Protection laser

G. F. SANTUCCI (*)

(Manuscrit reçu le 3 décembre 1976)

RÉSUMÉ

Après un rappel schématique des données physiques nécessaires à l'étude des effets biologiques du Laser, on présente les mécanismes de l'action biologique du rayonnement Laser. Les effets sur l'œil et la peau sont rappelés, puis les moyens de protection. Ces moyens sont de deux types, collectifs et individuels. Les mesures collectives ne sont pas présentées de façon exhaustive mais on essaie d'en faire ressortir l'esprit qui doit présider à l'établissement des règles. Certaines normes sont données à titre d'exemple. Si les moyens de protection individuels sont cités, l'auteur insiste surtout sur le fait que la protection collective est la meilleure et la plus fiable.

ABSTRACT

After a short review of the physical data on laser needed for the study of their biological effects, the mechanisms of the biological action of laser radiation are presented, especially on the eye and skin. The means of protection, both collective and individual, are presented. Collective protection is not reviewed exhaustively, the emphasis is laid on the mind that should govern the establishment of regulations. Some standards are given as examples. As to individual protection, it is stressed that collective protection is better and more secure.

I. — INTRODUCTION

C'est en 1960 que Thomas MAIMAN réalisa le premier MASER (**) optique à rubis inaugurant ainsi l'ère du LASER (***). En 16 ans, la technologie LASER a connu un essor considérable et ses applications sont difficilement recensables tant elles sont nombreuses. L'utilisation du LASER n'est pas sans innocuité pour l'être humain. Sa grande diffusion implique que l'on soit averti de la

(*) Centre de Recherches de Médecine Aéronautique, 5 bis, avenue de la Porte-de-Sèvres, 75731 Paris Cedex 15.

(**) MASER : Sigle de « Microwaves Amplifier by Stimulated Emission of Radiation ».

(***) LASER : Sigle de « Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation ».

nature, de l'importance du risque et des moyens de prévention. Tel est le but de cet exposé qui traitera du rayonnement LASER au sens large du terme : radiations du spectre visible mais aussi celles de la gamme des ultraviolets et des infrarouges proches et lointains.

1° LA LUMIÈRE « SPONTANÉE »

Les sources lumineuses sont nombreuses (soleil, lampes de nature diverse, bioluminescence, etc.). Toutes peuvent être rattachées au « corps noir » des physiciens. Ce corps noir est une enceinte isotherme qui absorbe tous les rayonnements internes sauf ceux qui peuvent s'échapper par une petite ouverture strictement définie. Lorsque ce corps est chauffé, il émet un rayonnement qui varie en fonction de la température d'échauffement. Ce rayonnement se caractérise par le spectre des radiations qui le composent, radiations elles-mêmes définies par la longueur d'onde et l'énergie véhiculée.

Cette énergie est sous forme de grains, les photons, vibrant selon une certaine fréquence. L'émission de photons se produit lorsque les niveaux d'énergie d'un atome changent en diminuant. L'absorption de lumière provoque, au contraire, une augmentation des niveaux d'énergie. L'émission des photons se fait à des instants aléatoires et de façon isotrope, c'est-à-dire que l'intensité du rayonnement est indépendante de la direction d'émission.

2° LE LASER

Le principe schématique du LASER est de provoquer une émission de photons, non pas anarchique mais selon des caractéristiques précises de fréquence, de direction, et à des instants choisis. Pour ce faire, il faut exciter de manière adéquate les atomes du corps émissif. Au lieu d'une émission spontanée, on a alors une émission induite. L'induction de l'émission est obtenue par pompage dans une cavité résonnante à faible perte. Les milieux actifs, c'est-à-dire émissifs, sont divers et variés, de même que les mécanismes de pompage. Pour une bonne connaissance, nous renvoyons le lecteur à des ouvrages spécialisés dont quelques-uns sont cités en bibliographie. On peut résumer simplement l'ensemble selon le schéma succinct ci-dessous :

Le LASER se compose d'un milieu actif rendu amplificateur par un mécanisme de pompage approprié et enfermé dans une cavité résonnante à faible perte. Celle-ci est généralement constituée de deux miroirs d'axe commun placés en regard dont l'un, légèrement transparent, livre passage au faisceau de sortie. Ce dernier affecte la forme d'un pinceau fin et très brillant, de révolution autour d'un axe, dont l'étalement croît très lentement lorsqu'on s'éloigne du LASER.

3° LES PARAMÈTRES LASER

La lumière LASER est une source de lumière cohérente dans l'espace et dans le temps, c'est-à-dire qu'elle est rigoureusement monochromatique, collimatée, et dont toutes les ondes sont accordées entre elles. Une émission LASER se caractérise par un certain nombre de paramètres essentiels :

- la longueur d'onde,
- la durée de l'émission,
- l'énergie ou la puissance transportée,
- la divergence du faisceau,
- le diamètre du faisceau,
- la répétition des impulsions.

a) *La longueur d'onde*

Si l'on considère la définition stricte du LASER elle est comprise entre 400 et 700 nm. En fait, maintenant, la dénomination a été étendue à un spectre beaucoup plus large comprenant l'ultraviolet (moins de 400 nm) et l'infrarouge (au-delà de 700 à 750 nm). L'importance de la connaissance de ce paramètre apparaît lorsqu'on envisage les effets biologiques comme nous le verrons ultérieurement, en particulier au niveau de l'œil.

b) *La durée de l'émission*

Selon le milieu actif, la technologie utilisée pour le milieu actif, le pompage, etc., l'émission LASER peut se faire selon trois modes :

— En impulsions déclenchées ou « Q Switch ».

Elles ont une durée de quelques picosecondes à quelques centaines de nanosecondes. La fréquence de répétition est très variable : de plusieurs mégahertz à quelques impulsions par heure.

— En impulsions relaxées ou « Pulsed LASER ».

La durée varie d'une microseconde à 1/10 de seconde et la fréquence de répétition d'une dizaine par seconde à une par minute.

— En émission continue (CW : Continuous waves).

Conventionnellement, la durée d'émission est supérieure à 1/10 s. Les LASERS fonctionnant selon ce mode sont souvent de faible puissance.

c) *Energie ou puissance transportée*

L'unité d'énergie est le joule (J). Pour les LASERS à impulsions déclenchées, ou relaxées, on exprime l'énergie délivrée au cours d'une impulsion. Les niveaux atteints en mode relaxé vont de 0,1 joule à plusieurs dizaines de joules, alors qu'en impulsions déclenchées on peut obtenir quelques joules en quelques nanosecondes, ce qui donne des puissances de crête considérables (du mégawatt au gigawatt).

Pour les LASERS à émission continue, le facteur temps doit être pris en compte et l'on parlera donc de puissance (énergie par unité de temps). L'unité est le watt (W). Les puissances émises varient du milliwatt à plusieurs kilowatts.

La répartition de l'énergie dans le faisceau n'est pas strictement uniforme mais se fait, le plus souvent, selon un mode gaussien (figure ci-dessous) :

e = Eclairement énergétique ou « irradiance » anglo-saxonne.

d) *La divergence du faisceau*

L'énergie transportée par le faisceau peut être concentrée sur de petites surfaces ou bien étalée, selon le type d'application. Ceci se fait par des systèmes optiques. Mais le diamètre du faisceau émergeant du tube LASER n'est pas constant en s'éloignant de la source. On parle alors de divergence naturelle, elle s'exprime en radians. Pour un faisceau sensiblement circulaire et gaussien, c'est la divergence définie aux points $1/e$ d'éclairement énergétique de crête. Elle est approximativement égale à 0,7 de l'angle complet de

divergence du faisceau du cône circulaire droit qui contient 90 p. cent de l'énergie LASER totale dans le champ éloigné.

e) *Diamètre du faisceau émergent*

Du fait de la divergence naturelle, le diamètre du faisceau varie et il importe donc de définir les conditions dans lesquelles il est mesuré. Par exemple, pour un faisceau gaussien, on définit le diamètre en centimètres (cm) par les points $1/e$ d'éclairement énergétique de crête.

f) *Pour les LASERS non continus* il est évident qu'il faut aussi préciser la fréquence de répétition des impulsions. Elle est exprimée en hertz (Hz).

En conclusion, il existe un grand nombre de LASERS, à solides, à liquides, ioniques, à gaz, à semi-conducteurs, etc. Pour le biologiste, ce qui importe en fait est le rayonnement lui-même, plus que la source. Les paramètres utiles sont donc ceux qui décrivent le faisceau et c'est pour cela que nous n'avons retenu que les paramètres cités ci-dessus.

II. — LES EFFETS BIOLOGIQUES DU LASER

Le rayonnement LASER permet d'obtenir de très fortes concentrations lumineuses. Les réactions de la matière soumise à un rayonnement électromagnétique sont fonction de l'énergie reçue par cette matière. L'énergie absorbée dépend de trois facteurs : l'intensité et la répartition spectrale de l'énergie incidente et la nature du matériau cible. Sans développer la théorie physique qui explique le mode d'intervention, disons qu'il existe deux grandes théories expliquant l'absorption de l'énergie par la matière vivante.

— La première (GOLDMAN, BARNES) : l'absorption d'un seul photon entraîne des variations dans la répartition des niveaux d'énergie de l'atome.

— La deuxième (ROUNDS, OLSON, etc.) : deux photons sont absorbés, mais les deux photons de même fréquence s'unissent pour n'entraîner qu'un seul phénomène d'absorption.

Il existe encore d'autres hypothèses pour expliquer les mécanismes d'absorption.

Les effets consécutifs à cette absorption d'énergie se classent en trois groupes :

- Effets thermiques.
- Effets mécaniques.
- Effets sur le champ électromagnétique.

1° LES EFFETS THERMIQUES

L'énergie apportée par un rayonnement LASER sur une cible pigmentée est suffisante, la plupart du temps, pour entraîner une nette augmentation

de l'état d'excitation des atomes, ce qui provoque une augmentation de l'agitation moléculaire. L'augmentation de la température locale est plus ou moins bien tolérée, selon son importance. Au-delà d'un certain seuil, il se produit une désorganisation des systèmes moléculaires qui peut devenir irréversible, en particulier pour les protéines. D'autre part, il peut se développer des réactions thermochimiques qui, du fait des nouveaux composés formés, vont entraîner des bouleversements de la structure biologique. L'extension des lésions se fait en fonction de la nature des milieux et de leur capacité de diffusion thermique.

La complexité et l'hétérogénéité de la matière vivante rendent difficile l'établissement de règles précises permettant la définition de modèles rigoureux de l'action biologique thermique du LASER. Cependant, d'un point de vue pratique, il faut retenir que l'impact LASER entraîne une « brûlure » plus ou moins importante et profonde selon la matière pigmentée ou la structure biologique.

2° EFFETS MÉCANIQUES

Ils peuvent être divisés en deux sous-groupes au niveau du point d'impact :

- L'effet dû à l'augmentation brutale de pression *in situ*. Le passage d'un front de haute pression peut provoquer des ruptures tissulaires sur le lieu de l'impact initial.
- Selon la nature du tissu atteint, il peut se produire des phénomènes de cavitation analogues à ceux produits par des ultrasons. La taille des bulles ainsi formées peut être suffisamment grande pour être visible directement dans l'œil lors de l'utilisation thérapeutique du LASER.

Ces effets mécaniques peuvent avoir un retentissement à distance du lieu d'impact du rayon par ébranlement et propagation de l'onde de choc d'une structure à l'autre. Outre les effets proprement mécaniques, des réactions chimiques peuvent en découler. En effet, dans les bulles de microcavitation les changements physiques de la matière peuvent permettre le déroulement d'un certain nombre de réactions chimiques.

3° LES MODIFICATIONS DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Si elles ont été soupçonnées du fait que la force du champ magnétique, associée à la puissance de crête d'un LASER à impulsions, peut dépasser 10 V/cm, les preuves expérimentales sont peu nombreuses. Cependant, certains auteurs ont montré la formation de radicaux libres dans des tissus pigmentés lors d'une irradiation LASER. Le mécanisme en est différent de celui des sources de radiations ionisantes.

Au total, si les effets thermiques sont les plus connus et les plus utilisés, les effets mécaniques et les effets sur le champ électromagnétique méritent d'être approfondis.

Le LASER et la biologie ont des rapports à plusieurs niveaux :

● Le LASER peut être utilisé sous diverses formes pour comprendre des phénomènes biologiques, soit par l'approfondissement du mode d'action, soit comme outil permettant des manipulations précises, et en particulier des micromanipulations.

● La thérapeutique par LASER est en plein essor. Les ophtalmologistes ont utilisé très tôt le « bistouri lumière » et leur expérience, en ce domaine, est grande. Mais d'autres secteurs de la médecine développent les applications du LASER (O.R.L., dermatologie, odontologie, etc.) ; chaque fois que la lésion peut être vue *in situ* par le médecin, on peut penser LASER.

● L'aide au diagnostic : elle peut être multiforme — réfractométrie objective de l'œil, holographie de certains organes, compteurs de globules rouges, etc.

Lorsqu'on essaie de recenser les applications du LASER à la biologie et à la médecine on se rend rapidement compte que, bien qu'elles soient déjà très nombreuses, elles ne constituent qu'un début.

Hors du domaine biologique, les applications du LASER sont innombrables et peuvent être sources de dangers pour l'homme. En biologie, les effets sur la matière vivante sont voulus et relativement bien contrôlés. Pour les autres domaines, les LASERS utilisés n'ont pas la même finalité et des accidents peuvent survenir.

III. — LES RISQUES POUR L'HOMME

Actuellement on considère que deux organes sont particulièrement vulnérables au rayonnement LASER : l'œil et la peau.

1^o EFFETS DU RAYONNEMENT LASER SUR L'ŒIL

Ils sont fonction des caractéristiques du rayonnement d'une part et de l'œil d'autre part.

a) *Le rayonnement*

Tous les paramètres, sauf la longueur d'onde, exposés au chapitre I interviennent dans les formules (1) et (2) (p. 152) qui permettent de définir les normes de sécurité.

b) *Les différentes structures de l'œil*

1) Les différentes structures de l'œil présentent une vulnérabilité plus ou moins grande selon la longueur d'onde du rayonnement. En effet, la pigmentation est variable et conditionne l'absorption. De même, la transmission

des radiations dans les divers milieux de l'œil n'est pas identique. Ainsi, les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 0,4 nm et supérieure à 1,4 nm sont arrêtés par la cornée ou au niveau de la conjonctive. La rétine est relativement protégée pour ces radiations ; par contre, elle est très vulnérable au spectre visible.

2) Les milieux transparents de l'œil forment un système optique qui va focaliser le faisceau sur la membrane noble, la rétine. L'énergie sera donc plus concentrée, et la densité énergétique peut être 5×10^5 fois plus importante qu'au niveau de la cornée.

3) La rétine est composée de plusieurs couches, avec, en particulier, une couche très pigmentée, l'*épithélium pigmentaire* qui va absorber toutes les radiations du spectre visible.

4) La localisation de l'impact au niveau de la rétine doit être considérée. L'atteinte de la fovea (*œil de l'œil*) entraîne la perte de l'acuité visuelle alors qu'une lésion périphérique n'entraînera aucune gêne fonctionnelle.

5) La pupille. Le rideau irien peut jouer le rôle d'écran et protéger la rétine. La taille de la pupille varie selon les conditions d'éclairement. Les forts éclaircissements la rétrécissent. Malheureusement, les temps de réponse à l'illumination sont lents en regard d'une impulsion LASER et la lésion rétinienne peut être créée avant la contraction pupillaire.

c) Les lésions oculaires

● Au niveau de la rétine.

L'effet thermique est le mieux connu actuellement. Il provoque une brûlure avec coagulation et destruction tissulaire prédominante au niveau de l'épithélium pigmentaire. Des réactions de voisinage apparaissent, œdème, mort des photorécepteurs et dégénérescence des autres couches rétinienne, ceci pour les grosses lésions visibles ophtalmologiquement. Les délais d'apparition des lésions sont variables.

Dans la détermination des énergies minimales, admissibles au niveau de la rétine, le problème du choix du critère lésionnel s'est posé et n'est pas définitivement résolu. La lésion visible ophtalmologiquement, apparue soit au moment de l'impact, soit dans les heures suivantes, est un critère évident. Mais certains pensent qu'il est insuffisant et que l'on doit utiliser les méthodes faisant appel au microscope optique et même électronique.

Le problème se pose aussi de faire la part entre les lésions réversibles et les définitives. Outre ces critères anatomiques, il faut envisager des critères fonctionnels. Ils doivent permettre d'apprécier la perturbation apportée par une irradiation LASER n'ayant pas entraîné de lésion anatomique mais créé, cependant, un dysfonctionnement visuel du type de l'éblouissement, par exemple.

● Au niveau des autres structures de l'œil.

Au niveau de la cornée et de la conjonctive, on peut avoir, avec des LASERS de longueur d'onde hors du visible, des lésions du type kératite ou conjonctivite ou bien des brûlures. De même, au niveau du cristallin on peut voir apparaître des cataractes. Ces lésions sont essentiellement dues aux effets thermiques. Les effets mécaniques peuvent provoquer, par ailleurs, des érosions cornéennes, des éclatements du cristallin ou l'apparition de bulles, d'hémorragies dans le vitré. Il semble que ces atteintes, observées expérimentalement chez le singe, soient surtout le fait des LASERS à impulsions de forte puissance.

2° LES EFFETS SUR LA PEAU

La peau est un organe opaque dont les facteurs de réflexion et d'absorption varient selon la pigmentation et la longueur d'onde du rayonnement. Par ailleurs, la structure de la peau n'est pas identique partout. Il existe des zones hyperkératosiques et des zones où, la peau étant plus fine, la zone germinative plus près de la surface est plus vulnérable. Une irradiation LASER peut donc entraîner, selon les caractéristiques du rayonnement et la zone tégumentaire visée, une gamme de lésions très étendue : de la simple éraillure des couches cornées à la constitution d'une escarre profonde atteignant les tissus sous-cutanés.

Les longueurs d'ondes les plus agressives sont celles situées hors de l'intervalle de 400 à 1 400 nm. Dans cet intervalle, les peaux claires réfléchissent assez bien les rayons incidents, les peaux pigmentées également, bien qu'à un niveau moindre.

IV. — PROTECTION CONTRE LE RAYONNEMENT LASER

Des études ont été menées pour définir des normes de sécurité et des moyens de protection. Les résultats acquis permettent d'assurer déjà une bonne protection. Mais la technologie LASER étant en constante évolution, il faut considérer que ces données ne sont pas définitives. La protection ne doit pas concerner uniquement le rayonnement LASER, il faut tenir compte aussi des risques liés à l'installation génératrice.

Les organes les plus visés sont, nous l'avons dit, la peau et l'œil. On peut classer les moyens de protection en deux grands groupes : individuels et collectifs.

Protection de l'œil

1. *Moyens collectifs*

1.1. Distance de sécurité pour l'observation directe ou non.

Le but est de définir des zones où l'éclairement énergétique reçu, au niveau de l'œil, est sans danger. Il existe une formule qui, en fonction des caracté-

ristiques de l'émission LASER et de la distance d'observation, permet de calculer l'éclairement au plan cornéen :

$$\text{Eclairement énergétique, } E = \frac{1,27 P e^{-\mu R}}{(d + \varphi R)^2} \quad (1)$$

$$\text{Exposition énergétique, } H = \frac{1,27 Q e^{-\mu R}}{(d + \varphi R)^2} \quad (2)$$

où Q = énergie rayonnante en joules,

P = puissance en watts,

R = distance d'observation en centimètres,

d = diamètre du faisceau en centimètres,

φ = divergence du faisceau en radians.

(d et φ étant mesurés dans les conditions définies dans le chapitre 1.)

$e^{-\mu R}$ est le coefficient d'atténuation atmosphérique où μ est le coefficient d'extinction atmosphérique à la longueur d'onde concernée. Si μ n'est pas connu, l'expression $e^{-\mu R}$ peut être assimilée à 1.

A partir de ces formules on obtient R , distance de sécurité, en connaissant l'éclairement énergétique n'entraînant pas de lésion de l'œil. Nous avons indiqué déjà des difficultés du choix du critère lésionnel. De nombreuses équipes travaillent sur ce problème et les seuils donnés dans les tableaux I et II à titre indicatif, sont susceptibles de modifications à plus ou moins long terme.

Il faut remarquer que le tableau I concerne la vue directe alors que le tableau II se rapporte à un rayonnement réfléchi ou bien issu d'une source étendue. Pour la lumière réfléchie, il faut tenir compte de la matière et de la géométrie de la surface réfléchissante. Ces paramètres définissent la réflexion qui peut être quasi intégrale ou désorganiser totalement le faisceau, diminuant alors de façon considérable le risque. Enfin, il faut envisager l'observation du LASER à travers un instrument d'optique grossissant. On doit alors tenir compte du pouvoir grossissant M de l'instrument et de son coefficient de transmission (τ) en modifiant l'équation (1) et (2), qui donne alors :

$$E = \frac{1,27 P (e^{-\mu R} \tau M^2)}{(d + \varphi R)^2}$$

$$H = \frac{1,27 Q (e^{-\mu R} \tau M^2)}{(d + \varphi R)^2}$$

1.2. Mesures concernant l'environnement

Les champs d'application du LASER sont nombreux et variés allant du LASER de très grande puissance, utilisé en milieu clos, au LASER d'alignement sur un chantier. D'autre part, le LASER, qui, selon la définition précise, devrait toujours être visible, peut être en fait, d'une longueur d'onde

TABLEAU I

NORMES DE PROTECTION POUR L'EXPOSITION DE L'ŒIL EN VUE DIRECTE D'UN FAISCEAU
DANS LE CAS D'UNE EXPOSITION UNIQUE, D'APRÈS SLINNEY [15]

Région du spectre	Longueur d'onde (nm)	Durée d'exposition (t)	Norme de protection	Ouverture (mm)
UV-C.....	200-280	1 ms-3 × 10 ⁴ s	3 mJ.cm ⁻²	1
UV-B	280-202	1 ms-3 × 10 ⁴ s	3 mJ.cm ⁻²	1
	303	1 ms-3 × 10 ⁴ s	4 mJ.cm ⁻²	1
	304	1 ms-3 × 10 ⁴ s	6 mJ.cm ⁻²	1
	305	1 ms-3 × 10 ⁴ s	10 mJ.cm ⁻²	1
	306	1 ms-3 × 10 ⁴ s	16 mJ.cm ⁻²	1
	307	1 ms-3 × 10 ⁴ s	25 mJ.cm ⁻²	1
	308	1 ms-3 × 10 ⁴ s	40 mJ.cm ⁻²	1
	309	1 ms-3 × 10 ⁴ s	63 mJ.cm ⁻²	1
	310	1 ms-3 × 10 ⁴ s	100 mJ.cm ⁻²	1
	311	1 ms-3 × 10 ⁴ s	160 mJ.cm ⁻²	1
	312	1 ms-3 × 10 ⁴ s	250 mJ.cm ⁻²	1
	313	1 ms-3 × 10 ⁴ s	400 mJ.cm ⁻¹	1
	314	1 ms-3 × 10 ⁴ s	630 mJ.cm ⁻²	1
	315	1 ms-3 × 10 ⁴ s	1,0 J.cm ⁻²	1
UV-A	315-400	1 ns-10 s	0,56 $\sqrt[4]{t}$ J.cm ⁻²	1
	315-400	10 s-10 ³ s	1,0 J.cm ⁻²	1
	315-400	10 ³ -3 × 10 ⁴ s	1,0 mW.cm ⁻²	1
Visible	400-700	1 ns-18 μs	0,5 μJ.cm ⁻²	7
	400-700	18 μs-10 s	[1,8 t ^{1/4} /i] mJ.cm ⁻²	7
	400-700	10 s-10 ⁴ s	10 mJ.cm ⁻²	7
	400-700	10 ⁴ -3 × 10 ⁴ s	1 μW.cm ⁻²	7
IR-A	700-1 060	1 ns-18 μs	0,5 C _A μJ.cm ⁻²	7
	700-1 060	18 μs-10 s	[1,8 t ^{1/4} /i] C _A mJ.cm ⁻²	7
	700-1 060	10 s-100 s	10 C _A mJ.cm ⁻²	7
	1 060-1 400	1 ns-100 μs	5 μJ.cm ⁻²	7
	1 060-1 400	100 μs-10 s	[9 t ^{1/4} /i] mJ.cm ⁻²	7
	1 060-1 400	10 s-100 s	50 mJ.cm ⁻²	7
	700-800	100-[10 ⁴ /C _B] s	10 C _A mJ.cm ⁻²	7
	700-800	[10 ⁴ /C _B] to 3 × 10 ⁴ s	C _A · C _B μW.cm ⁻²	7
	800-1 060	100-3 × 10 ⁴ s	0,1 C _A mW.cm ⁻²	7
	1 060-1 400	100-3 × 10 ⁴ s	0,5 mW.cm ⁻²	7
IR-B et C	1 400-10 ⁶	1-100 ns	10 mJ.cm ⁻²	1-10 ^(a)
	1 400-10 ⁶	100 ns-10 s	0,56 $\sqrt[4]{t}$ J.cm ⁻²	1-10
	1 400-10 ⁶	10-3 × 10 ⁴ s	0,1 W.cm ⁻²	1-10

C_A = (λ - 700/224) ; C_B = (λ - 699).

(^a) mm pour 1 400-10⁵ nm ; 10 mm pour 10⁵-10⁶ nm.

TABLEAU II

NORMES DE PROTECTION POUR L'EXPOSITION DE L'ŒIL AU RAYONNEMENT LASER
DANS LE CAS D'UNE SOURCE ÉTENDUE OU DE RÉFLEXION DIFFUSE, D'APRÈS SLINNEY [15]

Longueur d'onde (nm)	Durée de l'exposition	Irradiance ou exposition radiante sur une surface diffusante parfaite	Rayonnement ou rayonnement intégré issu d'une source étendue
200-400 ..	1 ns-3 × 10 ⁴ s	(Utiliser les valeurs du tableau I)	
400-700 ..	1 ns-10 s	10 π $\sqrt[3]{t}$ J.cm ⁻²	10 $\sqrt[3]{t}$ J.cm ⁻² .sr ⁻¹
	10-10 ⁴ s	20 π J.cm ⁻²	20 J.cm ⁻² .sr ⁻¹
	10 ⁴ -3 × 10 ⁴ s	2 π × 10 ⁻³ W.cm ⁻²	2 × 10 ⁻³ W.cm ⁻² .sr ⁻¹
700-1 060.	1 ns-10 s	10 π C _A $\sqrt[3]{t}$ J.cm ⁻²	10 C _A $\sqrt[3]{t}$ J.cm ⁻² .sr ⁻¹
700-1 060.	10-100 s	20 π C _A J.cm ⁻²	20 C _A J.cm ⁻² .sr ⁻¹
700-800 ..	100-(10 ⁴ /C _B) s	20 π C _A J.cm ⁻²	20 C _A J.cm ⁻² .sr ⁻¹
700-800 ..	(10 ⁴ /C _B) s	0,2 π C _A C _B W.cm ⁻²	0,2 C _A C _B W.cm ⁻² .sr ⁻¹
800-1 060.	100-3 × 10 ⁴ s	0,2 C _A π W.cm ⁻²	0,2 C _A W.cm ⁻² .sr ⁻¹
1 060-1 400.	1 ns-10 s	50 π $\sqrt[3]{t}$ J.cm ⁻²	50 $\sqrt[3]{t}$ J.cm ⁻² .sr ⁻¹
1 060-1 400.	10-100 s	100 π J.cm ⁻²	100 J.cm ⁻² .sr ⁻¹
1 060-1 400.	100-3 × 10 ⁴ s	π W.cm ⁻²	1,0 W.cm ⁻² .sr ⁻¹
1 400-10 ⁶ ..	10 ns-3 × 10 ⁴ s	(Utiliser les valeurs du tableau I)	

invisible. Aussi, ne pouvons-nous donner que quelques indications concernant les mesures et consignes de sécurité concernant l'environnement d'un faisceau LASER.

- La rétine peut être protégée par le rideau irien. Il convient donc de toujours bien éclairer les locaux de façon à obtenir une pupille la plus petite possible.

- Les points d'impact et le trajet du faisceau doivent être signalés de façon évidente.

- Une des meilleures solutions consiste à enfermer le LASER dans une enceinte opaque à la longueur d'onde utilisée, si le risque est grand. C'est ce qui est fait dans certaines installations où le LASER ne peut fonctionner que s'il est « encagé ».

- Le minimum de personnel doit rester dans la pièce où fonctionne un LASER.

- La mise en fonctionnement du LASER doit être signalée par des sonneries.

- Si le LASER est mobile, il doit être stabilisé avant le tir, de façon à ce que le trajet du rayonnement soit prévisible.

- Les objets réfléchissants doivent être proscrits à proximité du trajet et de la cible. A plus forte raison, doit-on éviter de tirer sur une surface plane et brillante.

● Il faut baliser toute zone où un LASER, de puissance suffisante pour créer un risque, peut être utilisé. A titre indicatif, la figure ci-dessous montre le sigle normalisé par l'O. T. A. N.

Panneau d'avertissement (normes O.T.A.N.).

La liste des mesures que l'on vient de citer est loin d'être exhaustive. Certaines de ces mesures peuvent être superflues mais pour certaines utilisations, à l'inverse, elles peuvent être insuffisantes. Chaque installation doit être soigneusement étudiée et les risques évalués à leur juste mesure. Il faut être bien persuadé que les mesures de type collectif, dont nous venons de donner quelques exemples, sont les plus efficaces et plus satisfaisantes que les moyens exposés ci-dessous.

2. Les moyens de protection individuelle

● Les lunettes

Un LASER se caractérise par une longueur d'onde. Il vient tout de suite à l'esprit de réaliser des filtres laissant passer toutes les radiations sauf celle de la longueur d'onde du LASER. On a ainsi réalisé des lunettes avec des filtres généralement du type dichroïque. Chaque type de filtre ne convient qu'au type de LASER pour lequel il a été conçu. Il faut donc que la lunette porte clairement spécifiée la longueur d'onde qu'elle neutralise. Malgré cela on pressent tout de suite le danger qui existe si dans un laboratoire, par exemple, plusieurs types de LASERS sont utilisés. Par ailleurs, ces lunettes sont généralement inconfortables et ne peuvent être portées en permanence, d'autant qu'il existe toujours une absorption plus ou moins grande des autres radiations, donc une gêne de la vision. Ces filtres sont souvent fragiles et peuvent

être détériorés de façon telle que leur protection est illusoire. Selon l'angle d'incidence du faisceau les lunettes peuvent le réfléchir et devenir source dangereuse pour une personne située hors de la zone protégée.

Aussi, nous pensons qu'il ne faut utiliser la protection par lunettes que lorsque toutes les mesures de type collectif ont été prises et qu'il persiste cependant un risque oculaire. La sensibilisation des personnes aux risques encourus devra être accentuée afin de faire respecter la consigne du port de lunettes en bon état et conçues pour le type de LASER utilisé.

Bien qu'il ne s'agisse pas directement de moyens de protection, il faut envisager le cas des sujets présentant un facteur de risque plus important du fait d'une affection aiguë ou chronique d'un ou des deux yeux. On peut être alors amené à déconseiller, voire interdire, tout travail dans une zone de risque LASER.

Pour conclure, nous insistons sur la primauté des consignes de sécurité et des moyens de protection collective. Le port des lunettes n'est qu'un complément et ne doit être admis que dans des conditions très restreintes et particulières.

La règle d'or est **NE JAMAIS REGARDER DIRECTEMENT LE FAISCEAU LASER MÊME DANS LE CAS DU PORT DE LUNETTES.**

CONCLUSION

Le LASER actuellement n'est pas mortel pour l'homme. Mais il peut provoquer des lésions, en particulier au niveau de l'œil, qui peuvent rendre infirme. Il convient donc de se prémunir contre des accidents possibles. Nous possédons actuellement suffisamment de données précises pour atteindre cet objectif. Il existe des normes de sécurité établies à partir de travaux de haut niveau. Leur application ainsi que l'établissement de consignes de sécurité doivent être faits en fonction du type d'application envisagé et de la technique LASER employée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BÉATRICE E. S. Ocular effects of LASER radiation : cornea and anterior chamber. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 5/1-5/5.
- [2] BÉATRICE E. S. Ocular effects of radiation : retina. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 6/1-6/4.
- [3] BORLAND R. G. Determination of safe exposure levels : energy correlates of ocular damage. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 7/1-7/6.
- [4] BORLAND R. G. Derivation of safety codes. II-U. K. experience. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 9/1-9/6.
- [5] BRENNAN D. H. Ophthalmological examination of LASER workers and investigation of LASER accidents. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 10/1-10/11.

- [6] CLEUET A., MAYER A. Risques liés à l'utilisation industrielle des LASERS. *Cahiers de Notes Documentaires*, N° 74, 1974.
- [7] ISNARD. Le LASER, ses applications, ses dangers pour l'homme (383 réf.). *Rapport* n° 3863/ESSSAA/CRMA/RECH, 1974.
- [8] GOLDMAN L. Biomedical aspects of the LASER. Springer-Verlag, Berlin, 1967.
- [9] MCGOWAN J. W. Properties of electromagnetic radiation. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 2/1-2/9.
- [10] MCGOWAN J. W. LASERS. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 3/1-3/12.
- [11] MARSHALL J. LASER, induced damage in the retina, thesis, Londres, Department of anatomy, Institute of Ophthalmology, 1968.
- [12] NICHOLSON A. N. Safety with LASERS. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 1.
- [13] SANTUCCI G. F., CHEVALERAUD J. P. Rayonnement LASER, applications médicales, dangers. *Médecine et Armées*, 1975, 3, 7, 595-602.
- [14] SLINNEY D. H. Instrumentation and measurement of LASER radiation. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 4/1-4/9.
- [15] SLINNEY D. H. Derivation of safety codes. I. USA experience. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 8/1-8/13.
- [16] SLINNEY D. H. LASER protective devices. *AGARD Lecture*, Series No. 79, 1975, 11/1-11/11.