

les applications médicales du laser

conférence donnée en Sorbonne

par M. Bernard DECOMPS, professeur à l'Université Paris-Nord

Je suis un physicien. Je ne suis pas un médecin. En conséquence, la présentation que je vais faire est à la fois partielle et partiale. Elle cherchera avant tout à expliquer, à classifier, à tenter de comprendre des effets. En aucun cas, je n'ai une compétence quelconque pour suggérer des soins et pour conforter ou répondre à telle ou telle question de nature médicale. J'insiste là-dessus car il arrive parfois que l'on assiste à de telles conférences en attendant la solution de telle ou telle affection et comme le domaine du laser porte en lui certain côté mythique, un certain côté miraculeux, je voudrais tout de suite prévenir : je ne pourrai pas, et d'ailleurs je n'aurai pas le droit même si j'en avais la compétence de répondre à de telles questions. Pardonnez-moi donc si je limite à cet aspect plus partial et plus partiel des opérations.

Pour commencer je voudrais rappeler très brièvement ce qu'est un laser. Qu'est-ce qu'un laser pour le physicien ou le médecin qui l'utilise ? Le laser est une source de lumière que l'on va caractériser de façon relativement simple par sa

couleur, on appellera cela sa longueur d'ondes et peut être aussi par son type de fonctionnement. On distinguera les lasers qui fonctionnent continuellement, les lasers dits continus, de ceux qui fonctionnent par flash, par impulsions (tout le monde a vu un flash qui dure un millième de seconde à peu près). Dans le cas des lasers nous aurons des durées d'impulsion qui peuvent être d'un millième de seconde ou incroyablement plus étroites : on parlera tantôt du milliardième de seconde pour un laser que je dirai nanoseconde ou même du millionième du milliardième de seconde car les lasers femto seconde (10^{-15} sec) ces «bêtes» tout à fait étranges, existent et fonctionnent. Ils ont d'ailleurs des applications médicales.

Les types de lasers

Il existe deux types de laser. Il y a un type pour lequel on croit comprendre les effets sur le corps humain et j'en donnerai quelques explications : ce sont les lasers de puissance significative, importante, qui émettent des énergies importantes, je dirai des lasers de puissance qui sur une seconde vont donner une énergie importante de l'ordre de un à quelques joules. Il y a une deuxième catégorie de lasers utilisés en médecine et pour ma part je serai plus prudent, non pas que j'aie quelque qualification que ce soit pour dire qu'ils ne font rien mais en tout cas nous n'en comprenons pas clairement les effets, ce sont des lasers de faible puissance, appelés «soft lasers» car le terme anglo-saxon a franchi toutes les frontières. Ils permettent des expériences qui restent encore contradictoires sur leur efficacité mais il faudra en parler car leur diffusion est malheureusement beaucoup plus grande surtout dans les pays latins.

On peut constater que dans les pays nordiques, les pays anglo-saxons, l'essentiel du marché du laser médical est représenté par les lasers de puissance alors que dans les pays méditerranéens, la majorité du marché est représentée par les «soft laser». La France étant un pays à la fois du nord et du sud, nous trouvons à peu près le même marché financier mais évidemment, numériquement, beaucoup plus de «soft laser» que de lasers de puissance. Pour citer un ordre de grandeur, il y a en France, en gros installées dans les hôpitaux, un peu plus de 1.200 installations laser. Cela peut paraître beaucoup. Nous verrons que pour avoir un traitement efficace, il faut concentrer plusieurs lasers dans un même site, ceci ne représente quand même qu'un petit nombre d'installations complètes surtout si l'on remarque que la moitié de ces lasers même un peu plus, (700 d'entre eux) sont destinés à une seule

application, certes tout à fait importante, qui sont les applications à l'ophtalmologie, c'est-à-dire plus spécifiquement à la prévention du décollement de rétine.

Les propriétés des lasers

Voilà un premier panorama pour la puissance. Pour aller un tout petit peu plus loin je me permettrai de caractériser quatre propriétés que l'on appelle l'accordabilité c'est-à-dire la possibilité de varier ou d'ajuster la longueur d'ondes, et deux propriétés désignées par des termes de physique, naturellement moins compréhensibles, la cohérence spatiale et la cohérence temporelle et enfin la dernière propriété, le transport d'énergie sans contact, ce qui est probablement l'essentiel de la spécificité du laser en médecine, je dirai que c'est cette dernière propriété qui apporte peut-être le caractère le plus innovant. Pour éclairer ces propriétés, il est de bonne guerre de parler des qualités. Le laser a beaucoup de qualités. En tout cas, les amis médecins avec qui je peux collaborer en sont tous persuadés par conséquent en leur nom à tous je peux vous dire qu'il y a beaucoup de qualités pour l'utilisation des lasers. Simplement pour évoquer quelques termes, je reprends l'expression de l'un d'entre eux le laser est capable aujourd'hui de sculpter la cornée de l'oeil, de pulvériser les calculs biliaires, de déboucher les artères et de tuer les tumeurs sans interventions chirurgicales majeures. Voilà 4 exemples qui permettent de montrer l'attractivité de cet outil nouveau et qui justifie je crois beaucoup de recherches et beaucoup de travail avec ceux qui aident à comprendre et à fabriquer de nouvelles sources.

L'accordabilité

Prenons l'accordabilité. On peut dire aujourd'hui que l'on est capable d'émettre sous forme d'un laser n'importe quelle longueur d'onde et par conséquent si l'on veut avoir une couleur particulière, il existe une solution avec un laser pour pouvoir l'obtenir, n'importe quelle couleur dans le domaine des couleurs visibles du violet au rouge, bien connues mais également dans de larges pans de longueur d'ondes plus courtes, dans l'ultra-violet et ceci jusqu'à l'ultra violet relativement lointain et alors du côté de l'infra-rouge, dans l'autre domaine des longueurs d'ondes plus longues, on peut faire à peu près n'importe quoi et un des lasers les plus couramment utilisés, le laser à dioxyde de carbone, le laser à gaz carbonique (laser à CO²), fonctionne dans ce domaine et c'est un des lasers les plus utilisés en médecine. Nous avons donc la

B. DECOMPS

possibilité de choisir la longueur d'ondes et nous verrons que choisir la longueur d'ondes c'est choisir l'organe, le vaisseau sanguin, même la cellule si elle est correctement marquée par le colorant sur laquelle on va interagir sans interagir sur l'environnement. C'est une des spécificités du traitement ou des applications médicales du laser.

La cohérence spatiale

Deuxième idée : la cohérence spatiale. Rassurez-vous, sans grand calcul, que représente-elle pour le médecin ? Tout le monde a vu un faisceau laser, tout le monde a vu que le laser a l'air de concentrer toute l'énergie dans un cylindre, dans un tuyau alors que les sources usuelles émettent de l'énergie à peu près dans toutes les directions de l'espace. Cette propriété de contenir l'ensemble de l'énergie lumineuse à l'intérieur d'un tube permet de focaliser toute cette énergie sur un point particulier. Cette propriété extraordinaire de focalisabilité donne des applications tout à fait spectaculaires. Couplée à un appareil d'optique comme un microscope on va pouvoir concentrer l'énergie sur une surface submicrobique, pouvoir toucher sélectivement une cellule, voire une partie de la cellule ou un petit ensemble de cellules. Autre idée : on pourra également faire pénétrer ce faisceau laser à l'intérieur d'une fibre et grâce à cette fibre pouvoir véhiculer cette énergie par un système qui s'appelle l'endoscopie jusqu'à des organes internes. Cette possibilité d'amener cette énergie «à pied d'oeuvre», de procéder à une intervention chirurgicale sur un organe interne sans opération lourde, sans ouverture chirurgicale traditionnelle constitue un deuxième avantage évident de l'utilisation du laser en médecine.

La fluence

J'ai introduit sur le schéma n°1 un terme un peu barbare : la fluence. Nous l'utiliserons beaucoup. La fluence représente une énergie qui est portée sur une section autrement dit par une unité de surface. On sent bien que c'est cette énergie qui va compter, l'énergie par unité de surface. Pour illustrer ce propos, j'utilise un transparent sur lequel on a placé à peu près tous les lasers utilisés en médecine et on s'aperçoit que ces lasers peuvent se regrouper en 4 ensembles distincts : un ensemble noir (nous le verrons plus loin) avec des effets de type photochimique, un ensemble rouge avec des effets de type thermique, un ensemble bleu sur un procédé dont la mise en évidence est relativement récente, il s'agit de l'effet dit photo-ablatif et sur un ensem-

ble vert, un effet électromécanique. Nous distinguerons ces 4 types d'effets mais ce qui est important ici c'est de voir que sur ce transparent dans lequel nous mettons la puissance et la durée d'impulsion autrement dit l'énergie qui va se trouver comme le produit de la puissance par la durée d'impulsion, l'énergie constante se trouve sur des traits à 45°. Et toutes les opérations du laser en dépit de leur grande diversité se trouvent rassemblées à peu près sur 3 ordres de grandeur de la fluence. Nous aurons

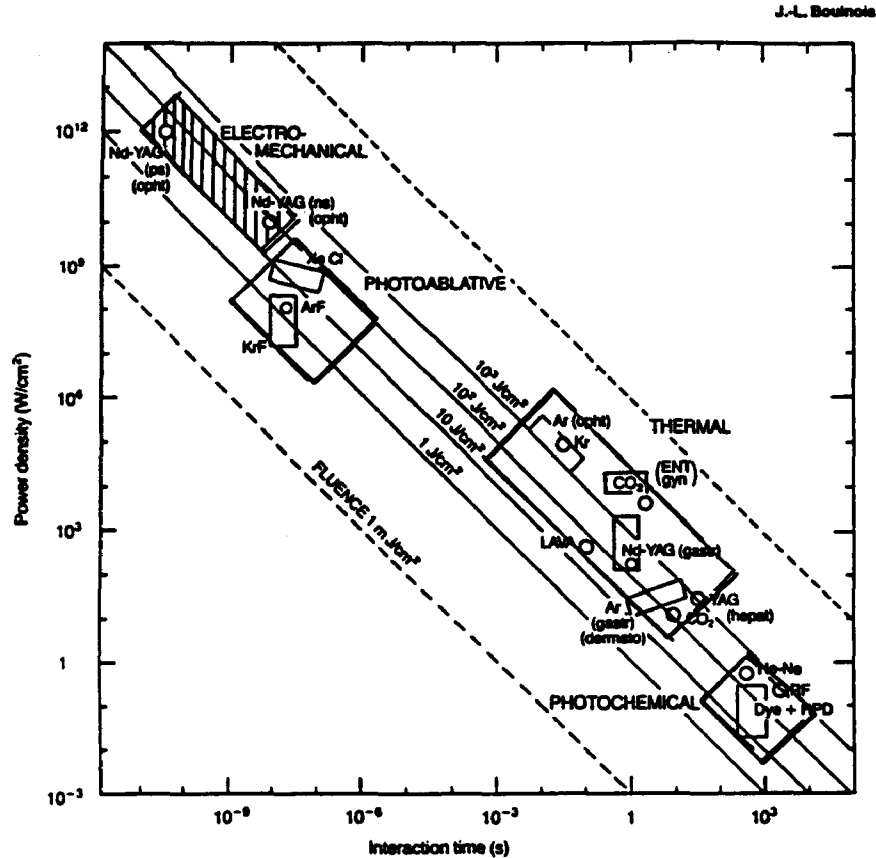


schéma n°1

en réalité quelque chose de relativement immanent à l'ensemble des systèmes et pour distinguer un effet d'un autre, la durée d'impulsion permettra de différencier les différents effets. Pour l'effet photochimique, on utilisera des puissances faibles sur des durées longues, les effets thermiques, des puissances moyennes sur des durées moyennes, les effets photo-ablatifs, des durées courtes et donc des puissances élevées mais des énergies tout à fait classiques, et les effets électromécaniques des durées encore plus courtes. C'est là que les lasers pico-seconde (10⁻¹² sec) voire femto-seconde peuvent avoir un grand intérêt car ils permettent d'apporter de la puissance en un point en apportant toujours très peu d'énergie autrement dit en chauffant très peu le milieu pour obtenir un effet relativement pur et pas trop pollué par les

B. DECOMPS

effets thermiques qui peuvent devenir négatifs. Je crois que cet ensemble permet d'illustrer cette notion de fluence et je reprends les opérations où je les avais laissées tout à l'heure

La cohérence temporelle

La qualité dite de cohérence temporelle permet d'expliquer pourquoi un laser fonctionne sur une seule couleur même si, du point de vue médical, la monochromaticité a très peu d'importance, la couleur en a beaucoup. Deuxièmement, cela permet d'expliquer également pourquoi on peut obtenir des impulsions de durée extraordinairement brèves comme celles que j'ai évoquées tout à l'heure. Nous en verrons l'utilisation en particulier pour optimiser tel ou tel effet.

Le transport d'énergie sans contact

La dernière des propriétés classiques est le transport d'énergie sans contact qui permet donc d'apporter de l'énergie en un point particulier sans risquer d'apporter en même temps les microbes qui existent sur n'importe quel instrument ou scalpel. Par conséquent, cela permet une chirurgie à priori parfaitement propre et ceci est encore un peu un rêve. Enfin, c'est un appareil de haute technologie, donc cela plait, mais ceci nécessite un ensemble spécifique.

Le schéma n°2 montre qu'il y a un instrument laser porté par un crayon. Aucun des instruments utilisés dans une salle de chirurgie avec laser n'est un instrument classique. On est obligé en effet de «sabler» tous les instruments pour éviter les réflexions parasites, d'avoir des alimentations électriques particulières, autrement dit installer un laser dans un ensemble chirurgical c'est créer un nouveau bloc chirurgical.

Les contraintes de l'emploi du laser

Beaucoup d'avantages. Mais s'il y avait tellement d'avantages on comprendrait mal pourquoi, alors que le laser a été mis au point pour la première fois en 1960, il y a donc 30 ans, il n'existe que 1.200 installations de laser lourd en France. Ce n'est pas

uniquement par obscurantisme c'est aussi que le laser présente quelques défauts. **Premier défaut** : accordabilité certes, possibilité d'obtenir un laser à n'importe quelle longueur d'ondes mais quand on achète un laser déterminé, on a en général qu'une seule longueur d'ondes sauf en utilisant des lasers de type très particulier. Si on veut un usage à beaucoup d'applications possibles, il nous faudra non pas un laser mais un parc de lasers, ce qui accroît l'investissement et également les contingences matérielles.

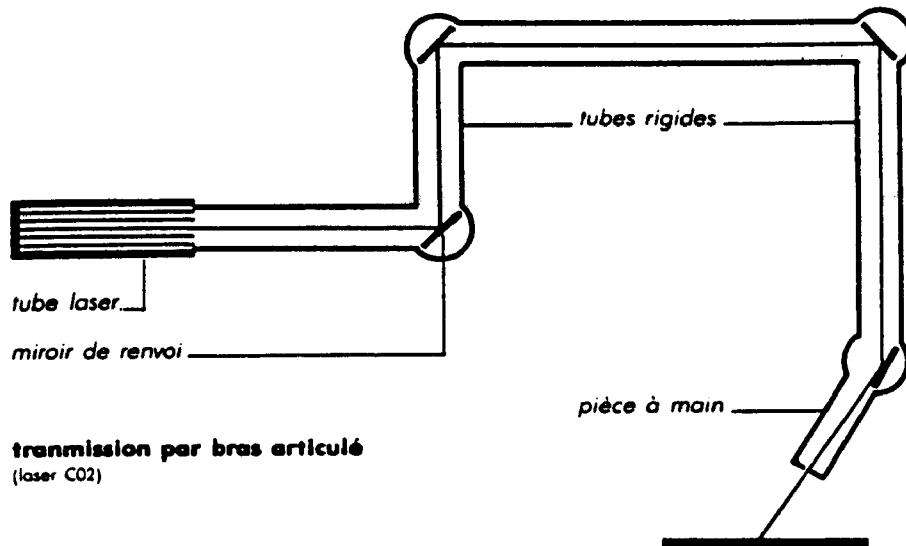


schéma n°2

Deuxième défaut : le faisceau laser parfaitement cylindrique existe lorsque le laser est correctement réglé. Si cela n'est pas le cas, nous avons une véritable pomme d'arrosoir de la lumière qui part partout et il est parfaitement clair qu'à ce moment là on a beau mettre n'importe quel instrument d'optique derrière il est très difficile de focaliser toute la lumière sur un point. S'il s'agit d'un laser dans le domaine visible, cela se voit tout de suite mais s'il s'agit d'un laser dans le domaine infra-rouge, cela ne se voit pas forcément immédiatement et par conséquent le laser doit marcher non seulement en regardant sa puissance mais également sa cohérence spatiale, et par conséquent le contrôle de cohérence spatiale demande des réglages délicats et un personnel tout à fait qualifié pour vérifier ce type de fonctionnement.

Ce que j'ai dit pour la cohérence spatiale est encore plus vrai pour la cohérence temporelle. Certes le laser à la milli-seconde fonctionne de façon tout à

B. DECOMPS

fait correcte et vous ne courez aucun danger en allant chez un ophtalmologiste. En revanche, si vous utilisez un laser pico-seconde voire un laser femto-seconde, il vaut mieux être à proximité d'un ensemble constitué par des ingénieurs ou des techniciens ultra-qualifiés pour en assurer le réglage, faute de quoi cela reste encore assez délicat : ce ne sont pas des appareils presse-boutons. Quant au transport d'énergie sans contact, il est absolument merveilleux lorsque le faisceau laser touche la cible, il l'est moins lorsqu'il tombe à côté (et il peut tomber à côté), autrement dit, attention aux yeux. Tout le monde a vu un laser : il suffit aujourd'hui de vouloir acheter quelque chose dans un supermarché pour remarquer le petit faisceau rouge. C'est déjà dangereux pour les yeux, il vaut mieux ne pas rester à côté, on peut avoir des troubles dans les yeux. Vous imaginez avec un laser de puissance, les dégâts pour les yeux voire même les brûlures accidentelles à côté du point sur lequel on voudrait intervenir.

A côté de beaucoup d'avantages il faut donc avoir conscience qu'il s'agit d'une composante d'un ensemble lourd, dans un environnement spécifique et servi par un personnel qualifié. Ceci se traduit par un inconvénient sur les prix d'investissement, sur l'encombrement et sur le rendement énergétique. En effet, le laser a un rendement énergétique faible. On peut dire que pour la médecine de nos pays industriels avancés, c'est un effet tout à fait secondaire, certes cela grève les dépenses de chauffage que paie le directeur de l'hôpital mais ceci compte peu par rapport au reste. En revanche, pour sa diffusion et vis-à-vis des pays du tiers monde, c'est un point qu'il faudra regarder de plus près et en détail. En résumé, des avantages certes mais en même temps un certain nombre d'inconvénients.

Laser et fibre optique

J'ai insisté tout à l'heure sur le fait que le laser était une source de lumière mais qu'il faut considérer à l'intérieur d'un ensemble spécifique. On ne peut pas pour un médecin dissocier le laser du système qui va permettre de transmettre le laser au point où on veut l'appliquer. On a deux grandes techniques : soit en utilisant des miroirs qui vont permettre de faire passer le faisceau du laser au point d'application par une technique dite de bras articulés. Une telle technique évite que le faisceau du laser se ferme absolument dans tout la pièce et devienne un danger pour les yeux de toutes les personnes dans le bloc chirurgical. Une deuxième technique infiniment plus souple et infiniment plus utilisable quand elle est permise, c'est celle

de l'utilisation d'une fibre optique (schéma n°3). Les fibres optiques sont bien connues en télécommunication. Elles sont un progrès essentiel pour la chirurgie par laser surtout depuis que l'on sait faire des fibres fiables qui permettent de transporter une énergie raisonnable, une énergie significative avec des diamètres extrêmement petits. On arrive

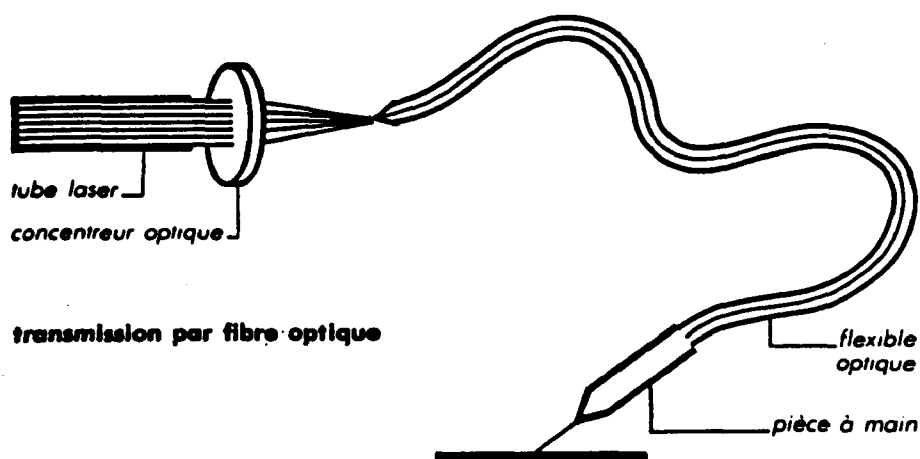


schéma n°3

à des fibres de 200 microns de diamètre, moins d'un millimètre avec leur environnement et elles peuvent donc soigner sélectivement n'importe quel organe interne accessible à partir de l'extérieur par cette méthode. Ceci sans intervention chirurgicale traditionnelle. Autrement dit, grâce au laser il existe désormais des opérations qui autrefois requéraient des traitements hospitaliers et une hospitalisation de plusieurs jours, voire de plusieurs semaines qui peuvent être traitées en ambulatoire. C'est à peu près aussi désagréable qu'une visite chez le dentiste mais pas pire, et quand on sait les difficultés qu'il y avait autrefois pour soigner en particulier un ulcère de l'estomac, on se rend compte que c'est tout à fait extraordinaire. Vous voyez des malades entrer dans un hôpital à 10h du matin, ils en ressortent à midi et vont déjeuner.

Effets physiques et effets cliniques dans quelques interventions

Sur les schémas n°4, 5, 6 (reproduits en annexe p 81-82) j'ai indiqué quelques-unes des applications du laser à des organes particuliers. J'ai caractérisé les

B. DECOMPS

interactions qui sont de nature thermique, celles qui font chauffer . Il y en a beaucoup parce que c'est ce qu'il y a de plus simple, de plus courant et c'est ce qui est aujourd'hui et de très loin, le plus utilisé. On va donc pouvoir faire de la prévention du décollement de la rétine (schéma n°7) , c'est l'application majeure des lasers aujourd'hui (700 lasers sur le parc des 1.200), on peut également faire de la chirurgie dentaire, on peut soigner des lésions des cordes vocales, de l'endoscopie urinaire, de la chirurgie tubaire, de la coloscopie, des brûlures, etc... Il faut mettre un point d'interrogation au sujet des tendinites parce qu'elles sont classées dans les effets dont on ne sait pas très bien s'ils existent ou non. Il y a un grand sportif français, un tennisman de niveau international, qui a eu quelques ennuis après avoir utilisé pendant trop longtemps un soft laser et pendant un an a perdu quelques points au classement international.

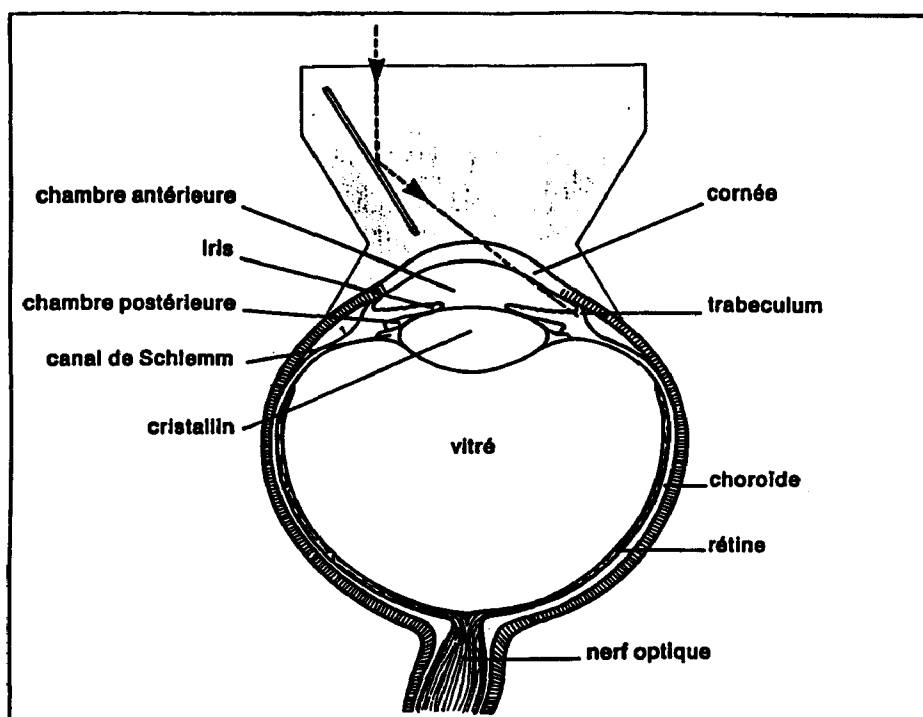


schéma n°7

Il y a un deuxième type d'effets qui vont utiliser la transposition d'une micro-explosion pour le traitement du glaucome et des suites des opérations de la cataracte, par exemple, ou pour volatiliser des calculs rénaux ou des calculs biliaires. Dernière découverte de l'utilisation de ces lasers, c'est la possibilité de déboucher les artères. Quand on sait que c'est une cause majeure de mortalité de notre population, tout le monde

peut regarder avec beaucoup d'attention tous les travaux qui sont effectués en France comme aux Etats-Unis ou à l'étranger sur ce type d'intervention par une technique nouvelle qui s'appelle la photoablation que j'exposerai plus loin.

Je vais tenter de vous expliquer comment cela marche. On peut distinguer d'une part quelques effets physiques. Tous les physiciens et les médecins croient à ces effets physiques (parce qu'ils ont la même culture). Tant qu'il n'y a pas d'effets physiques bien identifiés cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas un effet clinique mais on a quelques difficultés pour être sûr de le reproduire car c'est souvent par la bonne connaissance de ces effets physiques qu'on est capable d'optimiser l'effet clinique sans faire une expérimentation débridée et dans tous les sens. Première chose qui peut se passer : l'énergie lumineuse est absorbée et se dissipe sous forme thermique. En matière de chirurgie, ce n'est pas nouveau. Deuxièmement : l'absorption d'abord et ensuite une dissipation sous forme électro-mécanique. Il y a la création d'une petite boule de plasma qui se met à exploser et cette micro-explosion est d'un effet important. Troisièmement : une absorption suivie de réactions chimiques et cette photochimie par des lasers donne des effets tout à fait nouveaux.

Voilà pour ce qui est des effets physiques. Comment peut-on caractériser les effets cliniques et les séparer ? Je les ai classés en 4 grands types d'effets (schéma n°4 en annexe) Les 3 premiers sont clairs, le quatrième, sous réserve d'inventaire, je le marquerai sous cet effet processus autobiologique dans lequel on met une partie de ce qu'on ne comprend pas très bien. Les premiers : les **processus ablatifs**. on enlève, c'est de la coupe, de la fragmentation de calculs et de la photo-ablation par des lasers ultra-violet qui utilisent un mécanisme différent mais qui se traduit par des effets comparables. Ensuite, des **processus non-ablatifs** : le laser n'est pas utilisé pour couper mais pour obturer des vaisseaux, revitrifier la plaque dentaire par exemple, ou bien pour créer des micro-cavités à l'intérieur de l'oeil mais qui vont laisser tous les éléments en l'état pour simplement élargir un canal à l'intérieur de l'oeil. Troisièmement : les **processus photochimiques** qui permettent d'agir tout à fait sélectivement sur une cellule particulière dans un environnement particulier et de pouvoir la détruire si elle est détectée comme cellule tumorale ou cancéreuse sans détruire l'environnement. Il y a là pour l'instant un immense espoir et peut-être une révolution à venir des traitements chirurgicaux car on ne touche qu'une cellule. Ce n'est pas du tout de la chimiothérapie habituelle par laquelle on envoie malheureusement les éléments chimiques dans tout le corps même si on essaie de les focaliser sur tel et tel point. La photochimie permet de marquer spécifiquement la cellule que l'on cherche à soigner ou à éliminer. Je mets aussi dans cette catégorie l'acupuncture dont

B. DECOMPS

l'ensemble des processus ont été trouvés. En ce qui concerne les **processus photobiologiques**, certains sont évidents : quand on envoie de l'ultra-violet du vide, il y a des effets mutagènes, ce ne sont pas en général les effets recherchés. En revanche, la coutume et de nombreux slogans publicitaires prétendent qu'en achetant un laser on peut soigner soi-même sa tendinite, par exemple (le laser est en vente libre). Certains sportifs de haut niveau vous en diront du bien, d'autres du mal. Il y a des effets controversés mais c'est un marché immense : les 2/3 du marché du laser en Espagne, 50% du marché du laser en France.

Le phénomène de l'absorption. (schéma n°8) Et pourquoi cette absorption fait-elle des effets spécifiques ? J'ai tracé en fonction de la longueur, l'absorption de quelques éléments bien connus dans le corps humain. L'eau qui est le constituant

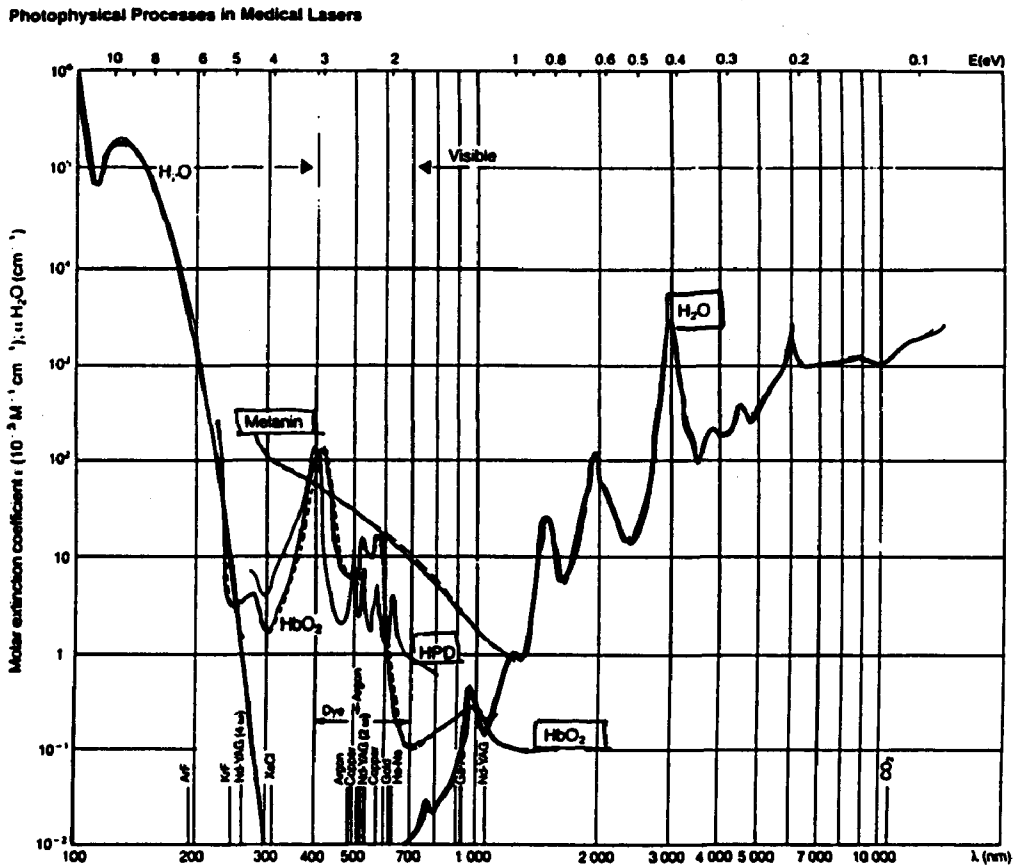


schéma n°8

essentiel du corps humain est très fortement absorbée dans l'ultra-violet, dans l'infrarouge lointain, peu absorbée voire pratiquement pas absorbée dans le visible. Tout le monde sait que l'on peut très bien voir le soleil à travers un verre d'eau. Cela prouve

tout simplement que l'eau n'absorbe pas le rayonnement visible, mais elle absorbe très bien l'ultra-violet assez lointain et l'infra-rouge. En conséquence le laser le plus courant, le laser CO² est un corps parfaitement absorbé par l'eau du corps humain et donc, comme il y a de l'eau dans tous les tissus, le laser à CO² va agir très facilement sur tous les tissus. En revanche, le laser à argon ne va toucher que les tissus fortement vascularisés dans lesquels on trouve de l'hémoglobine. Le laser à argon est assez bien absorbé par les tissus fortement vascularisés. La prévention du décollement de rétine, c'est précisément un traitement qui va jouer directement sur les vaisseaux sanguins du fond de l'oeil et pas sur les autres tissus. Cela marche précisément et cela a une indication spécifique à cause de cette spécificité de l'absorption sur le vaisseau sanguin et non sur la rétine. J'ai marqué également la mélanine qui explique pourquoi quand on va au soleil on revient bronzé et une courbe noire, extrêmement intéressante : c'est un dérivé de l'hématoporphyrine qui a la propriété de pouvoir se fixer sur certaines cellules ou plus exactement de rester dans l'environnement de certaines cellules et qui, autour de 7000 Angström est beaucoup plus fortement absorbé que tout le reste. En conséquence si on utilise un laser qui tape sur cette pointe on touche les cellules qui sont marquées par ce dérivé de l'hématoporphyrine et pas les cellules environnantes.

Les différents effets de l'absorption.

L'effet le plus courant est l'effet thermique. Que se passe-t-il quand il y a une absorption d'un faisceau laser par un tissu ? Nous avons d'une part, si l'énergie n'est pas trop forte, une augmentation de température modérée, à partir de 43-45° on commence à voir apparaître des changements conformationnels à l'intérieur des molécules, un phénomène de rétractation et des phénomènes d'hyperthermie. Ceci peut être obtenu avec des lasers hélium-néon de faible puissance, tels que ceux qui existent dans les caisses des supermarchés qui sont le domaine d'excellence des soft-lasers. On peut également les avoir avec des lasers à semi-conducteurs, ceux précisément qui existent dans les radio-cassette laser. Ce sont des lasers en vente libre et courante, ne demandant pas une indication médicale, que chacun peut acheter «à ses risques et périls». Certes, il y a des applications pour le traitement des douleurs de tendinite mais je crois que des contrôles de l'efficacité apparaissent tout à fait indispensables. Il existe quelques processus permettant d'expliquer partiellement qu'il y ait des effets mais à ma connaissance, jusqu'à présent, aucune explication complète de l'effet sur la douleur ne peut être réellement apportée. Les choses plus reproductibles et en

B. DECOMPS

tous cas incontestables commencent à se produire à partir de 60° où il y a une dénaturation des protéines comme les phénomènes de coagulation, ce qui veut dire non pas que l'on coupe mais au contraire qu'on bouche des artères, on évite les saignements et c'est tout le traitement de l'hémostase qui commence entre 60 et 80°. C'est le domaine d'utilisation de l'ophtalmologie, le laser le plus utilisé étant le laser à argon et quelquefois des lasers à krypton pour quelques applications plus spécifiques notamment en dermatologie pour différentes affections. Au-delà de 80°, c'est la dénaturation du collagène, perméabilisation membranaire et évidemment quand on arrive à 100° (la marmite se met à sauter), il y a vaporisation des tissus qui entraînent le phénomène d'ablation. Le laser le plus indiqué pour l'ablation c'est la laser à CO² parce que c'est celui qui a le plus fort rendement et qui marche bien. Son seul inconvénient est de ne pas pouvoir être porté par une fibre optique et par conséquent de nécessiter un bras articulé, ce qui l'interdit pour toutes les applications pour les organes internes. Le laser à argon et à krypton marchent quand même moins bien que le laser à CO². Le laser à YAG-dopé néodym est très intéressant. C'est un grenat yttrium tout à fait particulier et il a des applications très spectaculaires notamment en gastro-entérologie et en urologie. Enfin, dans certains cas, on peut utiliser des lasers à colorants en ajustant les longueurs d'ondes. Ces lasers à colorants peuvent présenter quelques avantages spécifiques.

Il y a une zone dans laquelle on a 100°, autour il y a une zone à 60°, donc tout l'art du «super chirurgien» laser est de couper en faisant le l'hémostase autour. La grande question qui préoccupe encore de nombreux chirurgiens est de savoir si le scalpel parfaitement hémostatique est du domaine du rêve ou, aujourd'hui, de la réalité ? (schéma n°9). La zone de recouvrement entre les deux phénomènes vous a été exposée et il est parfaitement clair que c'est la réalité. Un grand quotidien du matin a rapporté récemment que l'on avait pu réaliser la circoncision d'un hémophile avec un laser. C'est une publicité comme une autre pour le laser mais je vous le cite parce que cela m'a paru assez spectaculaire.

Si on couple un laser qui coupe comme le laser à CO² et un laser comme le laser à argon qui a de bonnes propriétés hémostatiques, on réalise l'outil miracle mais un outil deux fois plus cher et encombrant. Mais il y a mieux que d'utiliser deux lasers, c'est de jouer sur la durée d'impulsion. Le raisonnement le plus simple pour comprendre cela est un raisonnement culinaire : tout le monde sait très bien que si on veut un beefsteak saignant, il faut chauffer fort et peu de temps. La quantité

schéma n°9

LE SCALPEL HÉMOSTATIQUE; RÊVE OU RÉALITÉ ?

1. Principe

- zone de recouvrement coupe - hémostase
- perfectionnement : utilisation successive ou simultanée de plusieurs focalisations de plusieurs lasers à $\lambda \neq$

2. Optimisation de l'hémostase

- choix Ar⁺, Kr⁺, colorants (ophtalmologie)
- laser à Ge, laser à Au

3 Comment limiter les effets de denaturation des tissus adjacents ?

A le fonctionnement en impulsions courtes :

- la diffusion thermique $d^2 = 4 \chi t$
- absorption sur profondeur $d = \frac{1}{\alpha} (e^{-\alpha L})$
- temps de relax. thermique $\tau = (4 \chi \alpha^2)^{-1}$
- impulsions $\theta < \tau$

ex de l'eau (\approx tissus dans iR et iRL)

Laser	CO ₂	Er: YAG	Ho: YAG
λ (μ m)	10,6	2,9	2,1
d (μ m)	13	1	65
τ (μ s)	325	1,9	8125

\Rightarrow CO₂ impulsions (0,1 ms) 50 μ m
 Er: YAG (1 μ s, 10 hertz, 15/impulsion)
 néo-se sur 10-20 μ m
 fibres en développement.

B. La photo-ablation UV

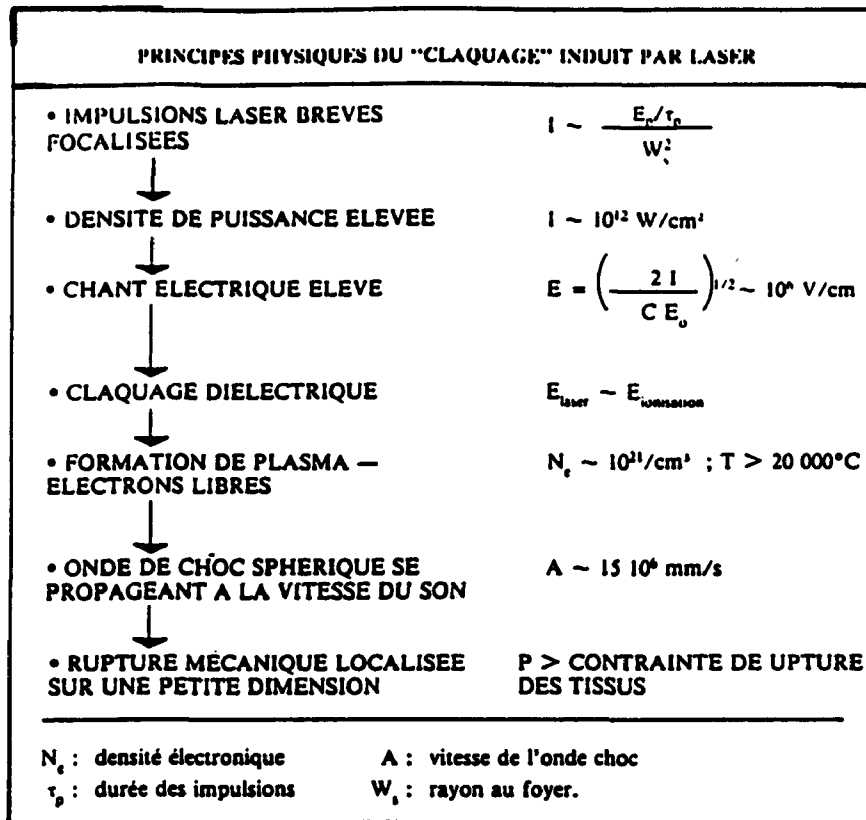
d'énergie sera la même que si vous utilisez un chauffage modéré et long pour obtenir un steak bien cuit. Si vous voulez avoir un effet sur les bords, un effet de coupe important et peu d'effet en profondeur, vous utiliserez un laser en impulsions courtes et si vous voulez au contraire avoir un effet en profondeur qui lui va avoir une préférence hémostatique, il faudra utiliser des impulsions plus longues et une puissance beaucoup plus modérée. Mais on peut faire mieux en faisant des raisonnements mathématiques (la théorie a du bon) : j'ai élaboré une petite théorie très simple à partir de l'équation de diffusion de chaleur. On va pouvoir définir une durée optimale permettant d'avoir les effets sur la zone la plus réduite possible. Elle dépend de la longueur d'onde et pour chaque longueur d'onde et pour chaque tissu, on peut dire quelle va être la durée maximum au-delà de laquelle on va faire des dégâts. Cette durée est très variable.

Les effets électromécaniques

Ils demandent des impulsions laser très brèves, (schéma n°10) du milliardième de seconde et même du millième de milliardième de seconde. Si on a des lasers de puissance très faible, la densité de puissance est très élevée, on a une absorption qui n'est plus linéaire, tout absorbe, même l'eau pure absorbe à n'importe quelle longueur d'onde, par des effets dit multiphotoniques. On a un champ électrique très élevé, on arrache à peu près tous les électrons et on crée une boule de plasma. Cette boule de plasma gonfle au fur et à mesure que les impulsions arrivent. Sur une échelle de temps qui est logarithmique, j'ai représenté la courbe d'un laser et montré par des petits calculs que l'on crée une boule de plasma dont le rayon augmente petit à petit avec le temps. Et on arrive à obtenir des rayons de l'ordre du 1/10ème de millimètre dans un tissu, dans un milieu totalement transparent sans apporter de l'énergie de façon notable, donc sans augmenter la température de façon appréciable.

Ces possibilités offrent un intérêt évident quand on fait de la chirurgie intra-oculaire parce que, quand on veut toucher à l'intérieur de l'oeil, il faut absolument éviter une augmentation locale de température, c'est très strict, il ne faut pas dépasser 42 ou 43°, température à partir de laquelle on risque d'engendrer un point de cristallisation à partir duquel peut se développer un phénomène de cataracte. Si on veut faire une petite intervention à l'intérieur de l'oeil, et qu'on apporte un peu trop d'énergie on casse tout ce que l'on veut, on peut couper des brides, faire des traitements mais un mois, deux mois après un phénomène de cataracte démarre et l'oeil risque d'être

perdu. En revanche, avec les traitements cités plus haut, on obtient des petites



Evolution temporelle des paramètres du plasma (densité électronique N_e , rayon du plasma R , pression p), pour un claquage induit par laser impulsionnel de 25ps avec une énergie de 0,5mJ.

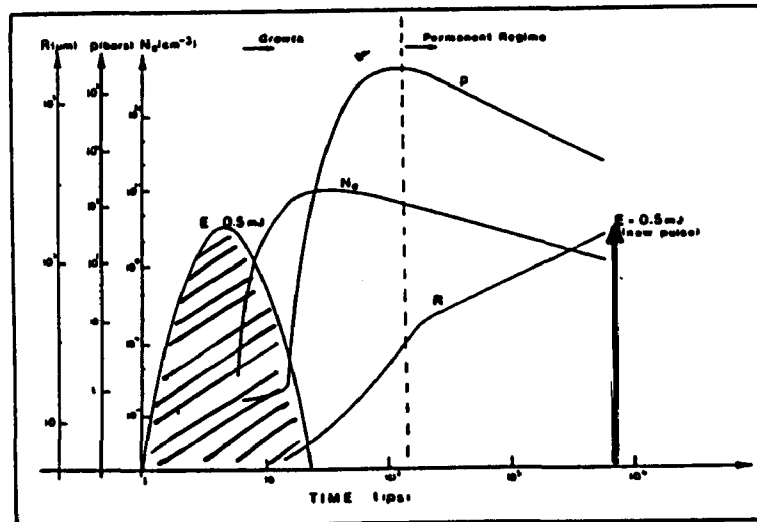


schéma n°10

cavités avec un risque à peu près nul de cataracte post-opératoire. Ces effets électro mécaniques ont été mis au point notamment en France par une équipe couplée d'un

B. DECOMPS

physicien, M. Griesman de Saclay, et d'un médecin, Mme Aron-Rosa, professeur (Paris-Créteil), à une époque (1981) où la nouvelle a fait l'objet d'une bombe parce que c'était devenu un dogme qu'il était impossible de faire des opérations intra-oculaires avec un laser. On pouvait faire de la prévention du décollement de rétine mais toutes les expériences entre 1965 et 1980 avaient inéluctablement conduit à des phénomènes de cataracte au bout d'un certain temps. Ces médecins physiciens ont montré qu'il y avait là une voie permettant de faire de la chirurgie intra-oculaire sans danger de cataracte. Et c'est aujourd'hui utilisé de façon courante pour les traitements de la cataracte ou également pour le traitement du glaucome, affection tout à fait répandue, qui se traduit par le fait qu'un canal, le canal de Schlemm se trouve bouché et de ce fait des gonflements et des pressions se produisent. C'est extrêmement douloureux. On peut déboucher ce canal et faire un traitement chronique du glaucome avec des lasers pico-seconde.

Deuxième application de ces effets électromécaniques : le traitement des calculs rénaux. Tout le monde sait qu'il existe d'autres méthodes, les ultra-sons servent également mais ils ne peuvent pas servir dans toutes les positions du calcul rénal, en particulier parce que le son ne va pas franchir les os du bassin et par conséquent il y a des calculs que l'on ne peut pas soigner avec des méthodes à ultra-sons et qui en revanche se traiteront très bien avec le laser. Au début on crée un petit plasma, cette boule de plasma augmente et fait exploser le calcul.

Tout ceci ne fait pas autant rêver que la dernière des applications potentielles : la **thérapie photodynamique**. Il s'agit de faire absorber un colorant par un malade soupçonné d'une tumeur. Ce colorant, chimiquement neutre (dérivé de l'hématoporphyrine est couramment utilisé), passe partout. Au bout de 48 heures, il va rester dans des endroits, parce que précisément dans les tissus cancéreux, le drainage lymphatique se faisant mal, il reste alors qu'il est éliminé partout ailleurs. Ce colorant a donc la propriété d'absorber un laser particulier. Si on a un laser à colorant ajustable on ira dans les 7000 angström nécessaires pour exciter ce colorant. Il commencera par se désexciter spontanément et, par échange, il prendra une molécule d'oxygène dans son état fondamental. Il portera cette molécule dans un état excité qui devient un poison des cellules : c'est l'oxygène singulier. Par conséquent, on crée le poison à l'endroit où est resté le colorant, au point même de la tumeur. On a donc la possibilité de marquer une tumeur, d'éclairer n'importe où mais on n'a d'efficacité que s'il y a la molécule de colorant qui reste fixe.

Cette découverte date de la fin des années 70 et on a dit à l'époque qu'on ouvrait un champ immense. En réalité c'est difficile parce qu'on n'a pas encore trouvé le colorant idéal. Ce colorant idéal serait un colorant qui absorberait de façon infiniment plus forte que les tissus ambiants et comme il y a peu d'hématoporphyrine, le contraste est mauvais. Depuis, on essaie avec le laser à cuivre, quand on a des moyens on essaie avec le laser à or. On espérait pouvoir jouer en particulier sur des séquences et sur les anticorps monoclonaux. L'été 88, aux Etats-Unis, il y a eu une centaine de colloques sur les lasers en médecine, chacun réunissant 500 praticiens. Il y a donc un effort absolument gigantesque et les trois-quarts traitent de ce problème. Le rêve serait de pouvoir marquer par un colorant un anticorps monoclonal ayant la propriété d'aller rechercher les cellules cancéreuses, les cellules dont la surface est spécifique et quand on l'a vu, il n'y a plus qu'à utiliser cette propriété de thérapie photodynamique pour tuer une cellule mais pas les autres.

Le coût des applications lasers

Est-ce que cela coûte beaucoup d'argent, comme disent les économistes ? Ce n'est pas une question absurde et immorale. Pour un physicien, cette question est importante. On aide à mettre au point de nouvelles procédures mais applicables à 1/1000ème de la population de la France et 1/1.000.000ème de la population du monde ou on met au point des procédures qui, au contraire, amélioreront le soin collectif. Travaille-t-on pour une médecine de riche ou au contraire pour une médecine pour tous ? La réponse est ambiguë parce que d'un certain côté, il y a des investissements considérables. Quatre ou cinq lasers, c'est 5 millions de francs. On ne peut pas en mettre partout. En revanche, ce sont des traitements qui diminuent, quelquefois réduisent à zéro la durée d'hospitalisation. Vous savez que la durée d'hospitalisation coûte aussi cher que la partie proprement chirurgicale, que la partie médicale : ce qu'on a dépensé d'un côté, on n'a pas à le dépenser de l'autre. C'est une vue d'économiste parce qu'une fois que l'hôpital est construit, qu'il y ait des malades ou pas, cela coûte le même prix dira-t-on du point de vue des directeurs d'hôpitaux, donc remplissons-les. Du point de vue des économistes, on évitera de construire de nouveaux hôpitaux. Des américains ont fait comparaison entre le coût d'une opération d'un polype de la vessie par les méthodes traditionnelles en incluant les charges d'hospitalisation et le coût de la même intervention par laser. Le rapport est de 4 à 1.

Je n'ai parlé que des applications directement chirurgicales. Vous imaginez

B. DECOMPS

que la gamme des applications pour le diagnostic est immense mais celle-là se différencie moins, je dirais, de l'activité normale du physicien, c'est la raison pour laquelle je n'y ai pas consacré autant d'intérêt. Mais il faut savoir qu'on pense à des méthodes qui pourraient éventuellement égaler et si possible supplanter la RMN pour faire de la détection localisée non seulement de telle ou telle affection mais même de tel ou tel composant moléculaire ultra-précis à l'intérieur du corps avec une résolution spatiale tout à fait parfaite. Aujourd'hui ce type de dispositif nécessite des lasers pour lequel il existe en France une équipe qui sait correctement les manipuler (ou deux, voire trois qui sauraient le faire) et la diffusion en serait aussi délicate que celle des lasers traditionnels.

Bernard DECOMPS
Professeur à l'Université Paris-Nord
Vice-président du Conseil Supérieur
de la Recherche et de la Technologie

ANNEXES

effets cliniques / physiques	absorption et dissipation thermique	absorption et dissipation électromécanique	absorption et réactions chimiques
processus ablatifs	coupe fragmentation		photo ablation UV
processus non-ablatifs	hémostase revitrification	micro-cavités intraoculaires	
processus photochimiques			thérapie photodynamique acupuncture
processus photobiologiques	photosensibilisation?		effet mutagène

schéma n° 4

	domaine	laser	applications	remarques
43-45° C changements conformationnels rétraction, hyperthermie	B I O S T I M U L A T I O N	He - Ne	douleurs, tendinites	"self-laser" contrôles indispensables
50° C réduction de l'activité enzymatique		s - c		
60° C dénaturation protéini- que, coagulation	H E M O S T A S E	Ar ⁺ , Kr ⁺	optalmologie dermatologie	le plus fréquent
80° C dénaturation du colla- gène, perméabilisation membranaire		CO ₂		
100° C vaporisation et ablation	A B L A T I O N	Ar ⁺ , Kr ⁺ YAG col	gastro-entérologie urologie bronchologie	fibres robotisation

schéma n°6

