son hologramme