

DÉCRYPTAGE SYSTEMIQUE

LE LASER

L'exemple du laser pris pour rechercher les possibilités et les voies et moyens de constitution de l'Encyclopédie Systémique des Technologies a une signification de principe: le laser est en effet le type même d'application organisée de lois scientifiques et techniques.

LA PROBLEMATIQUE

Le mouvement intellectuel de l'analyse est le suivant:

1 on part de l'histoire du laser et, à travers elle, on entrevoit sa genèse constitutive et la diffusion de ses applications.

2 on étudie les mécanismes selon lesquels "l'objet abstrait" devient "concret". Pour cela:

a) on résume les lois scientifiques de référence;

b) on procède à une description systémique:

b₁) de la structure de l'objet,

b₂) de la variété des formes de la machine laser et de l'évolution de ses générations technologiques,

b₃) de la complexité structurelle et fonctionnelle de la machine laser;

c) on récapitule les applications principales du laser.

3 on donne un aperçu du marché du laser et de la machine laser en France

La **“concrétisation”** de l'objet s'appuie sur les thèses de G. SIMONDON¹. La description systémique est faite en référence aux travaux de P.F. GONOD² et celle de la complexité à ceux de Y. DEFORGE³, résumés dans la problématique générale (voir Annexe Générale).

☞ Il est intéressant dans le cas du laser de rappeler les thèses formulées il y a une vingtaine d'années par Simondon et qui sont malheureusement tombées dans l'oubli alors qu'elles ouvraient la voie à une réflexion essentielle.

•L'objet technique "abstrait" est "la traduction en matière d'un ensemble de notions et de principes scientifiques séparés les uns des autres en profondeur...Cet objet est la traduction physique d'un système intellectuel" On peut ajouter d'un système intellectuel éclaté.

•L'objet technique "concret" n'est pas "qu'une simple application ou un faisceau d'applications de ces principes scientifiques. Il tend vers la fermeture du système des causes et des effets qui s'exercent circulairement à l'intérieur de son enceinte, et de plus, il incorpore une partie du monde naturel qui intervient comme condition de fonctionnement." En d'autres termes, en acquérant la structure d'un système, l'objet technique concret devient de plus en plus semblable à l'objet naturel, c'est dans ce sens qu'il se "concrétise". Sa structure a le même statut qu'une structure naturelle, bien qu'elle puisse présenter un arrangement différent de celle-ci. Alors que dans l'objet abstrait chaque structure est chargée de remplir une fonction définie, et généralement une seule, dans l'objet technique concret l'organisation des sous-ensembles est fonctionnelle dans le fonctionnement total. "La spécialisation se fait non par fonction mais synergie par synergie, et c'est le groupe de fonctions et non la fonction unique qui constitue le véritable sous-ensemble dans l'objet technique ". Dans l'objet technique concret il y a correspondance pluri-fonctionnelle dans l'objet technique.

•Les objets techniques, selon leur niveau, possèdent ou non un milieu associé. Les éléments techniques se distinguent des véritables individus en ce sens qu'ils ne possèdent pas de milieu associé. Par contre "il y a individu technique lorsque le milieu associé existe comme condition sine qua non de son fonctionnement. Dans le cas contraire il y a ensemble. "Il y a récurrence de causalité entre le milieu associé et les structures, mais cette récurrence de causalité n'est pas symétrique. Le milieu joue un rôle d'information, il est le siège

¹SIMONDON Gilbert “Du mode d’existence des objets techniques”, Aubier, 1969.

²P.F.Gonod “la technologie générale: projet d’Encyclopédie Systémique de la Technologie” Analyse de Systèmes, vol. XIV n°4, déc. 1988.

³Y. Deforge “technologie et génétique de l’objet industriel “, Maloine, 1985, “l’œuvre et le produit”, Champ Vallon 1989.

des auto-régulations", mais tandis que " le milieu est homéostatique, les structures sont animées d'une structure non récurrente, elles vont chacune dans leur propre sens". La différenciation des éléments en permet son intégration au fonctionnement de l'ensemble.

•L'objet technique est intégrateur. "L'objet technique , bien loin de se situer tout entier dans le contexte d'une science particulière, est en fait au point de concours de multitudes de données et d'effets scientifiques provenant des domaines les plus variés, intégrant les savoirs en apparence les plus hétéroclites, et qui peuvent ne pas être intellectuellement coordonnés,alors qu'ils le sont pratiquement dans le fonctionnement de l'objet technique ."

Il n'y a pas de machine qui ne soit en même temps un être mécanique, chimique et informatique. "La machine est extérieurement faite pour obtenir un certain résultat; mais plus l'objet technique s'individualise, plus cette finalité externe s'efface au profit de la cohérence interne de fonctionnement; le fonctionnement est finalisé par rapport à lui même avant de l'être par rapport au monde extérieur."

Le laser est un objet “concret” qui ne peut fonctionner qu’avec un milieu associé, mais comme on le verra sa “concrétisation” par analogie avec un système naturel, offre encore des possibilités d’évolution.

1- HISTORIQUE DU LASER

•En 1955, un groupe de l'université de Columbia dirigé par TOWNES fit fonctionner un dispositif micro-ondes amplifiant le rayonnement par le processus de l'émission stimulée dans de l'ammoniac. L'appareil fut appelé M.A.S.E.R. Le problème qui se pose alors aux chercheurs est d'obtenir des atomes qui émettent ensemble la même onde monochromatique (de la même couleur) et en cohérence de phase. Jusqu'en 1960, plusieurs groupes étudièrent des systèmes susceptibles de servir de base pour réaliser un maser optique ou laser.

•T.H.MAINMAN en 1960 fut le précurseur du laser à rubis dopé d'ions de chrome. Il fallait domestiquer cette lumière émise par le laser en lui donnant un effet directionnel. Cet important perfectionnement s'est appuyé sur la découverte du système d'interférence de FABRY et PEROT qui date de la

fin du 18^{ème} siècle. Ces auteurs avaient imaginé canaliser la lumière entre deux lames parallèles formant miroirs. Les faces extrêmes du rubis sont argentées, afin d'obliger le faisceau de la lumière rouge excitatrice à travers le cristal à faire des aller-retours de nombreuses fois. Ce principe provoque une désexcitation des atomes et les fait retomber à leur état stable, ce qui donne l'émission lumineuse laser.

Mais le laser à cristal est relativement peu commode d'emploi car pour obtenir un bon rendement , il est nécessaire de l'utiliser à basse température. La voie des lasers à gaz a été alors suivie.

•Le premier laser à dioxyde de carbone a été fabriqué par C.N.K PATEL qui travaillait dans les laboratoires BELL⁴. Les gaz utilisés étaient un mélange d'hélium et de néon, puis le sodium, ou le potassium ont été essayés ensuite un mélange de chlore et d'hydrogène qui émet de l'infrarouge.

Ce type de laser a été industrialisé par les laboratoires COHERENT⁵ qui ont industrialisé en 1969 le premier laser de transformation des matériaux.

□ Les premiers lasers ont été utilisés ⁶:

- dans la mise au point de radars.
- pour des modifications thermiques de matières solides , végétales, animales.
- pour le guidage des missiles.
- des recherches ont été effectuées pour envoyer des messages sur d'autres planètes, pour la signalisation dans la navigation maritime.
- des recherches ont été réalisées pour employer cette onde, comme porteuse de messages en raison de l'encombrement que subissent les ondes radio-électriques.

⁴ D.C O' SHEA, W.C CALLEN, W.T. RHODES: introduction aux lasers. Ed. Mac Grow Hill p3.

⁵ COHERENT INC: lasers operation equipment application and design.

⁶ H.MARTY: du lanterniste au laser: récit historique de la science et des techniques de la lumière. ed école supérieure d'électricité.

□ Les dates caractéristiques de leur histoire sont les suivantes:

1960: fusion inertielle par laser.

1960: création du premier laser à rubis et du laser à gaz.

1963: le laser est utilisé en ophtalmologie.

1968: séparation isotopique par laser.

1969: le premier laser de transformation des matériaux est fabriqué industriellement.

1971: le laser est utilisé en chirurgie générale et en gynécologie.

1975: le laser est utilisé en gastrologie.

1976: le laser est utilisé en pneumologie.

1980: disque laser et holographie.

2 LES PROCESSUS DE LA “CONCRETISATION”

A) LES LOIS SCIENTIFIQUES:

La constitution de la machine laser fait appel à plusieurs principes scientifiques. On présentera d'abord les lois relatives au principe laser, puis celles relatives aux technologies qui lui sont associées et qui sont les conditions permissives de son fonctionnement.

a)LES PROCESSUS COMMUNS AUX LASERS ET LES DIFFERENCIATIONS:

Les lasers sont régis par des processus communs qui sont sous-tendus par les lois scientifiques concernant:

- le transport thermique .
- la formation des plasmas.
- l'hydrodynamique.
- les chocs.
- la physique atomique.
- l'interaction photon atome.
- le couplage rayonnement matière.

- Ces processus physiques interviennent à des degrés divers et souvent de façon combinée dans les différentes applications des lasers. La classification première des lasers est donc fonction de cette combinatoire au niveau des lois scientifiques.
- Le niveau des propriétés conduit à une deuxième différenciation pour les différentes applications. Chaque type d'applications des lasers privilégie soit la précision et la puissance, soit la directivité.
- Enfin une autre différenciation se produit au niveau de l'insertion de l'individu dans un objet ou un système d'objets techniques.

b) LES LOIS SCIENTIFIQUES RELATIVES AU FONCTIONNEMENT DU LASER DE TRANSFORMATION DES MATERIAUX.

Les trois lois suivantes sont essentielles:

- Le diagramme des niveaux d'énergie:
- Le principe de BOLTZMANN (distribution de la population des atomes en équilibre thermique).
- Les coefficients d'EINSTEIN d'émission induite.

1- le diagramme des niveaux d'énergie:

L'électron tourne autour du noyau en émettant une énergie rayonnante sous forme d'ondes magnétiques. Lorsque l'atome est au repos, l'état de son énergie est au minimum, les autres états sont des états excités. Chaque type d'atome connaît des niveaux d'énergie spécifiques

2- le principe de BOLTZMANN:

Quand une collection d'atomes similaires, sans interaction les uns aux autres, sont en équilibre à la température T, les populations de chaque niveau d'énergie sont reliées par la relation suivante valable pour un système à deux niveaux:

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$

n₂ est le niveau excité, n₁ est le niveau fondamental. E₁ est l'énergie correspondant au niveau n₁, E₂ au niveau n₂. T est la température et K est la constante de BOLTZMANN= 1.38. 10⁻²³ jk₁

3- Le mécanisme d'EINSTEIN d'émission induite:

Un photon induit un atome se trouvant au niveau d'énergie n_2 à redescendre au niveau n_1 en émettant un photon de même fréquence, de même direction, de même polarisation. Ce phénomène n'est pas naturel, il nécessite:

- une excitation des atomes qui permet l'inversion des populations: les atomes des niveaux supérieurs de l'atome sont en nombre plus élevés que ceux des milieux inférieurs.
- un système visant à mettre en phase les photons

c) -LES LOIS SCIENTIFIQUES RELATIVES AU TRANSPORT DU FAISCEAU LASER :

On distingue:

- La propagation à travers l'atmosphère.
- La propagation guidée (à travers une fibre optique).

1- la propagation à travers l'atmosphère:

En pratique un rayon laser traverse l'atmosphère sur une certaine distance, avant d'entrer en zone d'interaction avec le matériau. L'atmosphère est un milieu gazeux souvent porteur de particules. D'où deux types de phénomènes peuvent se produire:

- l'absorption du rayonnement est plus ou moins importante selon sa longueur d'onde.
 - la diffusion de la lumière par les particules matérielles qui empruntent de l'énergie à l'onde lumineuse, puis la remet sous forme de radiations.
- Ce type de phénomène dépend aussi de la longueur d'onde.

2- La propagation à travers une fibre optique:

La propagation guidée de lasers au moyen d'une fibre optique est limitée par le fait que les seules bandes passantes actuellement sont proches de l'ultra violet et de l'infra-rouge.

d) - LES LOIS REGISSANT L'INTERACTION LASER-MATERIAU:

Elles concernent:

- Les propriétés optiques liées à la fréquence.
- Les équations générales de transferts (thermiques).
- L'équation de la chaleur.

1- Les propriétés optiques liées à la fréquence:

On sait qu'un matériau peut:

- réfléchir un faisceau, être transparent (le faisceau le traverse): le faisceau ne transforme pas le matériau
- ou absorber le faisceau auquel cas le matériau subit une transformation. Il existe de nombreux degrés d'absorption

2- L'équation de transfert:

La loi décrivant les transferts de chaleur par conduction dans un milieu homogène isotrope est:

$$A = -bt \text{ grad } T$$

où A= densité de flux thermique.

et bT= conductivité thermique des matériaux.

3- L'équation générale du flux de chaleur par conduction dans un solide à trois dimensions peut s'écrire:

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \text{div} (k \text{ grad } T) + A(x, y, z, t)$$

→

B) L'ANALYSE SYSTEMIQUE DE L'OBJET

B₁ LA STRUCTURE DE L'OBJET

La machine laser est un ensemble qui comprend les six sous-systèmes suivants:

- 1 énergétique
- 2 optique
- 3 mécanique
- 4 commande informatique
- 5 chimique
- 6 de sécurité

Ces sous-ensembles sont eux mêmes constitués d'éléments en interaction.

1 LE SOUS-ENSEMBLE ENERGETIQUE

Le sous-ensemble énergétique est constitué:

-d'un milieu actif dont les composants sont un mécanisme de pompage et une cavité résonante.

-d'un milieu associé qui le régle: le système de refroidissement de la cavité résonante.

Le sous ensemble énergétique doit générer un faisceau plus ou moins puissant. La nature du milieu actif, le dispositif de pompage, la cavité résonante déterminent cette puissance.

Le dispositif de pompage émet un flux d'énergie absorbée par les atomes des bas niveaux d'énergie du milieu actif. Ce dispositif permet l'inversion de population: les niveaux d'énergie élevés sont plus peuplés que les niveaux faibles. Lorsque les atomes retournent à l'état fondamental, ils libèrent des grains de lumière.

Ce rayonnement est amplifié par la cavité résonante. La longueur de la cavité résonante doit être égale à un nombre entier de demi- longueurs d'ondes, pour que le rayonnement soit amplifié de manière que les photons inducteurs engendrent d'autres photons de même énergie, de même fréquence et phase.

2- LE SYSTEME OPTIQUE:

Le système optique se décompose en composants actifs et composants passifs.

-Les composants actifs:

La description de la lignée technique du laser de transformation des matériaux illustre une thèse importante de la genèse des innovations, elle aussi oubliée:

Selon MAUNOURY⁷ la forme la plus courante d'épanouissement de la lignée technique est "le polymorphisme par différenciation ou par variations à l'intérieur d'une gamme d'applications déterminées. Une grande diversité des objets permet alors une adaptation très fine et très précise avec rendement et économie de moyens maximums aux différents usages qui lui sont assignés".

⁷MAUNOURY Jean-Louis "La genèse des innovations" PUF, 1968.

Ainsi chaque fonction à réaliser, pour être précise et maîtrisée, nécessite un outil adéquat. L'outil laser, comme tout autre outil, revêt une forme spécifique: elle est donnée par le mode de répartition d'énergie du faisceau. Cette spécialisation de l'outil est concrétisée par l'optique de la cavité résonante. Cette structure peut être fixe ou modulable. Ce choix entre les deux formes d'optiques est déterminé par la place qu'on assigne au procédé au sein de la filière technique " *vue comme une suite d'ensembles techniques destinés à réaliser un produit désiré*":

- Si le procédé est isolé de la filière technique, la forme prise par le sous système optique de la machine laser sera modulable: La répartition d'énergie du faisceau sera transformée selon la fonction réalisée. Citons le cas de certaines machines laser YAG où le système optique est un télescope que l'on peut agrandir au sein de la cavité: les fonctions de découpe et de soudage sont possibles.

- Lorsque le procédé laser de transformation des matériaux prend une place déterminée au sein de la filière technique, l'outil sera spécialisé.

Chaque fonction est, de plus, liée à une densité de puissance (puissance au cm²) spécifique. Celle ci est donnée par la lentille qui se trouve sur le poste de travail. Elle focalise fortement le faisceau dans le cas d'une opération de découpe, moins intensément dans une opération de soudage.

-Les composants passifs:

Ils sont de deux sortes:

- Les capteurs optiques qui indiquent les positions de la trajectoire du faisceau au dispositif de commande.
- Les composants optiques, miroirs ou fibres optiques, qui transportent le faisceau de son lieu de production: la source au poste de travail.

Le système optique fait l'objet de recherches pour les lasers de très forte puissance, les revêtement des lentilles de focalisation du faisceau sont tous les jours améliorés en vue de l'allongement de leur durée de vie..

Le transport du faisceau peut être réalisé par fibres optiques dont il existe trois types:

- les fibres multi-mode à saut d'indice
- les fibres multi-mode à indice variable. plus performantes que les premières
- les fibres monomode

3- LE SYSTEME MECANIQUE:

Le système mécanique est composé d'éléments actifs et d'un élément passif: :

- une structure interne couplée à l'électronique: ce sont des chaînes de transmission mécanique du mouvement d'un moteur à la pièce.

- la structure mécanique externe: table ou robot laser et tête laser (Une forme complexe de pièce à réaliser dans un volume nécessite l'utilisation d'une structure mécanique de type robot laser).

- l'élément passif est la chaîne visant à corriger les erreurs de la chaîne de transmission.

Le système mécanique est bien maîtrisé aujourd'hui. Il a hérité du système de la machine outils rigidifié, car la machine laser travaille à des vitesses plus élevées que celle de la machine-outils

4-LE SYSTEME DE COMMANDE:

Le système de commande est composé uniquement de composants actifs.

La réalisation de chaque fonction nécessite un mode d'émission du laser en continu ou pulsé. Le sous système de commande va déterminer le mode d'émission du faisceau. De plus la réalisation des fonctions nécessite la maîtrise des vitesses de la trajectoire. Ces vitesses sont déterminées par le calculateur de la commande numérique.

Le système de commande, lui aussi, a hérité de celui de la machine outils à commande numérique. Mais le calculateur a été perfectionné puisqu'il est plus rapide.

5- LE SYSTEME CHIMIQUE:

Pour être maîtrisées totalement, les fonctions: découpe, perçage et soudage, nécessitent l'utilisation de gaz d'assistance:

- les gaz neutres ont une simple action mécanique.
- les gaz actifs exercent une action thermo-chimique sur le matériau.

Qu'ils soient actifs ou neutres, les gaz jouent aussi un rôle passif puisque véhiculés par des tuyaux et éjectés dans la tête laser, ils protègent les lentilles des remontées de vapeur engendrées par l'interaction laser-matériau.

Le système chimique est aujourd'hui totalement maîtrisé. Il est relativement simple .

6- LE SYSTEME DE SECURITE:

Le rôle joué par ce sous système n'est pas actif dans la transformation des matériaux, mais régulateur: lorsque le faisceau est mobile, un moindre objet réfléchissant peut le dévier de sa trajectoire initiale. Le faisceau est dangereux pour l'opérateur à cause des risques d'irradiation qu'il peut provoquer. Ainsi le poste de travail est-il protégé par une enceinte fermée, sans opérateur, qui réfléchit totalement le faisceau. La fermeture de l'enceinte est contrôlée par un système optique. Si l'enceinte reste ouverte, le faisceau laser ne se déclenche pas.

□ Les lasers, du point de vue structurel, constituent des êtres “concrets”, ou plus exactement en voie de concrétisation. En effet si le sous-système de commande assure la coordination des fonctions, chaque sous-système reste relativement autonomisé, et leur évolution s’opère à des rythmes différents. Dérivée de la mécanique, de la machine outil à commande numérique, la machine laser en a hérité l’état d’avancement. Ce composant maîtrisé est sans doute proche de la saturation technique, de même que le sous-système chimique. Il ne paraît pas en être de même pour les composants énergétiques et optiques qui présentent encore des marges d’évolution importantes. Avec six sous-systèmes dont chacun comprend plusieurs éléments, les lasers sont, malgré les apparences, des machines encore plus chargées de complication que de complexité. On distingue un système compliqué d’un système complexe à ce que dans le premier le nombre des relations fonctionnelles est inférieur au nombre des éléments (ou processeurs) alors que dans un système complexe le nombre des relations fonctionnelles est supérieur à celui des éléments⁸. La différenciation des lasers pousse à leur complication, la rationalité de l’objet, la recherche d’une plurifonctionnalité et la logique de la facilité d’utilisation tendent, elles, à rapprocher le nombre de fonctions élémentaires avec la complexité structurelle mesurée par le nombre de pièces, et donc à complexifier l’objet. L’analyse de la structure des lasers et de leurs générations technologiques illustre la "loi d'évolution" suivante énoncée par Y. Deforge³:

"dans le temps la complexité fonctionnelle tend à être proportionnelle à la complexité structurelle". Comme on ne peut réduire excessivement la complexité structurelle, on arrive à une sorte de compromis qui stabilise l'objet industriel sur une ligne médiane, ou droite d'ophélimité, c'est-à-dire à une valeur d'usage propre à chaque objet. La tendance lourde qui en découle est qu'il y aura tendance à remplacer la complication par la complexité et pour les objets industriels très complexes à ce que la complexité structurelle rejoigne la complexité fonctionnelle par la correspondance à chaque fonction élémentaire d'un organe élémentaire.

La figure 1 “Structure du laser” annexée schématise l’articulation des 6 sous-systèmes constitutifs.

B₂- LA VARIETE DES FORMES DE LA MACHINE LASER ET LES DIVERSES GENERATIONS TECHNOLOGIQUES: .

1- VARIETE DES FORMES:

Les formes se diversifient selon les sources laser et la forme de l’outil donnée par le système optique.

⁸LE MOIGNE Jean-Louis “La théorie du système général, théorie de la modélisation”, PUF, 2ème Edition 1984.

a- les sources laser:

Trois principales sources-laser ont vu le jour au niveau industriel: 1)le **laser CO2**, 2)le **YAG** et 3) le **laser excimère**.

1)Dans le premier cas, le milieu actif est composé d'un mélange gazeux comprenant du dioxyde de carbone, des traces d'azote et d'hélium. Le CO2 constitue la raie lumineuse. L'hélium augmente la désactivation des niveaux inférieurs et empêche, par là, l'accumulation des molécules dans des niveaux inférieurs. L'azote favorise l'excitation. Le complexe CO2-N2 constitue un système à quatre niveaux d'énergie. Ce système nécessite un pompage relativement peu puissant. Ce pompage est réalisé par tension entre électrodes ou par radio-fréquence.

2)Dans le second cas le milieu actif est un barreau de grenat d'alumine d'yttrium dopé au néodyme (terre rare). Ce matériau de synthèse comporte aussi quatre niveaux d'énergie. Le pompage est de type optique. Le laser YAG fait l'objet de recherches au niveau européen. Elles portent essentiellement sur la configuration des barreaux en plaques pouvant engendrer de fortes puissances

3)Le laser excimère a la particularité d'émettre sur une longueur d'onde absorbée par de nombreux matériaux.

b -La forme de l'outil donnée par le système optique:

Le laser comme tout autre outil, revêt une forme. L'optique de travail donne une forme à cet outil en jouant sur la répartition d'énergie dans le faisceau. Pour la découpe, la répartition d'énergie est gaussienne, pour le soudage, un faisceau multi-mode est adapté.

On notera l'existence d'une innovation secondaire visant à façonner le laser de découpe: il s'agit de la lame quart d'onde qui transforme une polarisation du faisceau rectiligne en une polarisation circulaire. Selon la physique de base, la lumière est la résultante d'un couplage d'ondes vibrantes d'un champ magnétique et d'un champ électrique. Si la direction de ces champs est déterminée, la polarisation est rectiligne, le faisceau est alors mal absorbé par le matériau dans une opération de découpe. D'où la recherche d'une direction aléatoire des champs. Celle ci est obtenue grâce à une lame quart d'onde.

2- GENERATIONS TECHNOLOGIQUES:

a) AU NIVEAU DES SOURCES

les sources CO2:

On distingue la source à flux scellé, la source laser CO2 à flux axial, la source à flux transverse, la source laser compact.

Les améliorations des sources vont dans le sens d'un accroissement de la puissance, d'une réduction de la taille de la source et d'une élévation de la durée de vie de celle ci.

La source à flux scellé:

La source laser est constitué d'un tube scellé. Au fur et à mesure que la source fonctionne, le CO₂ contenu dans le tube scellé se transforme en CO. Le problème de la durée de vie de la source se pose car le CO₂ s'épuise. Une faible amélioration consiste à introduire des traces d'hydrogène dans le tube scellé. L'hydrogène élément catalyseur accélère la réaction de transformation chimique du CO en CO₂.

Le rôle thermique joué par les cathodes introduites dans le tube scellé peut permettre une régénération du CO₂.

Ces améliorations sont toutefois légères: la régénération du CO₂ est très lente. A moyen terme, il y a épuisement de la réserve de CO₂ et donc la durée de vie de la source laser à flux scellé est courte.

De plus cette source est encombrante et coûteuse car l'augmentation de la puissance nécessite d'élever le volume de CO₂ donc la longueur du tube, de par le système de pompage spécifique. Le système de refroidissement est directement proportionnel à la longueur du tube.

Afin de pallier la faible durée de vie de la source laser à flux scellé, les constructeurs ont créé des lasers à flux axial. Le principe de régénération, la transformation du CO en CO₂, est amélioré. Toutefois le problème de l'encombrement reste patent.

La source laser CO₂ à flux axial:

Le tube contenant le milieu actif est ouvert. D'un côté s'échappe le CO poussé par la pression du CO₂ qui entre de l'autre côté du tube.

Une décharge électrique auto-entretenu améliore la régénération.

Le problème de la faible durée de vie semble résolu. Toutefois l'encombrement reste important. Le refroidissement (comme les lasers à flux scellé) est fonction de la longueur de la cavité résonante. Cette dernière a été, toutefois, repliée en zig zag, mais devient alors fragile.

Dans le régime à flux axial rapide, la puissance de la source laser peut être augmentée: la pression du CO₂N₂ introduite dans le tube est augmentée. D'où l'accélération de la régénération. L'augmentation de la pression est réalisée par une pompe de type roots qui accélère le flux. Un échangeur thermique refroidit le CO₂.

La source laser à flux axial rapide, connaît une longue durée de vie, mais reste encombrante, de par son principe de refroidissement qui est fonction de la longueur de la cavité résonante.

La source à flux transverse optimise les critères de taille de la source, de la puissance, et de la durée de vie.

La source à flux transverse :

Une puissance élevée d'une source laser de taille relativement compacte peut être obtenue grâce à une technologie où la direction du flux gazeux est perpendiculaire à la décharge et où l'axe optique est orthogonal aux deux précédentes. L'écoulement gazeux transverse est très rapide. Il évacue efficacement la chaleur ainsi que les produits de dissociation engendrés par la décharge. Le temps de transit des molécules est de l'ordre de la milli-seconde. Le mélange gazeux est ensuite recyclé, après refroidissement, dans un échangeur thermique. Un dispositif de régénération du CO₂ couplé à une arrivée de mélange frais sous faible débit permet de maintenir la concentration nécessaire de CO₂.

Avec cette technique de flux transverse, des puissances de dix à vingt kilowatts peuvent être obtenues par des sources laser utilisant comme milieu actif à peine quelques dizaines de litres de gaz. Ce type de source connaît néanmoins un encombrement.

La source laser compact:

Le tube résonateur a désormais la forme d'un triangle. La pompe habituelle est remplacée par un compresseur centrifuge (turbine) : sa fonction est de faire circuler les gaz dans un résonateur et en assurer le recyclage.

Les cathodes nettoyées se changent comme des bougies de voiture.

Les sources YAG

la source laser YAG de première génération:

L'augmentation de la puissance est limitée pour les sources YAG par la dimension du barreau. Les barreaux sont cylindriques. Ils sont obtenus par cristallisation et sont ensuite usinés. De par la difficulté rencontrée pour leur usinage, ces barreaux ne sont fabriqués qu'en petite dimension, dix à quinze centimètres.

La source de seconde génération:

Des progrès notables ont été réalisés dans le domaine de l'usinage des barreaux cassables

La montée en puissance du laser est désormais possible grâce à la dimension des nouveaux barreaux qui prennent une forme de plaque appelée "slab laser".

b) AU NIVEAU DU SOUS-SYSTEME OPTIQUE

On rappellera qu'une fois généré, le faisceau est introduit dans un système optique. Ce sous système transporte le faisceau et lui donne une forme. Comme la source émet rarement au voisinage de la pièce à transformer, il est nécessaire de transporter le faisceau de la source au poste de travail. Ce transport est réalisé, soit par composants optiques, soit par fibre optique pour les lasers YAG.

Les composants optiques:

Le nombre de miroirs et de prismes est variable selon les machines laser. Pour atténuer l'endommagement précoce des éléments optiques, on commence par élargir le faisceau à l'aide d'un télescope, de telle sorte que la densité de puissance (puissance au cm²) soit faible jusqu'à la buse. Le faisceau est ensuite focalisé par une lentille. Les composants optiques ont été réalisés successivement en sélénium de zinc (ces lentilles ont une faible durée de vie), puis en germanium, en silicium enfin en sélénium de gallium (ces lentilles sont chères, mais ont l'avantage d'être durables).

La fibre optique:

La fibre optique est utilisée pour le transport du faisceau laser YAG. Seul ce dernier est absorbé par les fibres optiques existantes. L'intérêt de la fibre optique réside dans sa légèreté, sa très faible dimension, sa capacité à être flexible. Elle peut être utilisée sur un robot.

c) AU NIVEAU DU SOUS-SYSTEME CHIMIQUE

La transformation des matériaux nécessite l'utilisation de gaz d'assistance. Ces gaz visent à protéger les optiques de travail de remontées de vapeur. Ces gaz jouent une action neutre ou active sur le matériau:

-Les gaz neutres (hélium, ou argon) ont une simple action mécanique.

-Les gaz actifs exercent une action thermo-chimique sur le matériau travaillé. L'oxydation produite par le gaz favorise l'absorption du rayonnement et l'apport d'énergie produite par la réaction d'oxydation s'ajoute à ce processus.

d) AU NIVEAU DU SOUS-SYSTEME MECANIQUE

Les premières machines laser avaient la structure mécanique de la machine outils, puis des modifications ont été apportées:

Le sous système mécanique externe (tête laser) a été transformé, pour répondre au besoin

d'usinage de volumes, en robot laser.

Le sous système interne est désormais composé:

- d'une chaîne cinématique de transmission mécanique du mouvement du moteur à la pièce

qui fait le mouvement.

- d'une chaîne cinématique de réduction ou d'augmentation entre le moteur et la pièce qui
transmission mécanique.

visse à corriger les erreurs de la chaîne de

e) AU NIVEAU DU SOUS-SYSTEME COMMANDE

La première génération est le système de copiage:

Sur un poste de travail spécifique, un suiveur optique est fixé sur une reproduction de modèle qui se déplace. Les données sont stockées dans une mémoire. Cette mémoire servira à piloter la trajectoire de la machine laser.

La deuxième génération: la commande point par point:

L'opérateur introduit dans la mémoire de la commande numérique de la machine, les données de la trajectoire sous une forme discrète (point par point).

La troisième génération technologique:

L'opérateur introduit les données sous forme de fonctions. Ce système est délicat à piloter, car la trajectoire du faisceau est continue. Il faut alors contrôler les vitesses de la trajectoire.

B₃) COMPLEXITE STRUCTURELLE ET FONCTIONNELLE

On rappellera que la "complexité fonctionnelle" et la "complexité structurelle"³ peuvent s'exprimer simplement pour la première par "C'est fait pour..." et la seconde par "C'est fait de..." La troisième forme de la complexité est la "complexité de fabrication"⁹ qui peut s'exprimer par "C'est fait comment..." La complexité globale est dans cette conception le produit de ces trois complexités partielles².

La complexité structurelle a été examinée précédemment. La complexité fonctionnelle s'accroît avec l'augmentation des fonctions d'usage demandées à la machine et qui sont résumées dans un tableau synoptique final. La mesure de la complexité fonctionnelle, telle qu'elle est expliquée dans le chapitre "la problématique", bien que possible n'a pu être faite en l'absence d'expert technologue du laser. Il en est de même de la mesure de la complexité technologique de fabrication, pour laquelle une méthode est disponible pour l'industrie electro-mécanique⁹.

On s'est donc borné à présenter une première hypothèse de travail pour la complexité fonctionnelle du **laser de transformation des matériaux**, et à en voir le prolongement sur les contenus éducatifs qu'impliquent les niveaux technologiques.

Comme pour la complexité structurelle technologique, la complexité fonctionnelle ne peut s'apprécier que d'un point de vue diachronique. C'est à travers un processus d'extension des applications, et à travers la formation, l'accumulation collective, la formalisation et la diffusion des connaissances, la R&D, que les verrous technologiques sont levés et que la complexité fonctionnelle s'accroît. On pourrait prendre l'ordre des applications, qui est un ordre chronologique, comme une grille de classement des complexités fonctionnelles.

- La forme réalisée sur le matériau (forme donnée en découpe, soudage) pourrait être considérée comme une complexité de niveau 1. On observera qu'elle requiert une formation en programmation informatique de l'opérateur. Toutefois cette programmation n'est pas différente de celle utilisée sur d'autres procédés informatisés.

- La fonction réalisée sur un matériau traditionnel (découpe, perçage, soudage, traitement de surface) pourrait être considérée comme une complexité de niveau 2. Elle nécessite l'utilisation de nombreuses tables qui sont diffusées lors des cycles de cours proposés dans les organismes de formation. Elles indiquent, pour chaque type de fonction à réaliser sur un matériau, quelle puissance et quelle vitesse sont nécessaires compte tenu d'une qualité recherchée.

- La composition du matériau encore peu maîtrisée (cas des nouveaux matériaux) se situerait au niveau 3 de la complexité fonctionnelle. La connaissance du comportement des nouveaux matériaux nécessite une accumulation d'expérience interne à l'entreprise.

⁹VIDOSSICH Franco "Système d'Analyse de la Complexité Technologique (ACT)", ONUDI, Vienne Autriche, 1987.

•La transformation d'un éventail de matériaux nouveaux dans le but de réaliser des petites séries se situerait au niveau 4 de la complexité. Elle intégrerait une complexité de niveau 3 relative à la transformation d'un nouveau matériau et une complexité de niveau 1 concernant le changement de matériau. Une complexité de niveau 5 correspondrait à une combinaison de diverses formes réalisées sur différents matériaux.

Il va de soi que cette esquisse est destinée plus à suggérer un travail de recherche qui reste à faire pour comprendre la complexité technologique des lasers, et, à travers celle-ci penser aux voies de leurs développements futurs. La correspondance entre les contenus technologiques à maîtriser et les contenus éducatifs nécessaires, s'en trouverait favorisée et permettrait, dans ce domaine comme dans d'autres, de dessiner une pédagogie éducative basée sur l'apprentissage de la complexité.

On a récapitulé ci-dessous des informations sur les contenus éducatifs dispensés en France pour les métiers du laser.

Note sur les contenus éducatifs

Né dans les secteurs de pointe, le savoir faire du "lasériste est resté, longtemps, jalousement gardé par ces secteurs, puis il a été formalisé en France, par les centres d'essais et de recherches et de transfert de technologie. De nombreux essais sont relatés dans les revues spécialisées telles " soudage et techniques connexes", au cours de nombreux colloques, ou de cycles de cours proposés par ces centres.

Les savoir-faire existent dans de nombreuses entreprises. Il sont en général formalisés dans les grandes entreprises où il y a une forte imbrication entre le domaine de la recherche et celui de la fabrication. Les grandes entreprises participent activement aux conférences et diffusent une partie de leurs essais sur lasers. Les PMI ont aussi des compétences en matière de lasers (compétences informelles) qui apparaissent à travers les produits qu'elles réalisent et qu'elles exposent lors des conférences (ceci dans le but de trouver des donneurs d'ordre).

Les profils de qualifications:

Un groupe de travail du club laser (regroupement sous la houlette de la Direction Générale de l'Armement qui vise à promouvoir le laser industriel) a fait une réflexion sur le sujet, en partant de la reconnaissance de la formation initiale et la formation continue.

Au sein de la formation initiale deux niveaux de formation sont considérés comme nécessaires :

-la formation de techniciens supérieurs (formation à partir de cours et apprentissage à partir des savoir-faire formalisés)

-la formation de thésards d'ingénieurs formés au laser par la recherche. Cette dernière formation est plus large, puisque les chercheurs peuvent proposer des périphériques visant à améliorer le fonctionnement de la machine laser ou des modifications de celle-ci, étudier la création de nouveaux produits composés de sous systèmes plus intégrés.

La formation continue est proposée aux personnels de bureaux d'études, de fabrication, de contrôle qualité. Comme pour la formation en BTS, il s'agit de diffuser des connaissances formalisées. Souvent ces connaissances sont transmises à partir de comparaisons avec d'autres procédés plus conventionnels.

C) LES PRINCIPALES APPLICATIONS DES LASERS

Le MASER, puis le LASER, sont des inventions dont, à l'origine, on ne soupçonnait pas les champs d'application possibles. Initialement ce sont des "innovations push", c'est-à-dire des innovations poussées par la technologie. Les "innovations pull" sont celles tirées par le marché. Leur "valence", par analogie avec la chimie, leur possibilité d'association avec d'autres technologie et êtres techniques, s'est avérée très élevée. Aujourd'hui, comme toutes les innovations majeures elles sont un mixte des mouvements "push" et "pull". Le foisonnement de leurs applications peut masquer la logique scientifique et

technique de l'association de leurs propriétés¹⁰.

¹⁰“Une propriété est une qualité, une fonction particulière qui distingue des autres choses. Fonctions, principes et propriétés sont des catégories en connexion, et souvent le même mot les désignent. On parle de principes ou de propriétés mécaniques, chimiques, électriques, magnétiques....(généralement, en français avec le suffixe *ique*); de fonctions de nutrition et de propriétés nutritives (le suffixe *ion* marquant davantage la fonction); de propriétés qui caractérisent un état (avec le suffixe *té*): élasticité, porosité, solidité....les suffixes *ive*, *aire*, *ance*, *ence*expriment aussi, selon les cas, propriétés, principes ou fonctions. L'incertitude du langage reflète les rapports étroits des notions. Principes et propriétés peuvent se définir mutuellement: les découvertes des principes et des propriétés peuvent être concomitantes, l'une étant la condition de l'autre. Celles des propriétés de certains matériaux et du principe de la supraconductivité vont de pair, à son tour la découverte de nouveaux supraconducteurs questionne la théorie.

Il y a des propriétés "naturelles", qui sont des données pour l'activité humaine dès lors qu'elles sont identifiées et peuvent être utilisées. Il y a les propriétés "créées", fruit du processus d'artificialisation qui caractérise la constitution de la technosphère. Si la table des éléments chimiques a un nombre fini, ni les éléments techniques ni les propriétés dont ils sont porteurs, ne constituent un univers clos. La rencontre de deux propriétés, l'électrostatique et la photoconductivité, par exemple, peut engendrer une propriété nouvelle: la xérogaphie. Peut être y a-t-il ici une analogie avec la transformation de l'information en néguentropie? Par ailleurs, la plasticité des nouvelles technologies permet désormais un retournement de situation: la faculté de faire des matériaux "à la commande", dotés de propriétés pré-déterminées.

Pratiquement il serait utile de disposer de banques de données sur les propriétés et de structurer l'information afin qu'elle puisse servir de matrices de découverte, ce qui implique, là aussi l'établissement de typologies.” Pierre F. GONOD, “la technologie générale” doc. cité réf. 2.

L'Encyclopédie Grolier ¹¹ apporte un éclairage intéressant à ce sujet.

Les applications du laser sont classées en fonction des propriétés de base de la lumière et de la lumière laser. Celles-ci sont les suivantes:

① La vitesse de la lumière est la plus grande vitesse possible; ② La lumière dans un espace vide voyage en ligne droite; ③ La lumière peut véhiculer de l'information; ④ La lumière se diffuse moins quand elle voyage et peut être focalisée dans des points plus petits que les ondes de radios; ⑤ Les rayons de lumière peuvent être aisément manipulés par des miroirs et être ouverts et coupés rapidement; ⑥ La lumière laser est essentiellement de simple fréquence; ⑦ Les lasers pulsés offrent la possibilité d'un pouvoir multiplicateur en relachant l'énergie en très brèves impulsions; ⑧ Les lasers peuvent appliquer l'énergie à de très petites surfaces.

Par exemples le laser contrôlant la fusion thermonucléaire (laser-induced controlled thermonuclear fusion, neodymium-glass and pulsed carbon-dioxid lasers) associe les propriétés ④ et ⑦. Dans le domaine des communications les liaisons utilisant des impulsions codées de lumière de lasers voyageant dans des fibres de verre sont aujourd'hui utilisées, cette technologie (diode and neodymium-yag lasers) associe les propriétés ③ ④ et ⑤. Pour le traitement à chaud des surfaces métalliques des rayons lasers (carbon dioxide, neodymium, and argon-ion lasers) sont utilisés pour fondre ou souder une paire de composants en introduisant la chaleur suffisante sans les distordre par le recours aux propriétés ④ ⑤ et ⑧. Pour la surveillance et la mesure des distances un rayon laser peut être utilisé comme une ligne droite. Les distances peuvent être mesurées par le temps que met une impulsion de lumière voyageant du laser (helium-neon and ruby lasers) à un miroir et retournant à un détecteur près du laser, technologie employée aussi bien pour les mesures terrestres que lunaires. Dans ce cas les propriétés ② et ④ sont mises en usage. Les sources lasers (helium-neon and argon-ion lasers) permettent la reproduction d'images en trois dimensions. La technique résultante de l'holographie mobilise la propriété ⑥ qui est maintenant utilisée pour des vues holographiques d'objets microscopiques faites en utilisant des lasers avancés X-ray. Cette propriété est également utilisée pour de multiples applications telles que la séparation des isotopes et la spectrographie. Dans le domaine des applications militaires les lasers (neodymium and carbon-dioxide) sont utilisés pour chercher et désigner la cible, ils ont été développés à la fois comme armes antisatellite et missile balistique de défense aux USA dans le cadre de la "Strategic Defense Initiative". Ils requièrent l'association des propriétés ① ② ④ et ⑧. Enfin des petits rayons laser sont utilisés en imprimerie et la reproduction d'images. Des disques gravés lus par lasers (laser-etched discs) sont d'usage courant dans les technologies audio-visuelles des disques compacts et des video- disques. Elles correspondent à la convergence des propriétés ③ ⑤ et ⑧.

D'une façon moins analytique on a récapitulé ci-dessous les principales applications des lasers.

LES PRINCIPALES APPLICATIONS DES LASERS (par ordre alphabétique)

¹¹"The Multimedia Encyclopedia" commercialisée sous forme de disque compact CD-ROM (version 4.0) édité par "the software toolworks®".

- Ablation thermique et photo ablation.
- Accélération des particules
- Armes anti-satellites.
- Armes anti-missiles.
- Contrôle de réactions chimiques.
- Désintégration des calculs de reins ou de vésicules.
- Désintégration de tâches de vin sur la peau
- Dentisterie
- Détection à distance d'espèces chimiques.
- Détection de défauts sur pièces.
- Eclairage des cellules pour la mesure dans le bio-médical.
- Eclairage de scènes de spectacles.
- Etudes en physique atomique et nucléaire.
- Fusion inertielle
- Fusion nucléaire
- Gravure par laser
- Holographie
- Imagerie X
- Imprimante laser.
- Lecture laser de disque compact.
- Lecture de video-disques.
- Lecture du code barre sur les produits.
- Marquage par laser
- Médical
- Mesure de superficie.
- Mesure de concentrations chimiques et polluants.
- Nettoyage de surface
- Photochimie
- Spectroscopie.
- Séparation isotopique

- Simulations des effets d'une guerre nucléaire
- Télémétrie
- Traitements des matériaux

On a récapitulé ensuite les principaux lasers et, en regard, leurs champs d'application.

LES PRINCIPAUX LASERS ET LEURS APPLICATIONS:

- Lasers à verre dopé au néodyme: *télémétrie; fusion inertielle.*
- Lasers CO2: *transformation des matériaux; utilisation médicale (chirurgie); séparation isotopique; télémétrie; mesure de la pollution.*
- Lasers à diode: *lecture optique de code barre; lecteur de disque.*
- Lasers à vapeur d'or: *traitement des cancers.*
- Lasers YAG: *transformation des matériaux, marquage, perçage; utilisation médicale; télémétrie.*
- Lasers excimères: *transformation des matériaux; utilisation médicale.*
- Lasers à rubis: *dentisterie; utilisation médicale; télémétrie; marquage.*
- Lasers à vapeur de cuivre: *séparation isotopique.*
- Lasers à colorants: *séparation isotopique; photochimie; spectroscopie.*
- Lasers à alexandrite.
- Lasers à krypton.
- Lasers à titanium- saphir.
- Lasers à hélium cadmium.
- Lasers à hélium-néon: *laser d'alignement; lecteur de code barre.*
- Lasers semi- conducteur: *télécommunications.*
- Lasers à diode: *holographie; spectroscopie; lecteur de code barre.*
- Lasers à argon: *holographie; vidéo-disque; marquage; dermatologie;*
- Lasers à HN; *holographie; video-disque*

Enfin on a identifié les principaux individus techniques dans les quels sont intégrés les lasers.

LES PRINCIPAUX INDIVIDUS DANS LESQUELS SONT INTEGRES LES LASERS.

**Le gyroscope.
Le spectromètre
L'holographe
Le video-disque.
La machine laser (voir ci dessus).
Le robot laser.
les missiles laser
Le séparateur isotopique.
Le télémètre.**

La figure 2 “l'arbre des lasers” annexée récapitule leur classification.

3 LE MARCHE DU LASER ET DE LA MACHINE LASER EN FRANCE

L'offre de sources-laser est, comme au niveau mondial, très concentrée, en France. Elle est dominée par les géants allemands et japonais.

L'offre de machines-laser revêt en France un caractère très éclaté. Chaque constructeur cherche à spécialiser son équipement afin de l'adapter aux besoins de branches d'activités spécifiques.

Le parc de machines laser en France est relativement faible comparé à celui du marché mondial. Toutefois ce parc a connu une évolution rapide aux cours de ces dernières années. On étudiera successivement l'offre de source en France, l'offre de machines laser, la demande à partir du parc de machines laser et de son évolution et l'étude des stratégies des acteurs du monde du laser.

A- L'OFFRE DE SOURCES LASER:

Sur le marché français, la pénétration étrangère de constructeurs de sources est importante (dans le tableau ci-dessous les noms de ces derniers sont en italique). Nous étudierons successivement l'offre française et l'offre étrangère.

constructeurs:	type de sources
Industrial Quantel Laser (FR) (filiale d'Unilaser)	CO2 , YAG.
<i>Coherent (RFA)</i>	<i>CO2 750 w 1.2-2.5 kw (absorbé par Siemens)</i>
<i>Spectra-physics (USA)</i>	<i>CO2 600w-1.5 kw. 5kw. (absorbé par Siemens)</i>
<i>Lumonics (canada)</i>	<i>YAG 400w pulsé.(absorbé par les japonais)</i>
Micro-contrôle (FR)	YAG 70 w continu.
Laser application (FR)	YAG 20w-100w continu, 20- 40 w pulsé.
BM Industries (FR)	Y AG 100- 300 w pulsé.
Adron (filiale de Lectra-système) (FR)	CO2
<i>Lasag (suisse)</i>	<i>YAG de faible puissance.</i>

<i>Trumpf (RFA)</i>	<i>CO2 de forte puissance. (absorbé par Siemens)</i>
<i>Messer greissheim (RFA)</i>	<i>CO2 de forte puissance.</i>
<i>Rofin-sinar</i>	<i>CO2 10, 15, 18 kw. YAG 10 kw</i>

•L'offre étrangère:

Sur le marché français du laser CO2 de très forte puissance (> 5 kw), les géants (d'origine américaine), rachetés par des groupes allemands sont dominants.

La première société au niveau mondial Lumonics (anciennement canadienne), rachetée par les Japonais, détient environ 60% du marché française en 1987.

Lasag, une société suisse, est très présente sur le marché français sur des créneaux de très faibles puissances.

•L'offre française:

L'offre française de source CO2 présente une structure quasi - monopolistique: Si une PME comme Adron, filiale de Lectra-système, détient une petite part du marché français, la filiale Industrial Quantel Laser de la société holding Unilaser (qui regroupe les participations de l'Aérospatiale) en détient ce monopole.

Les producteurs de sources YAG sont nombreux: on peut citer Industrial Quantel laser pour les sources de fortes puissance et les PME comme Micro-Contrôle, Laser Cheval, Laser Application sur des créneaux de faible puissance.

B - LES CONSTRUCTEURS DE MACHINES LASER PRESENTS SUR LE MARCHE FRANCAIS ET LEURS SPECIALISATIONS:

De nombreux constructeurs sont présents sur le marché français de la machine-laser. En voici les principaux, et les branches d'activités sur lesquelles ils se spécialisent.

1- Les constructeurs français présents sur le marché de la machine laser sont nombreux:

On peut distinguer parmi ces constructeurs:

- des fabricants traditionnels de machines-outil. C'est le cas de Limoges Précision spécialisée dans les ensembles mécaniques.

- des industries auparavant utilisatrices de biens d'équipement. Certaines industries ayant utilisé auparavant des machines-laser, se sont mises à en fabriquer pour leurs propres besoins, puis à les commercialiser au sein de la branche. C'est le cas de Laser Cheval : une société d'horlogerie qui a décidé de produire des sources YAG et des lasers d'usinage, d'abord pour percer ses rubis, puis pour la vente à l'industrie horlogère et à la petite mécanique de précision. C'est aussi le cas de Renault Automation qui est une filiale au sein du groupe Renault et qui fabrique des machines laser avec portiques et des robots laser.

2-La spécialisation des constructeurs français de machines laser sur des segments de la demande:

Afin d'accroître ses ventes, chaque constructeur de machine-laser spécialise sa production en vue de satisfaire les besoins de quelques branches d'activités bien déterminées:

- Les constructeurs destinant leurs équipements au département mécanique des branches de l'automobile et de l'armement sont par exemple: la société "laser-système" contrôlée aujourd'hui totalement par Renault Automation qui développe des portiques trois axes- deux rotations, ainsi que des robots laser. Cet équipement est destiné au travail des métaux en volume.

- Une PMI française, Lectra-Système, spécialisée à l'origine dans l'équipement de la branche de l'habillement, se tourne vers le marché de la sellerie et de la petite tôlerie.

- Des constructeurs spécialisent leur équipements pour la micro-électronique, l'horlogerie, la bijouterie. C'est le cas de la société Laser Application qui développe des centres d'usinage intégrant de nouvelles sources YAG de faible puissance et de Laser Cheval qui réalise des centres d'usinage avec sources YAG et fibres optiques.

C- LE PARC LASER EN FRANCE ET SON EVOLUTION:

Le parc français du laser de transformation des matériaux comprend en 1991: 528 installations laser. Ce chiffre global englobe les lasers YAG et les CO2. En vue d'une analyse plus fine on peut découper le parc français de plusieurs manières:

- selon les installations CO2 et YAG, pour constater que ces dernières sont moins importantes.
- selon le type d'activité (recherche et développement, industrie et formation).
- selon les fonctions réalisées (découpe, soudage, perçage et traitement de surface).

1- Les parcs laser CO2 et YAG:

- Le parc laser CO2 représente 382 installations en 1991, soit environ 72% du parc total.
- Le parc du laser YAG :146 installations (soit 28% du parc total).

On peut expliquer la prédominance du nombre d'installations laser CO2 par le fait que cette technologie est plus ancienne que le laser YAG. On constatera toutefois que le parc laser YAG est plus important dans le secteur de la recherche puisqu'il s'élève à 34 installations (29 pour le CO2).

2- Selon le type d'activité:

- Le secteur de la recherche utilise: 63 installations laser.
- celui de l'industrie :448 installations
- enfin la formation :17 installations.

La faiblesse du parc laser consacré à la formation n'est pas significative car en France et dans le domaine du laser il y a des interconnexions étroites entre la recherche et la formation. Une partie du parc consacré à la formation et mais aussi à la recherche est comptabilisé dans le parc recherche et développement.

3 - La répartition du parc par fonctions:

- 240 machines laser sont utilisées à la découpe;

- 65 au soudage.
- 22 au perçage.
- 9 au traitement de surface.

Dans ces chiffres ne sont pas comptabilisés les machines polyvalentes qui réalisent successivement plusieurs fonctions. Elles sont au nombre de 192(528-336 machines du parc).

On observera toutefois qu'en FRANCE la première application de la machine laser a été la découpe, (approximativement à partir des années 1978), suivie du soudage(approximativement à partir des années 1983), enfin du traitement de surface (approximativement dans les années 1990 dans son application industrielle).

4- Evolution du parc:

Le parc des lasers CO2 a connu une croissance entre l'année 91 et 92 de 25,65%. Celui des lasers YAG de 30,13% pour la même période.

D- LES STRATEGIES DES CONSTRUCTEURS, DES UTILISATEURS DE MACHINE-LASER, ET PLUS GENERALEMENT CELLE DES ACTEURS DU MONDE DU LASER.

1- Stratégie des constructeurs de laser:

La logique des grands constructeurs de laser s'apparente à celle des firmes japonaises qui se développent sur l'image du bonsaï: des principes scientifiques sont articulés et donnent naissance à des technologies clés telles le laser, l'optoélectronique, l'informatique, l'électronique. Ces technologies génèrent des couples produits-marchés tels: le laser d'usinage pour l'industrie, de télémétrie pour le bâtiment par exemple, l'imagerie pour le médical.

C'est le cas de l'entreprise Quantel qui fabrique des systèmes d'instrumentation à base laser et qui délègue à sa filiale Industrial Quantel Laser la fabrication de lasers industriels.

2- Stratégies des utilisateurs de machines laser:

Globalement trois types de stratégies sont suivies chez les utilisateurs de machines laser:

a) lorsque la machine laser est insérée dans une structure de production rigide, l'entreprise cherche à accroître sa productivité totale. En effet la machine laser travaille:

- à des vitesses plus élevées que les technologies qu'elles remplacent
- avec plus de précision et réalise une économie de matière.
- des formes complexes et donc simplifie le travail de conception des pièces.

b) lorsque la machine laser n'est pas physiquement intégrée dans un processus de production, l'entreprise privilégie la création technologique: elle travaille des matériaux nouveaux, impossibles à transformer avec d'autres technologies, et réalise de nouvelles pièces.

c) lorsque la machine laser est intégrée dans une structure de production flexible, l'entreprise cherche à accroître sa productivité totale et à préserver un domaine de création technologique.

3- Stratégies des acteurs du monde du laser:

HAMILTON présente, dans son modèle d'évolution technologique¹², trois phases successives au processus d'innovation:

- Le processus d'innovation est scientifique: les acteurs portent leurs efforts sur la recherche scientifique.
- Le processus est technologique: les efforts des acteurs portent sur la standardisation des éléments constitutifs de la technologie.
- Le processus est commercial: les acteurs portent leurs efforts sur la recherche d'applications nouvelles.

Concernant le laser, et grâce à un regroupement comme le club laser de puissance, ces trois phases sont simultanées. En effet le club laser de puissance, visant à promouvoir le laser de forte puissance en France, est un lieu de coordination entre les différents partenaires. Grâce à la communication entre les acteurs, une réflexion globale visant à rationaliser les efforts est mise en oeuvre. Chacun connaissant les besoins de l'autre va chercher à se positionner. Les acteurs cherchent la complémentarité (ex :les centres techniques des différentes régions vont coordonner les formations en matière de contenu et de "timing"). Des acteurs dans le domaine de la recherche, de la technologie et du commercial vont travailler de façon simultanée. Fortement structurés autour du club laser de puissance, en France les acteurs du laser s'organisent progressivement.

12 W.F HAMILTON: "the dynamics of technology and strategy". Communication à EURO TIMS 28. Université PARIS-DAUPHINE.1988.

Il va de soi que cet aperçu du marché du laser demanderait à être complété par une analyse mondiale et celle de la situation des principaux pays producteurs.

Il en va de même pour la dimension prospective, absente ici, et qui nécessiterait à la fois une anticipation des applications envisageables, des développements technologiques au stade du laboratoire, et des percées technologiques imaginables. L'approfondissement de l'analyse précédente de la structure du laser faciliterait au demeurant la réflexion prospective par l'examen de la courbe de vie des sous-systèmes et de leurs constituants, et par l'évaluation des possibilités de concrétisation plus achevée de l'objet. La considération simultanée des propriétés et des fonctions pourrait donner lieu à l'établissement de "matrices de découvertes" dont la fertilité a été démontrée. On pourrait également prendre comme point de départ une nouvelle fonction à créer, par analogie avec le processus intellectuel de création de nouveaux matériaux "à la commande", et en déduire les propriétés à mobiliser, et ensuite les solutions techniques à mettre en œuvre.

EXEMPLE DE "NAVIGATION" DANS UNE ENCYCLOPEDIE ELECTRONIQUE

L'analyse précédente aboutit à la constitution d'une information structurée. Cette information est un intrant de l'Encyclopédie Systémique de la Technologie (EST). Bien évidemment elle est ici loin d'être exhaustive, le but de l'exercice étant de suggérer les voies et moyens de la faisabilité de l'EST et non de constituer celle-ci. Mais on notera que partant d'un corps organisé d'informations il serait toujours possible d'accroître leur volume sans perdre pour autant la structure de l'ensemble.

Cette analyse, pour aussi incomplète qu'elle soit sans doute pour un expert, dégage cependant 144 mots clés qui pourraient constituer des "entrées" dans une Encyclopédie électronique. On observera

que les mots clés correspondants permettant une navigation au sein de l'Encyclopédie Grolier ne sont que 21 (voir annexe 1). La capacité de navigation à ce niveau d'analyse est grosso modo 7 fois plus élevée que dans l'encyclopédie générale américaine.

Dans la liste ci-dessous des mots clés les chiffres entre parenthèses se réfèrent à des ensembles d'appartenance.

LISTE DES MOTS CLES:

légende

(1) Applications.

- (2) domaine technique.
- (3) domaine scientifique.
- (4) individu technique.
- (5) sous-système technique.
- (6) économie
- (7) autres.

- ablation thermique et photo-ablation (1).
- absorption du rayonnement(2).
- accélération des particules (3).
- alignement (2).
- arme laser (1).
- applications énergétiques (1).
- applications au transport de l'information (1).
- arc électrique (4).
- calculateur à commande numérique (4).
- caractérisation du faisceau laser (2).
- cathodes (4).
- cavité résonnante(2).
- centre d'usinage intégrant un laser (5).
- chimie (3).
- chirurgie et micro-chirurgie (1).
- cinématique (3).
- club laser(6).
- coefficient d'Einstein (3).
- commandes point par point (4).
- complexité fonctionnelle (6).
- complexité structurelle (6).
- composants optiques (4).

- couplage rayonnement-matière (2)
- découpe (1).
- densité de puissance (2).
- détection à distance d'espèces chimiques (1).
- diagramme de niveau d'énergie (1).
- distributeurs de faisceau multi-postes (5).
- durcissement superficiel par laser (1).
- électro-érosion (4).
- électrons (4).
- énergie photonique (3).
- équations de chaleur (3).
- équations de transfert (3).
- faisceau d'électrons (4).
- faisceau d'ions (4).
- fibre optique (4).
- fréquence (2).
- fusion inertielle (1).
- fusion thermo-nucléaire (1).
- gaz d'assistance (4).
- gaz lasants (4).
- gaz de protection (4).
- grains de lumière (3).
- gravure laser (1).
- gyrométrie (1).
- gyroscope (4).
- holographie (1).
- informatique (2).
- infra-rouge (2).
- ingénierie des lasers (2).
- interaction photon-atome (3).

- ions multi-chargés(3).
- inversion de population (3).
- laser accordable (1).
- laser CO2 (4)
- laser industriel (4).
- laser YAG (4)
- lasers à argon (4).
- lasers à colorants (4)
- lasers à diode (4)
- laser à gaz (4).
- lasers à HN (4).
- lasers à rubis (4).
- lasers à vapeur de cuivre (4).
- lasers chimiques (4).
- lasers continus(4).
- lasers de production (4).
- lasers pulsés (4).
- lasers ultra-courts (4).
- lasers X (4).
- lentilles (4).
- lois scientifiques (3).
- longueur d'ondes (3).
- machines laser (4).
- maintenance des systèmes lasers (4).
- marché du laser (6).
- marché de la machine laser (6).
- mécanique quantique (3).
- mécanisme de pompage (2).
- médical (1).
- mesure des écoulements (1).

- mesure de distances (1).
- mesure de la fluorescence (1).
- métallurgie (1).
- micro-perçage (1).
- milieu actif (2).
- milieu gazeux (2).
- miroir (4).
- missile laser (4)
- molécules multi-chargées (1).
- objet abstrait (1).
- objet concret (2).
- ondes lumineuses (1).
- ondes magnétiques (1).
- optique non linéaire (1).
- parc de machines laser (5).
- perçage laser (1).
- photochimie (1).
- physique atomique (3).
- physique des plasmas (3).
- plasma d'arc (4).
- polyvalence du laser (2).
- principe de Boltzmann (3).
- processus d'innovation commercial(6).
- processus d'invention scientifique (6).
- processus d'innovation technologique (6).
- propagation à travers l'atmosphère (2);
- propagation guidée (2).
- propriétés optiques (1).
- radiation (1).
- régénération des gaz (2).

- répartition d'énergie dans le faisceau (2).
- robots laser (4)
- sécurité liée au fonctionnement du laser (2).
- séparation isotopique (3).
- slab laser (4).
- soudage (1).
- sources laser (4).
- source à flux axial (4).
- source à flux scellé (4).
- source à flux transverse (4).
- sous traitance laser.
- spectroscopie (1).
- spectromètre (4).
- stratégies des acteurs du monde du laser(6).
- stocker les informations (2).
- système énergétique (2).
- système chimique (2).
- système informatique (2).
- système mécanique (2).
- système optique (2).
- système de sécurité (2).
- technographie (6).
- télécommunications (1).
- télémétrie (1).
- traitement de surface (1).
- transformation des matériaux (1).
- transport du faisceau laser (2).
- transport thermique(2).
- trempe par laser (1).
- vélocimétrie (1).

- vidéo-disque (1).
- vitesse de trajectoire(2).

□ Les “entrées” de l’EST ne concerneraient pas seulement les mots clés ci-dessus, mais les modules constitutifs de la structure: les lois scientifiques, les principes technologiques, les propriétés, la complexité fonctionnelle, la complexité de fabrication (non abordée dans le cas du laser), l’économie, les contenus éducationnels, l’histoire des innovations, la sociologie des objets (non traitée dans le cas présent), les “familles d’objets” et les “lignées d’objets”. La “**navigation interne**” concernerait les liaisons endogènes à l’objet ou/et la technologie considérés. La “**navigation externe**” concernerait les liaisons exogènes à l’objet ou/et la technologie considérés.

Un exemple de “navigation interne” est celui où il a été montré qu’il y a une relation causale entre les propriétés et les applications, l’association des premières définissant l’existence des secondes. Les propriétés, les principes et les fonctions sont connexes.

Un exemple de “navigation externe” concerne les **lois scientifiques** qui sont à la base du principe laser. Ces lois ont de multiples applications en dehors du laser. Un module informatique général sur les lois permettrait d’établir les relations de celles-ci dans tous les cas considérés.

Les fonctions du laser se rattachent à des activités, fonctions d’usage et opérations courantes de la société. Un “**arbre anthropologique des fonctions d’usage**” constituerait un module général de la “navigation externe”.

Le degré de diffusion du laser lui confère un statut de quasi ubiquité, de “technologie générique”. Il entre comme constituant essentiel d’individus techniques majeurs comme le gyroscope, le spectromètre, l’holographe, le video-disque, les robots, les missiles, le séparateur isotopique, le télémètre,

etc...Il entre donc désormais dans la catégorie des **“éléments”**¹³, c'est-à-dire des vecteurs de la technologie. Notion proche de la catégorie anglo-saxonne

¹³“Les "éléments" - ou , selon l'expression de G. Baudrillard par analogie avec la linguistique- les "technèmes", (J. Baudrillard "Le système des objets", Denoël Gauthier, 1968.) seraient les vecteurs insécables des technologies et constitueraient le premier étage du système technique. Simondon donne comme exemples d'éléments techniques les triodes, les klystrons, les magnétrons, ce serait à ce niveau que s'effectuerait le transfert des contenus techniques. Cette thèse peut être élargie. En effet un nombre limité d'éléments usuels apparaissent les premiers matériaux de l'édifice technologique qui s'est constitué au cours de l'histoire. Mécanismes, dispositifs, appareillages, ce que les anglo-saxons appellent les "key devices" peuvent être considérés comme des éléments. Il en va ainsi pour la roue, le levier, le coin, le fil , le filet, la corde ,le nœud, la chaîne, le ressort, le palier, l'engrenage, la valve, le coin, la manivelle, le pendule, le gyroscope, la pompe à air, le régulateur de vitesse, le roulement à bille, l'électro aimant, la cellule photo-électrique, les lentilles optiques et magnétiques, et, plus récemment, l'aérosol, le transistor, le micro-processeur, le laser....(voir Eurêka, an illustred history of inventions from the wheel to the computer, edited by Edward De Bono, Holt, Rinehart and Winston. 1974)) Ces éléments entrent comme composants des objets techniques et sont répandus à des millions, voire des milliards d'exemplaires .(Par exemple on estime qu'il est produit chaque année plus de un milliard de paliers.)

Ces éléments ne sont pas pourtant toujours insécables, il peuvent avoir des composants. L'élément n'est pas l'élémentaire. Il constitue lui même un système, comme l'atome en physique. Mais par analogie, pour ces "éléments" technologique qu'est-ce qui correspondrait à l'ordre de masses atomiques ? Y-a-t-il une relation entre cet ordre et les propriétés technologiques ? Y-a-t-il des "périodes" ? Y-a-t-il à l'intérieur des éléments l'équivalent de l'atome hydrogène comme unité de combinaison et de valence, ou plusieurs atomes ? Les technologies ne constituent-elles pas des sortes de groupements moléculaires dont le type de liaison atomique peut être comparé aux différents modes d'agencement électroniques ? Simples questions sans réponses.

Sinon que le nombre des "éléments" technologiques n'est pas fini comme en chimie, il augmente avec la recherche scientifique et technique et la praxis. Sinon encore qu'on pressent que les éléments techniques ont des propriétés intrinsèques de s'associer entre eux selon des valences variables, mono, pluri ou polyvalentes. Ainsi une des propriétés essentielles des "technologies nouvelles", l'informatique notamment, est leur grande capacité d'association par convergence, intersection ou union. Le concept de "grappe technologique" illustre cette évolution

. Sinon enfin que la "variété" du système technologique est plus élevée que celle du système chimique en raison du nombre plus grand de ses éléments et, probablement, d'une plus grande flexibilité de liaison entre eux et d'associations de technologies.

En définitive il faut constater qu'on ne dispose pas, comme en chimie, d'une table de Mendelejeff de la classification des éléments technologiques. C'est le niveau le plus flou de l'édifice technologique. Il ne paraît pas qu'un travail systématique de classification ait été entrepris pour l'explorer. Sans doute est-il subordonné à l'analyse amont de la combinatoire des principes technologiques, les éléments matérialisant les

des "key devices". Un module général de l'EST concernerait les "éléments", et le laser y appartiendrait.

La combinatoire des fonctions d'usage et des principes technologiques conduit à trois formations différentes: 1 les "**familles technologiques**"³ définies comme l'ensemble où les objets ont la même fonction d'usage mais des principes technologiques différents; 2 les "**lignées technologiques**"³ définies comme sous-ensemble où les objets ont le même principe technologique et les mêmes fonctions d'usage; 3 les "**fonctions-objectifs**"¹⁴ définies comme catégories d'objets techniques qui utilisent le même principe technologique et un critère de proximité fonctionnelle, ce critère social pouvant être dans l'utilisation, la technique ou l'économie.

Ainsi le laser appartiendrait à une "famille" qui comprendrait l'arc électrique, le faisceau d'ion, le plasma d'arc... La notion de "lignée" est génétique. C'est la généalogie décrite précédemment des différentes générations de lasers ayant les mêmes fonctions d'usage. Le concept de "fonction-objectif" est moins courant. Ainsi l'existence d'un groupement d'objets manufacturés aussi différents que les lasers, les armes à feu, les missiles, les rayons X, les équipements de soudage et les robots, peut surprendre. Mais tous ces objets sont au fond destinés à projeter, selon des technologies différentes, de l'énergie sur une cible, située à une certaine distance. Le concept associe le principe technologique et l'objectif (social).

On notera du point de vue de l'organisation des connaissances qu'il est relativement facile de constituer des "lignées technologiques" "des objets et techniques considérés. L'information existe pour faire le module des "familles technologiques", mais elle est dispersée. Par contre la constitution du module des "éléments" demande une recherche ainsi que l'établissement des "fonctions-objectifs". Ce sont des manques importants dans la connaissance systémique de la technologie.

☞ **La figure "Exemple de navigation électronique: le cas du laser"**, annexée illustre la structure d'ensemble et suggère une organisation possible de l'EST.

combinaisons. L'étude des éléments constituerait selon G. Simondon¹ "l'organologie" qui serait l'étude du taxon des "éléments" techniques, de la concrétisation des principes scientifiques et technologiques abstraits dans des structures physiques dotées de propriétés et créées par des procédés."P.F.GONOD "La technologie générale" doc. cité réf.2

¹⁴AYRES R. "Empirical measures of technological change at the sectoral level, technological" *Forecasting and Social Change*, 27, 1985.

La “**navigation interne**” s’effectue entre les modules suivants qui ont été numérotés selon le mécanisme de concrétisation, allant des lois abstraites et fonctions à l’objet concret.

1 Les lois scientifiques communes aux lasers et celles relatives au fonctionnement du laser de transformation des matériaux.

1 a Les principes physiques et les disciplines impliqués (exemples)

1 b Les propriétés de base de la lumière et de la lumière laser

2 La génétique de l’objet “une innovation à la recherche d’application” devient une technologie générique

2a L’heuristique de l’innovation

3 La complexité structurelle. *C’est fait de.....*

3a La complexité fonctionnelle. *C’est fait pour....*

3b L’évolution de la complexité d’utilisation

3c La mesure de la complexité de fabrication

4 Le design de l’objet

4a les procédés de fabrication, les alternatives technologiques

5a Les “lignées d’objets”

5b les “familles d’objets”

5c Les “fonctions-objectifs”

6 L’économie du laser

7 Les contenus éducationnels et les profils professionnels

Ainsi qu’il a été expliqué certains modules n’ont pas été traités, ou l’ont été très superficiellement. La figure est destinée à suggérer ce qu’il faudrait faire -et ce qu’on peut faire- pour un décryptage systémique plus approfondi. Les lignes noires indiquent les chaînages internes, les relations entre les modules. A

titre d'exemple d'une analyse plus "professionnelle" on a reproduit (voir annexe 2) la table des matières du livre considéré comme la référence¹⁵ par "the Institute of Electrical and Electronics Engineers" des USA, qui est l'institution majeure dans ce domaine. Ce livre de 433 pages concerne tous les lasers, alors que l'analyse de cette étude est centrée seulement sur les lasers de transformation des matériaux. Il conduit à deux remarques.

La première est que l'EST pourrait être conçue comme une spirale. Au premier niveau une initiation permettant d'avoir une vue globale simple. Au second niveau on approfondit cette vue, cet arc de la spirale correspondrait à la compréhension de "l'honnête homme du xxi ème siècle". Le troisième niveau serait celui des spécialistes, il serait le "state of the art" régulièrement mis à jour, de la question. Cette conception d'acquisition, non linéaire, mais en spirale, des connaissances, correspond au demeurant à une pédagogie systémique¹⁶.

La seconde remarque est que la clarté et la compétence des chapitres du livre cité ne doit pas faire perdre de vue le manque d'une dimension systémique permettant de mieux comprendre les rapports des parties et du tout, les articulations des éléments et la structure des objets (voir annexe 2), ce qui souligne, à la fois le côté indispensable de la littérature professionnelle spécialisée, et la nécessité de sa réinterprétation.

La "**navigation externe**" concerne les relations entre les modules internes et des modules externes, le plus souvent des banques de données structurées (à créer), et les relations entre les modules externes.

Les modules externes sont les suivants

- L'arbre anthropologique des fonctions d'usage, prolongé par un dictionnaire électronique multilingue
- La banque de données des lois scientifiques comprenant leur formulation, leurs champs d'application, leur histoire.
- L'histoire des principes et procédés technologiques.
- La banque de données des "familles", lignées" techniques et "fonctions-objectifs".
- La banque de données des "éléments".
- La banque de données des propriétés technologiques.
- La banque de données des profils et qualifications professionnelles.

La navigation interne et la navigation externe s'effectueraient par la médiation des mots clés descripteurs et par niveaux de modules.

□ La grande entreprise est de constituer les banques de données communes à l'EST. Certaines sont relativement faciles à bâtir, c'est le cas des lois scientifiques, d'autres demandent un travail d'analyse de fond, c'est le cas pour la détection des "éléments", des propriétés technologiques, et de la

¹⁵HECHT Jeff "Understanding Lasers, an entry-level guide" IEEE Press, 1991.

¹⁶voir à ce sujet Joël de Rosnay "Le Macroscopie, vers une vision globale", éditions du Seuil, 1975.

révélation de “fonctions-objectifs”, ou un travail d'analyse systématique des objets techniques, pour l'identification des “familles” et des “lignées”. L'histoire des principes et propriétés technologiques est plus une affaire de réunion et d'organisation de l'immense littérature dispersée existante. La banque des données des profils des qualifications professionnelles en correspondance avec les contenus technologiques est subordonnée à la mise au point et à l'application de méthodes d'analyse de la complexité technologique. C'est une œuvre difficile mais essentielle pour permettre au futur du travail une “flexibilité à visage humain”.

L'entreprise est certes de taille, mais on a désormais les moyens d'en venir à bout. Il s'agit en définitive de doter la société du XXI ème siècle des outils à la hauteur des défis qu'elle va affronter ■

ANNEXES

ANNEXE 1: le Laser dans l'Encyclopédie Grolier

ANNEXE 2: Le Plan du livre "Understanding Lasers"

ANNEXE 1: le Laser dans l'Encyclopédie Grolier

On a reproduit tel quel, sans modification des caractères typographiques, l'article sur les Lasers ainsi qu'on peut le lire à l'écran de l'ordinateur. On rappellera que les noms en majuscules renvoient à d'autres articles. La "navigation" entre ceux-ci peut donc s'effectuer selon 21 entrées.

laser

{lay'-zur}

The laser is a device that produces a beam of LIGHT that is both scientifically and practically of great use because it is COHERENT LIGHT. The beam is produced by a process known as stimulated emission, and the word "laser" is an acronym for the phrase "light amplification by stimulated emission of radiation."

BASIC PRINCIPLES

The meaning of "coherent" light is as follows: Light moves in the form of a wave, with crests and troughs. Like all other kinds of ELECTROMAGNETIC RADIATION, it can be characterized both by its frequency, or number of wave crests passing a given point per second, and by its wavelength, or distance between wave crests. (Beams of such

radiation travel through a vacuum at the highest velocity anything can achieve; see RELATIVITY.) Different wavelengths of light are seen as different colors.

Like radio waves, light can also carry information. The information is encoded in the beam as variations in the frequency or shape of the light wave. In fact, because light waves are of much higher frequencies than radio waves, they have a correspondingly higher information-carrying capacity.

The smallest unit of light is the PHOTON, which may be thought of as a particle as well as a wave. In beams of light from ordinary natural or artificial sources, these individual photon waves are not moving along together because they are not being emitted at precisely the same instant but instead in random short bursts. This is true even when the light is of a single frequency. Such beams are called incoherent. A laser is useful because it produces light that is not only of essentially a single frequency but also coherent, with the light waves all moving along together in unison. The MASER, using the same principle of operation, generates or amplifies electromagnetic radiation in the longer-wavelength microwave region of the electromagnetic spectrum.

HOW A LASER WORKS

A laser is made up of several basic components. One is the so-called active medium, which may consist of atoms of a gas, molecules in a liquid, ions in a crystal, or any of several other possibilities. Another component consists of some method of introducing energy into the active medium, such as a flash lamp, for example. The third basic component is a pair of mirrors placed on either side of the active medium, one of which transmits part of the radiation that strikes it. In the following discussion the active component is taken to be a gas.

Each atom in the active medium of a gas laser is characterized by a set of energy states, or energy levels, in which it may exist. These states may be pictured as unevenly spaced rungs of a ladder, with higher rungs representing states of higher energy. Left undisturbed for a long enough time, an atom will fall to its lowest energy state. This is called the ground state. As a simple example, suppose that an atom has only two energy states that differ by a certain amount of energy. Then consider how this atom interacts with light. According to QUANTUM MECHANICS, the atom will interact with light of only one particular frequency (determined by a relationship involving a physical constant known as PLANCK'S CONSTANT).

Three kinds of interaction can take place between the atom of gas in a laser and light. Either the light is absorbed, or spontaneous emission occurs, or stimulated emission occurs. That is, an atom in its lower energy state can absorb light and be excited to its upper state. If the atom is instead in its upper energy state, it can fall spontaneously to its lower state and emit light in the process. The third possibility is that the atom is stimulated by the presence of light to jump down to its lower energy state, emitting additional light while doing so.

Spontaneous emission is unaffected by the presence of light and occurs on a time scale characteristic of the states involved. This time is called the spontaneous lifetime. In stimulated emission the additional light emitted has the same frequency and directional characteristics as the light that stimulates it. This is the crucial feature on which the properties of the laser are based. In order for the laser to work effectively, stimulated emission must predominate over both absorption and spontaneous emission.

STIMULATED EMISSION

The probabilities of occurrence of stimulated emission and absorption are both proportional to the intensity of the light. Stimulated emission, however, can happen only to upper-state atoms, and absorption can happen only to lower-state atoms. For stimulated emission to dominate absorption, therefore, more atoms must be in the upper state than in the lower state. This unusual situation is called population inversion and can be achieved by supplying energy ("pumping" the laser) and carefully selecting the active medium. Typical pumping schemes include the use of light from flash lamps or other lasers, collisions of the lasing atoms with electrically accelerated electrons in a gas discharge tube, excitation with energetic particles from nuclear reactions, chemical reactions, and direct electrical input to a semiconductor. Continuous lasing is harder to achieve than pulsed lasing.

For stimulated emission to dominate spontaneous emission, it is necessary to ensure that the stimulating light is sufficiently strong. Stimulated emission then occurs in a time interval that is short compared to the spontaneous lifetime of the excited state. This situation is achieved by keeping a fraction of the laser light trapped between two mirrors enclosing the active medium. Domination of stimulated emission over spontaneous emission becomes more difficult to achieve as the spontaneous lifetime becomes shorter. Because shorter spontaneous lifetimes are associated with states that emit radiation of higher frequencies, it is difficult to make an ultraviolet-emitting laser, and an X-ray laser was not successfully demonstrated until 1984. Despite their complexity of construction,

however, ultraviolet lasers, or excimers, have gained widespread use in industry. Emitting ultraviolet light when a halogen and rare gas atom combine temporarily, they are used in applications ranging from glass etching and photolithography to the sterilization of wines.

Atoms initially in a lower state are raised to the upper state by energy from a flash lamp or some other pumping source. Some of these atoms emit light spontaneously in random directions. Light traveling perpendicular to the mirrors stays within the active medium long enough to stimulate emission from other atoms, whereas light traveling in other directions is soon lost. The light amplified by stimulated emission is now more intense and more likely to stimulate further emission. Some light reaching the output mirror is transmitted to form the laser beam; some is reflected back through the medium to continue the stimulated-emission process.

HISTORY

The fundamental principles underlying the operation of the maser and laser were established long before these devices were successfully demonstrated: stimulated emission was proposed by Albert EINSTEIN in 1916, and population inversion was discussed by V. A. Fabrikant in 1940. These fundamental ideas, followed by two decades of intensive development of microwave technology, set the stage for the first maser, an ammonia maser, constructed in 1954 by J. P. Gordon, H. J. Zeiger, and Charles H. TOWNES. Over the next 6 years many workers, including Nikolai G. BASOV, Aleksandr M. PROKHOROV, Arthur L. Schawlow, and Townes, made important contributions that helped to extend these ideas from the microwave to the optical wavelength region. These efforts culminated in July 1960 when Theodore H. MAIMAN announced the generation of a pulse of coherent red light by means of a ruby crystal--the first laser. In 1964, Townes, Basov, and Prokhorov were jointly awarded the NOBEL PRIZE for physics. Schawlow received a later Nobel Prize, in 1981, for his development of laser spectroscopy, but Maiman, who had produced the first actual laser, received no prize.

Another aspect of laser history was finally resolved in 1987, when American physicist Gordon GOULD won his 30-year battle to obtain a patent for a gas-discharge laser he had conceived in 1957. He had written his ideas in a notebook at the time, and had them officially recorded, but failed to apply for a patent until 1959 because of poor legal advice. (In the notebook he had, in fact, coined the word "laser," as well.) Gould eventually did receive partial patents in 1977 and 1979, but the 1987 patent covers many types of laser, including the helium-neon laser.

LASER TYPES

A selection of laser types and characteristics is shown in Table I. Many other types exist, a few of which will be listed here without further discussion: carbon-monoxide, color-center, excimer, free-electron, gas-dynamic, helium-cadmium, hydrogen-fluoride, deuterium-fluoride, iodine, Raman spin-flip, and rare-gas halide lasers.

Many of these lasers may be operated so as to produce widely different pulse-duration, power, and wavelength characteristics; the numbers shown in the table are intended only to suggest the capabilities of each type rather than to indicate the complete range or maximum performance. Listed pulse-duration times range from 40 picoseconds (1 psec = 10^{-12} sec) to continuous-wave (cw), which is essentially an infinite pulse length. A 1-nanosecond (10^{-9} sec) pulse is only about a third of a meter (1 ft) long as it travels through space. Pulse durations shorter than 1 psec have been achieved, opening up possibilities for probing phenomena of very brief duration.

The tabulated power levels cover a range of a million to a billion in magnitude. The lowest tabulated power--3 milliwatts (mW)--refers to a cw laser, whose highly directional beam is too bright to look directly into and can be damaging to the eye. Some benchmarks may be useful to give some feeling for power levels: electrical input to a typical light bulb is 100 watts (W); power generated by a large automobile, 1 megawatt (MW); electrical power generated by a power station, 1 gigawatt (GW). It is important to appreciate the distinction between power and energy. Power is the rate at which energy is transferred, so that one pulse from a 40-psec, 1-terawatt (TW) laser provides the same amount of light energy as does a 40-W laser in 1 sec. The lasers tabulated have wavelengths that range far beyond the visible-light region (430-690 nm).

A few remarks may be made concerning individual lasers. The helium-neon laser, by far the most common laser, is also one of the cheapest, costing as little as \$170. The diode laser is the smallest, being packaged in a transistorlike enclosure. Dye lasers are remarkable for their broad, continuously variable wavelength capability. The achievement of new wavelengths justifies the complicated procedure of using one laser to pump another. The carbon-dioxide laser has, at 15-30%, the best efficiency (the ratio of output light energy to input electrical energy).

APPLICATIONS

In considering the many applications of lasers, the basic properties of light and of laser light in particular will be referred to as follows: (1) The speed of light is the highest speed possible. (2) Light in empty space travels in a straight line. (3) Light can carry information. (4) Light spreads less as it travels and can be focused into a smaller point than can radio waves. (5) Light beams can be readily manipulated by mirrors and can be switched on and off quickly. (6) Laser light is essentially of a single frequency. (7) Pulsed lasers offer the possibility of power multiplication by releasing energy in very brief pulses. (8) Lasers can apply energy swiftly to very small areas. Besides the areas of application given here, lasers continue to find new ones. For example, laser "atomic traps" were developed in the late 1980s to slow down and study living organisms as well.

Laser-Induced Controlled Thermonuclear Fusion

(Neodymium-glass and pulsed carbon-dioxide lasers; properties 4 and 7). The ability to control thermonuclear fusion on a scale much smaller than that typified by hydrogen bombs or the sun would solve our energy problems for the foreseeable future. One approach to this goal involves heating and compressing a microscopic pellet of hydrogen-isotope (deuterium or tritium) fuel by placing it at the focus of a high-power, short-pulse laser beam. Significant efforts are being devoted to fusion research in several countries.

Communications

(Diode and neodymium-yag lasers; properties 3, 4, and 5). Communications links using coded light pulses from lasers traveling in glass fibers are already in use in the Chicago Bell Telephone system (see FIBER OPTICS). A 144-fiber cable can carry 40,000 simultaneous telephone conversations. Light also offers an attractive alternative to microwaves for satellite communications.

Materials Working

(Carbon dioxide, neodymium, and argon-ion lasers; properties 4, 5, and 8). A laser beam can be used to heat-treat a shallow surface layer of a metal component or to melt and weld a pair of components without introducing sufficient heat to distort them. Narrow cuts can be made, and holes can be drilled. Among the advantages over conventional techniques are that there is no cutting-tool edge to become dull with use, and computer control of cutting and drilling operations is straightforward. Delicate adjustments can be made to the size of microelectronic components while monitoring the desired electrical characteristics of the system.

In the late 1980s a novel process called selective laser sintering was being developed. Working from computer graphics, this "desktop manufacturing" device can produce prototype design models by a rapid buildup of fused layers of plastic or metal through use of a laser beam.

Medical Applications

(Carbon dioxide and argon-ion lasers; properties 4 and 8). A laser beam can be used to seal capillaries in a shallow surface layer without damaging deeper tissues. This can be done while painlessly vaporizing a surface tumor or cutting an organ. Noninvasive surgery of the retina (laser light enters through the eye lens) and cauterization of stomach ulcers (light enters via an endoscopic fiber) are important applications. Lasers have also been used to clear cholesterol blockages in arteries (see ANGIOPLASTY).

Surveying and Ranging

(Helium-neon and ruby lasers; properties 2 and 4). A laser beam can be used as a straight line in surveying. Distances can be measured by timing a light pulse traveling from the laser to a mirror and back to a detector near the laser. This can be done for both terrestrial measurements and lunar ranging.

Holography

(Helium-neon and argon-ion lasers; property 6). Laser sources allow reproduction of three-dimensional images. This technique is known as HOLOGRAPHY. Holographic views of microscopic objects are now being made by using advanced X-ray lasers.

Isotope Separation and Spectrography

(Various; property 6). The detection, separation, and investigation of atoms and molecules based on the light frequencies that they absorb all benefit from the sophistication and tunability of laser light sources.

Military Applications

(Neodymium and carbon-dioxide lasers; properties 1, 2, 4, and 8). Lasers are used for range-finding and target designation, and are being developed as both antisatellite and ballistic missile defense weapons (see STRATEGIC DEFENSE INITIATIVE).

Information Applications

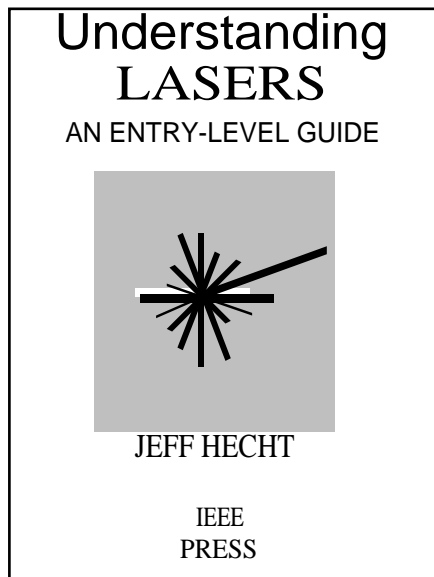
(Properties 3, 5, and 8). Small laser beams are used in printing devices to trace reproducible images. Laser-etched discs are used for large-capacity audio, video, and data recording and playback (see COMPACT DISC; VIDEODISC).

John F. Ward and Daniel S.

Elliott

Bibliography: Bertolotti, M., *Masers and Lasers: An Historical Approach* (1983); Kasuya, T., and Tsukakoshi, M., *Handbook of Laser Science and Technology* (1988); Meyers, Robert, ed., *Encyclopedia of Lasers and Optical Technology* (1990); Schafer, F. P., ed., *Dye Lasers*, 3d ed. (1989); Steen, W. M., ed., *Lasers in Manufacturing* (1989); Whimmery, J. R., ed., *Lasers: Invention to Application* (1987); Young, M., *Optics and Lasers*, 3d rev. ed. (1986).

ANNEXE 2: Le Plan du livre “Understanding Lasers”



Contents

Preface

1 Introduction & Overview

About This Chapter
Lasers in Fact and Fiction
What Is a Laser
How Lasers Are Used
Important Laser Properties
Lasers, Physics, and Optics
What Have We Learned
What's Next
Quiz

2 Physical Basics

About This Chapter
Electromagnetic Waves and Photons
Quantum and Classical Physics
Energy Levels
Interactions of Light and Matter
Lenses and Simple Optics
What Have We Learned
What's Next
Quiz

3 How Lasers Work

About This Chapter
Producing Population Inversions
Resonant Cavities
Production of Laser Beams
Laser Excitation Techniques
What Have We Learned
What's Next
Quiz

Line Selection and Tuning

4 Laser Characteristics

About This Chapter
Coherence
Wavelengths
Laser Beams and Modes
Oscillators and Amplifiers
Output Power
What Have We Learned

Laser

What's Next
Quiz

5 Laser Accessories

About This Chapter
Active vs. Passive Optics
Classical Passive Optics
Cylindrical Optics
Dispersive Optics
Fiber Optics
Polarizing Optics
Beamsplitters
Nonlinear Optics
Intensity Modulation
Beam Scanners
Controlling Laser Pulse Characteristics
Power and Energy Measurement
Mounting and Positioning Equipment
Emerging Technologies
What Have We Learned
What's Next
Quiz

6 Gas Lasers

About This Chapter
The Gas Laser Family
Gas Laser Basics
Helium-Neon Lasers
Rare-Gas Ion Lasers

- Metal-Vapor Lasers
- Carbon-Dioxide Lasers
- Carbon-Monoxide Lasers
- Excimer Lasers
- Nitrogen Lasers
- Chemical Lasers
- Far-Infrared Lasers
- What Have We Learned
- What's Next
- Quiz

7 Solid-State Lasers

- About This Chapter
- What Is a Solid-State Laser?
- Principles of Solid-State Lasers
- Optical Pumping and Sources
- Ruby Lasers
- Neodymium Lasers
- Vibronic Solid-State Lasers
- Other Solid-State Lasers
- What Have We Learned
- What's Next
- Quiz

8 Semiconductor Lasers

- About This Chapter
- Evolution and Basic Concepts
- Properties of Semiconductors
- Light Emission at Junctions
- Structures of Semiconductor Lasers

Beam Characteristics and Structure
Wavelengths and Materials
Specialization of Diode Lasers
What Have We Learned
What's Next
Quiz

9 Other Lasers

About This Chapter
Tunable Dye Lasers
Free-Electron Lasers
X-Ray Lasers
Other Novel Laser Concepts
What Have We Learned
What's Next
Quiz

10 Low-Power Laser Applications

About This Chapter
The Attractions of Lasers
Reading With Lasers
Optical Disks and Data Storage
Laser Writing
Fiber-Optic Communications
Optical Computing
Linear Measurements
Rangefinding and Laser Radar
Other Military Targeting Aides
Spectroscopic Measurements
Time Measurements

Holography
Art & Entertainment
What Have We Learned
What's Next
Quiz

11 High-Power Laser Applications

About This Chapter
High vs. Low-Power Laser Applications
Attractions of High-Power Lasers
Materials Working
Electronics Manufacture
Medical Treatment
Photochemistry and Isotope Separation
Laser-Driven Nuclear Fusion
Laser Weapons
What Have We Learned
Quiz

Appendices

Laser Safety
Constants, Conversions, and Symbols
Glossary
Index
Answers to Quizzes