

→ G. Hée (1), I. Balty (1),
A. Mayer (2)
avec le concours de D. Courant (3)
et M. Lièvre (4)

(1) INRS Paris
(2) INRS Nancy
(3) CEA Fontenay-aux-Roses
(4) Laboratoire National d'Essais, Trappes

Les lasers

Risques et prévention

Annule et remplace la version précédente (ND 1607) publiée en 1986.

LASERS

RISKS AND PREVENTIVE MEASURES

After characterising and describing the different types of laser emission, the authors examine the risks related to high voltage and radiant heat, with special emphasis on the dangers of radiation to the eyes. Reference is made to the occupational exposure limits recommended by the ACGIH and the standard classification of laser apparatuses is given. The collective and personal protection measures recommended essentially concern protection from the thermal effects of radiation. A list of the protective goggles available in France is given, together with the requirements they must satisfy. Finally, apparatuses for measuring laser energy and power are presented in table form.

- laser ● radiation
- occupational exposure limit
- classification

Après avoir donné les caractéristiques de l'émission laser et en avoir décrit les différents types, les auteurs examinent les risques dus à la mise en œuvre de courants électriques de haute tension, à la propagation de rayonnements électromagnétiques optiques et l'éventualité d'une nuisance chimique.

La norme européenne NF EN 60825-1 «Sécurité des appareils à laser - Partie 1 : classification des matériels, prescriptions et guide de l'utilisateur» de juillet 1994 sert de référence pour la détermination de la classification normalisée des appareils et pour l'évaluation des valeurs limites d'exposition (VLE) recommandées.

Les mesures de protection collectives et individuelles préconisées s'attachent principalement à garantir les personnes contre les nuisances liées à l'émission de faisceaux de rayonnements optiques cohérents et, plus particulièrement, aux effets thermiques. Une liste de lunettes de protection disponibles sur le marché est proposée.

- laser ● rayonnement ● VLE ● classification

Le laser (de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiations c'est-à-dire Lumière Amplifiée par Stimulation d'Émission de Rayonnements) est une source de rayonnements optiques cohérents, c'est-à-dire que les ondes présentent certaines relations de phase entre elles sur une assez longue distance.

Le phénomène de base qui permet la réalisation d'émetteurs optiques à ondes cohérentes a été pressenti sur le plan théorique par Einstein en 1917.

L'émission lumineuse d'un corps est due à une diminution de l'énergie d'atomes, d'ions, de molécules lors d'un passage d'électrons d'orbitales externes vers des orbitales internes.

Cette émission peut être spontanée et correspond alors à un rayonnement incohérent (la lumière du jour, par exemple). Mais si un photon est projeté sur un atome, un ion ou une molécule convenablement excité, il peut, sous certaines conditions, provoquer l'émission d'un second photon en phase avec le photon incident et à la même fréquence.

Pour provoquer l'émission laser, il faut exciter correctement un milieu actif afin de placer ses atomes, ses ions ou ses molécules dans des conditions telles qu'ils puissent libérer de l'énergie par émission stimulée.

Cette excitation, appelée «pompage», peut se faire sous des formes différentes :

- *pompage électrique* : décharge électrique dans un gaz avec excitation électronique, par exemple ;

- *pompage optique* : éclairs de tube flash, par exemple ;

- *pompage chimique* : réaction chimique entre deux substances.

Ce milieu actif est placé dans une cavité de résonance limitée par au moins deux surfaces réfléchissantes. L'une des faces, moins réfléchissante, permet le passage d'un faisceau de lumière cohérente à l'extérieur de la cavité.

Caractéristiques des émissions laser

Longueurs d'onde

La longueur d'onde λ du rayonnement émis par chaque type de laser est généralement comprise entre 0,19 μm et 10,6 μm , dans une région du spectre des ondes électromagnétiques comprenant la lumière visible (0,4 à 0,78 μm), l'ultraviolet (inférieure à 0,4 μm) et l'infrarouge (supérieure à 0,78 μm).

Durées d'émission

Le rayonnement laser peut être émis :

- en **impulsions déclenchées** («Q-switched» ou en «modes bloqués»), d'une durée de quelques femtosecondes à quelques centaines de microsecondes. Ces impulsions se succèdent à des cadences très variables, de quelques

RAPPEL DES ORDRES DE GRANDEUR

microseconde	μs	10^{-6} s
nanoseconde	ns	10^{-9} s
picoseconde	ps	10^{-12} s
femtoseconde	fs	10^{-15} s

impulsions par heure à plusieurs mégahertz ;

- en **impulsions relaxées** («long pulse» ou «free running»), d'une durée de quelques μs (10^{-6} s) à quelques dizaines de ms (10^{-3} s), les cadences étant d'une dizaine par seconde à une par minute ;

- en **émission continue** (conventionnellement, de durée supérieure à 0,25 s, durée du réflexe palpébral).

Puissance ou énergie transportée

Lasers à émission continue : quelques centaines de microwatts à plusieurs dizaines de kilowatts ;

Lasers à impulsions déclenchées : une énergie de quelques millijoules à plusieurs dizaines de kilojoules (en quelques ns) : les puissances de crête correspondantes sont alors considérables (du mégawatt au gigawatt). Certains projets nationaux mettent en œuvre des énergies atteignant le mégajoule.

L'énergie transportée dans le faisceau peut être concentrée par focalisation sur une surface très petite (disque de quelques μm de diamètre) dans certains appareils servant, en particulier, à l'usinage. Une situation inverse peut être provoquée par d'autres appareils qui servent, par exemple, aux travaux d'holographie.

TABLEAU Ia

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES ESSENTIELLES DES LASERS INDUSTRIELS ET DE LABORATOIRES

Matériau actif	Longueur d'onde (nm)	Régime : continu ou pulsé	Cadence des impulsions	Energie ou puissance	Utilisation
Gaz					
Azote	337	100 ns	1 à 10 Hz	1 mJ à 100 mJ	photochimie, recherche, impression graphique.
Excimères (*) (KrF, ArF, XeCl)	190 à 350	10 à 60 ns	1 Hz à 10 kHz	1 mJ à 300 mJ (Pmoy < 1,2 kW)	impression marquage.
Hélium - néon	632	continu		0,1 à 100 mW	téléométrie, topographie, métrologie, holographie, impression.
Gaz ionisé (Kr, Ar)	350 à 800	continu		0,1 W à 40 W	téléométrie, spectroscopie, recherche, spectacles.
Dioxyde de carbone CO ₂	10600	10 à 100 ns continu	10 kHz	1 W à 50 kW	découpage, marquage, perçage, soudage, traitement thermique.
Vapeurs métalliques	500 à 15000	20 ns	quelques Hz	quelques mJ	recherche, séparation isotopique.
Solide					
Rubis	694	30 ns 500 μs	0,03 à 10 Hz faibles cadences: 0,03 Hz à 5 Hz	0,1 à 10 J 0,05 à 5 J	holographie dynamique, téléométrie, micro-usinage, perçage, soudage.
Yag : Nd	1064 532 (doublé en fr.) 355 (triplé en fr.) 266 (quadruplé fr.)	30 ps à 30 ns et continu	1 à 80 kHz	0,1 mJ à 50 J jusqu'à quelques kW	vaporisation métal, recuits, perçage, soudage, nettoyage, gravure
Verre dopé au néodyme	1060	de 0,5 à 5 ms	10 à 20 Hz	1 à 400 J	soudage par points, gravure, perçage, spectrographie.
Titane saphir	accordable de 370 à 3000	< 80^{-15} s	1 à 50 kHz	0 à 0,2 J	spectroscopie, recherche.
Diodes lasers	accordable de 447 à 30000 selon matériaux utilisés	continu (superposition de signaux impulsionnels)		1 à 65 mW	téléométrie, lecture de codes-barres, bureautique, audio-vidéo-hifi.
Liquide					
Colorants	variable 350 à 1000	continu		quelques mW à quelques W	spectroscopie, étude des matériaux

(*) Excimères : contraction de «excited dimers» c'est-à-dire molécules dimères excitées (ou exiplexes).

Le diamètre du faisceau de lumière émergeant naturellement du laser peut varier du mm à quelques cm. En fait, il n'est pas rigoureusement cylindrique. Sa divergence est définie, selon les constructeurs, par l'angle au sommet du cône qui contient 50 % ou 85 % de l'énergie transportée. Elle varie du dixième de mrd à quelques mrd. Dans la section du faisceau laser, la répartition de la puissance ou de l'énergie lumineuse évolue en fonction du milieu actif. Dans le meilleur des cas, elle est de forme gaussienne pour les lasers à gaz et très elliptique pour les diodes laser.

Le rendement des lasers (rapport de l'énergie de rayonnement à l'énergie d'alimentation électrique) varie de moins 0,1 % à 25 % selon les substances et les dispositifs mis en œuvre.

Les lasers dont la puissance moyenne

atteint quelques watts nécessitent généralement l'adjonction d'un système de refroidissement.

Types de lasers

On classe les lasers selon la nature du milieu actif. Ces matériaux sont souvent constitués d'une substance de base dans laquelle sont incorporés des dopants qui eux sont actifs.

Les lasers à matériau actif solide utilisent :

- le rubis constitué de corindon (alumine cristallisée) contenant des ions de chrome trivalent;
- le saphir dopé avec des ions de titane;
- les verres dopés au néodyme;
- le grenat d'yttrium et d'aluminium,

dopé au néodyme (laser dit «YAG : Nd»);

- des semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium, le phosphore d'indium.

Les lasers à gaz emploient :

- un mélange d'hélium et de néon ;
- de l'argon ou du krypton à l'état ionisé ;
- du dioxyde de carbone ;
- de l'azote.

Les lasers à liquide utilisent des liquides actifs ou «dyes» qui sont des composés colorants :

- les coumarines ;
- les rhodamines ;
- ...

TABLEAU 1b

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES ESSENTIELLES DES LASERS MÉDICAUX

Matériau actif	Longueur d'onde (nm)	Régime : continu ou pulsé	Cadence des impulsions	Energie ou puissance	Utilisation
Gaz					
Excimères (*)	193 à 351, 248, 308	pulsé	1 à 400 Hz	100 mJ à qq joules	angioplastie, ophtalmologie.
Vapeurs métalliques (or, plasma)	511 et 578 Or : 628	pulsé	10 kHz	5 à 20 W	chirurgie plastique, dermatologie, photothérapie.
Hélium - néon	632	continu	-	0,1 à 50 mW	acuponcture, auriculothérapie, rhumatologie, médecine sportive et esthétique, dermatologie, traumatologie.
Argon krypton (plasma)	488-515 647-976	continu	-	0,1 à 20 W	dermatologie, pompage de laser à colorant, ophtalmologie, photocoagulation, chirurgie plastique.
Monoxyde de carbone CO	5300	continu	-	1 à 20 W	ORL, gynécologie, dermatologie, art dentaire.
Dioxyde de carbone CO ₂	10600	pulsé continu	10 kHz -	100 J 1 à 100 W	cardiovasculaire, ORL, dermatologie, gynécologie, chirurgie plastique, gastrologie, art dentaire.
Solide					
Yag - Erbium	2930	pulsé	quelques Hz	10 J.cm ⁻²	dermatologie, effets combinés des lasers CO ₂ et excimères, ophtalmologie.
Yag doublé avec cristal de Kr	532	pulsé continu	1 à 50 Hz	1 à 120 W	dermatologie.
Rubis	694	pulsé	quelques Hz	10 ou 50 mJ	photolithotritie, dermatologie, destruction des calculs rénaux.
Diodes lasers	850	pulsé continu	-	quelques W	ophtalmologie angioplastie.
Yag - Nd doublé avec cristal KDP, KTP	1064 532 (doubl. en fr.)	pulsé continu	1 à 50 Hz -	1 à 60 W	ORL, gynécologie, urologie, neurologie, chirurgie générale, art dentaire, ophtalmologie
Titane saphir	700 à 1070 Doublé :350 à 535	pulsé continu	1 à 50 kHz -	qq mJ 1 W	photothérapie.
Yag - Holmium	2,100	pulsé	1 à 5 Hz	0,5 à 100 J.cm ⁻²	lithotritie.
Liquide					
Colorants	320 à 1200 surtout : 504 et 630	pulsé continu	-	quelques W	photolithotritie, photothérapie, dermatologie, photochimiothérapie photocoagulation.

1. Risques

1.1. Risques électrique et électromagnétique

Les lasers présentent les risques classiques liés à la présence de courant électrique à haute tension (quelques centaines à quelques milliers de volts) pour le fonctionnement des lampes éclairés ou, plus généralement, pour l'alimentation des dispositifs de pompage optique ou électrique.

Pour des tensions dépassant le kilovolt, ces circuits d'alimentation peuvent générer des champs électriques d'intensité élevée, notamment, lors de l'ouverture des coffrets métalliques pour l'entretien du matériel.

1.2. Risques de pollution chimique

L'utilisation des lasers sur des matériaux à transformer peut entraîner une pollution chimique. Celle-ci se présente sous forme d'aérosols ou de gaz toxiques résultant de la dégradation thermique de ces matériaux et/ou celle de substances adhérant éventuellement à leur surface (revêtements anticorrosion, traces de solvant de dégraissage...).

La CIE «Commission Internationale de l'Éclairage» a subdivisé le spectre correspondant aux rayonnements optiques en trois gammes de longueurs d'onde ayant une signification biologique spécifique. Cette classification, extraite de celle de l'ensemble des rayonnements du spectre électromagnétique est reprise dans la première colonne du tableau II.

TABLEAU II

EXTRAIT DE LA CLASSIFICATION CIE

Désignation	λ (en nm)
UV _C	100 à 280
UV _B	280 à 315
UV _A	315 à 400
visible	400 à 780
IR _A	780 à 1400
IR _B	1400 à 3000
IR _C	3000 à 10 ⁶

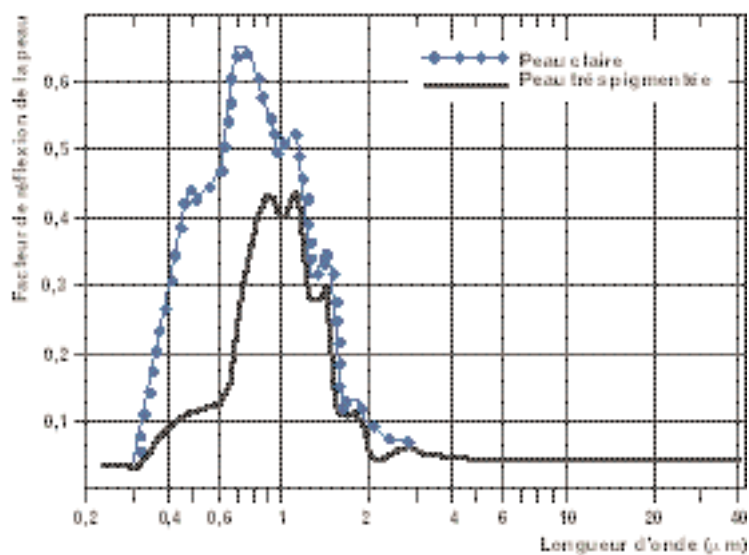


Fig. 1. Variation du facteur de réflexion de la peau en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident (d'après Jaquez, Hardy et Blüttner)

1.3. Effets du rayonnement sur la peau

Le rayonnement laser peut être dangereux pour la peau. En ce qui concerne les effets thermiques, celle-ci ne peut supporter en permanence que des éclairagements énergétiques ⁽⁵⁾ de quelques milliers de W.m⁻² (quelques dixièmes de W.cm⁻²) ou, fugitivement, de quelques dizaines de milliers de W.m⁻² (quelques W.cm⁻²). Pour fixer les idées, le rayonnement solaire, par temps clair, en été, développe un éclairage énergétique de 1,4 kW.m⁻² (0,14 W.cm⁻²). La sensibilité à la chaleur rayonnée dépend beaucoup de la surface stimulée et de la région du corps exposée.

La peau réfléchit, plus ou moins selon sa pigmentation, les rayonnements du spectre de lumière visible et de l'IR_A (fig. 1) qui sont, avec les UV_A, les rayonnements les plus pénétrants. Les effets induits varient d'un érythème bénin (faible rougeur de la peau) à la phlyctène (ampoule ou cloque). Les rayonnements ultraviolets UV_{B,C} ainsi que les infrarouges IR_{B,C} sont les plus agressifs car ils sont fortement absorbés à la surface de la peau. Une exposition à ces rayonnements sous forme d'impulsions courtes et de grande

puissance de crête peut engendrer une carbonisation superficielle de couleur grise au niveau de la couche cornée de l'épiderme. Toutefois, l'exposition à des éclairagements énergétiques intenses, comme ceux émis dans l'IR_C par certains lasers CO₂, peut induire une lésion profonde jusqu'aux tissus sous-cutanés.

1.4. Effets du rayonnement sur l'œil (fig. 3b)

Ces effets constituent les risques essentiels et sont fonction des caractéristiques du laser, de la distance de ce dernier à l'œil et de facteurs dépendant des propriétés optiques des différents milieux oculaires.

⁽⁵⁾ L'éclairage énergétique est le flux énergétique affectant l'unité de surface, exprimé en watts par mètre carré et souvent, en watts par centimètre carré (autres termes employés : densité de puissance surfacique, débit de dose et irradiance).

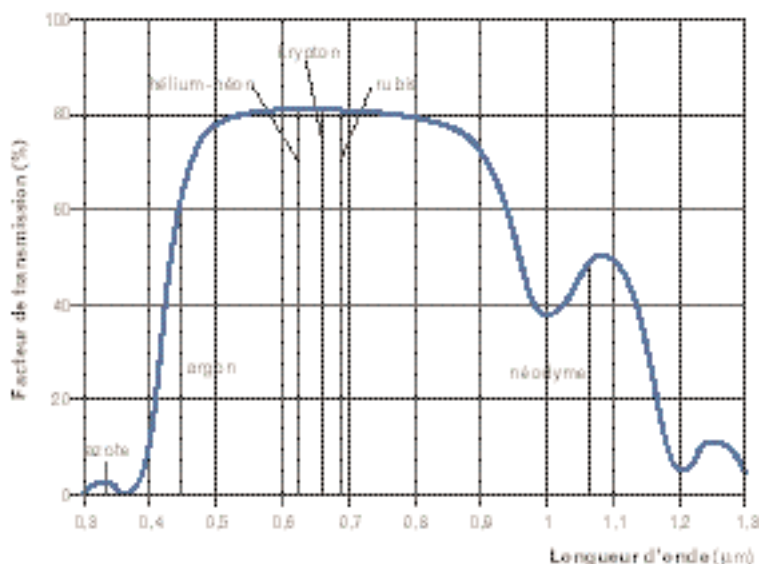


Fig. 2. Facteur de transmission de l'œil dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge. Les longueurs d'onde mises en évidence correspondent à : 1) azote, 2) argon, 3) hélium-néon, 4) krypton, 5) rubis, 6) néodyme (d'après Büttner et Wolter)

1.4.1. Caractéristiques physiques du laser

- la puissance ;
- la longueur d'onde d'émission ;
- le mode de l'émission ;
- les dimensions transversales du faisceau ;
- la divergence du faisceau.

L'expression du § 2.5 permet d'évaluer l'éclairement énergétique ou l'exposition énergétique ⁽⁶⁾ sur la cornée en fonction des caractéristiques du laser utilisé et de la distance qui le sépare de l'œil.

1.4.2. Facteurs liés à l'œil

a) Transmission des rayonnements par les milieux oculaires

Ces milieux transparents transmettent bien les rayonnements visibles, moins bien ceux du proche infrarouge (UV_A) et absorbent considérablement les rayonnements ultraviolets (surtout $UV_{B,C}$) ainsi que les rayonnements infrarouges moyens et lointains ($IR_{B,C}$). L'épithélium pigmentaire de la rétine ainsi que la choroïde, qui tapissent le fond de l'œil, absorbent fortement les rayonnements incidents de lumière visible, plus particulièrement ceux dont les longueurs d'onde sont courtes et, à un degré moindre, les infrarouges proches (IR_A). La remarque précédente concerne surtout les lasers YAG-Nd.

b) Influence du diamètre pupillaire (pour : $0,4 \mu m \leq \lambda \leq 1,4 \mu m$) cf. fig. 3a.

Les rayonnements transmis à la rétine par les milieux optiques de l'œil sont focalisés par le cristallin. Les dimensions de l'image d'un objet sur la rétine dépendent directement de la distance focale de l'œil et du diamètre apparent de l'objet. Leur limite inférieure est liée au phénomène de diffraction de Fraunhofer et leur limite supérieure est fonction de la divergence du faisceau.

⁽⁶⁾ L'exposition énergétique est la quantité d'énergie rayonnante reçue par unité de surface exprimée en joules par mètre carré et souvent en joules par centimètre carré (autres termes employés : densité d'énergie surfacique ou dose).

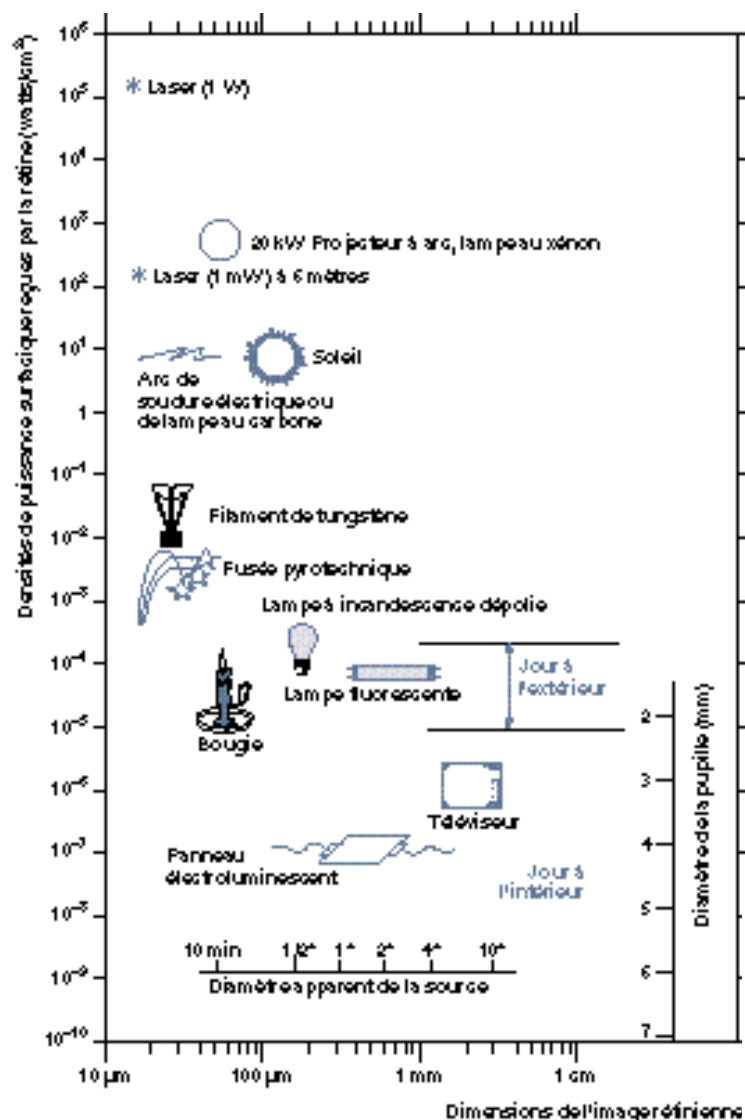


Fig. 3a. Dimensions des images et des densités de puissance surfaciques sur la rétine lors de la vision d'objets lumineux (d'après Sliney et Freasier)

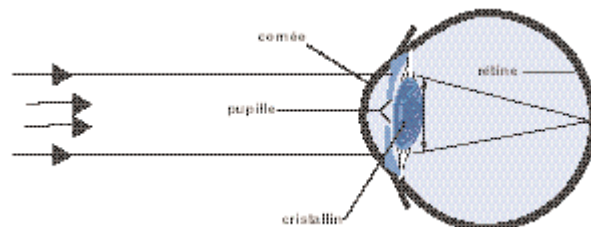


Fig. 3b. Schéma de l'œil

Le diamètre de l'image rétinienne d'un faisceau laser peut ainsi varier de quelques micromètres à une vingtaine de micromètres. A titre de comparaison, le soleil donne sur la rétine une image d'un diamètre de 160 μm .

En fait, la puissance ou l'énergie reçue par unité de surface peut être 5.10^6 fois plus élevée au niveau de la rétine qu'à celui de la cornée. On tient compte de ce facteur pour définir les densités de puissance ou d'énergie maximales admises pour la cornée.

c) Focalisation des rayonnements transmis à la rétine

Le diamètre de la pupille varie de 2 à 7 mm de la lumière du jour à l'obscurité et modifie le flux lumineux reçu par la rétine dans le rapport de 1 à 12. Cependant, dans le cas des lasers, la contraction de la pupille est trop lente pour participer à la protection de la rétine. C'est pourquoi les densités maximales d'énergie admissibles pour la rétine sont calculées en supposant la pupille complètement dilatée.

1.4.3. Risques de lésions oculaires

a) Dans les milieux transparents de l'œil.

Les rayonnements ultraviolets moyens et lointains ($UV_{B,C}$) absorbés par les parties antérieures de l'œil, peuvent provoquer une kérato-conjonctivite (inflammation de la cornée et de la conjonctive). Ce risque n'est guère encouru que pour les lasers du type excimère (cf. tableaux Ia, b). Les UV_B , compris entre 300 et 315 nm, sont susceptibles de provoquer une cataracte (opacité du cristallin) à la suite d'une seule exposition, contrairement aux UV_A dont l'action cataractogène n'apparaît qu'après des expositions chroniques.

Les rayonnements infrarouges moyens et lointains ($IR_{B,C}$) sont susceptibles d'occasionner des brûlures de la cornée. Pour des longueurs d'onde comprises entre 0,8 et 2,0 μm , ils peuvent également entraîner l'apparition d'une cataracte dans le cas d'exposition prolongée avec des éclaircissements énergétiques importants.

b) Sur la rétine

La rétine est particulièrement vulnérable aux rayonnements du spectre visible et du proche infrarouge (400 à 1400 nm). Si la densité d'énergie reçue par la rétine est excessive, elle provoque un échauffement des tissus, une brûlure et une lésion des photorécepteurs, cônes et bâtonnets. Cette lésion, souvent de dimension limitée, varie

de la dépigmentation peu perceptible à l'hémorragie. Elle est toujours irréversible : la fonction visuelle à l'endroit de l'impact est définitivement perdue. Les atteintes de la fovéa sont les plus graves. Elles entraînent une diminution de l'acuité et du champ visuels.

2. Valeurs limites d'exposition

Les valeurs limites d'exposition (VLE) sont censées représenter le niveau maximal de rayonnement laser auquel les personnes peuvent être exposées sans subir de dommage immédiat ou à long terme. Les VLE sont évaluées, au niveau de la peau et de la cornée, en fonction de la longueur d'onde, de la durée de l'exposition et de la fréquence de répétition des impulsions dans le cas des lasers pulsés. Pour les UV et les $IR_{B,C}$, le risque cutané est généralement considéré comme identique à celui de la cornée, ce qui implique des VLE pour la peau semblables à celle de l'œil. Dans le spectre visible et le proche infrarouge, le risque cutané, évidemment inférieur au risque oculaire, est considéré comme identique d'une extrémité à l'autre du spectre alors que le risque oculaire varie en fonction de la longueur d'onde.

Les tableaux V et VI donnent les valeurs limites d'exposition exprimées en exposition et éclaircissement énergétiques de l'œil et de la peau en fonction de gammes de longueurs d'onde.

Il faut considérer que les réflexions spéculaires (réflexions dues à des miroirs et autres surfaces réfléchissantes) présentent les mêmes dangers que les rayons directs. Elles peuvent contenir jusqu'à 95 % de l'énergie de ces derniers.

Il est admis que des expositions à des rayonnements émis à plusieurs longueurs d'onde ont un effet additif en proportion de leur efficacité spectrale sous réserve que :

- les durées d'exposition et les largeurs d'impulsion soient du même ordre de grandeur ;

- les domaines spectraux soient indiqués comme additifs par les symboles (o) pour l'exposition oculaire et (p) pour l'exposition de la peau selon le [tableau III](#).

TABLEAU III
ADDITIVITÉ DES EFFETS
DE RAYONNEMENTS
DE DOMAINES SPECTRAUX DIFFÉRENTS

Type	UV _(C,B)	UV _A	Vis et IR _A	IR _(B,C)
UV _(C,B)	o - p			
UV _A		o - p	p	o - p
Vis et IR _A		p	o - p	p
IR _(B,C)		o - p	p	o - p

TABLEAU IVA
VALEUR DE L'ANGLE LIMITE α_{\min} EN
FONCTION DE LA DURÉE D'EXPOSITION

α_{\min} (mrd)	durée d'exposition (s)
1,5	< 0,7
2.t ^{3/4}	10 ⁻⁹ à 1,8 10 ⁻⁵
11	≥ 10

TABLEAU IVB
COEFFICIENT C_6

$C_6 = 1$	pour $\alpha \leq \alpha_{\min}$
$C_6 = \alpha / \alpha_{\min}$	$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$
$C_6 = \alpha_{\max} / \alpha_{\min}$	$\alpha > \alpha_{\max}$

TABLEAU V

VALEURS LIMITES D'EXPOSITION AU NIVEAU DE LA CORNÉE POUR L'EXPOSITION OCULAIRE DIRECTE AU RAYONNEMENT LASER
 (d'après NF EN 60825-1) (Exposition énergétique H en $J.m^{-2}$; éclairement énergétique E en $W.m^{-2}$)

		Durée d'exposition (s)								
		< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ à 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ à 1,8 x 10 ⁻⁵	1,8 x 10 ⁻⁵ à 5 x 10 ⁻⁵	5 x 10 ⁻⁵ à 10 ⁻³	10 ⁻³ à 10	10 à 10 ³	10 ³ à 10 ⁴	10 ⁴ à 3 x 10 ⁴
Longueur d'onde (nm)	180 à 302,5	3.10 ¹⁰ W.m ⁻²	30 J.m ²							
	302,5 à 315		C ₂ J.m ⁻² pour t > T ₁ C ₁ J.m ⁻² pour t < T ₁				C ₂ J.m ⁻²			
	315 à 400		C ₁ J.m ⁻²				10 ⁴ J.m ²	10 W.m ⁻²		
	400 à 550	5.10 ⁶ .C ₆ W.m ⁻²	5.10 ⁻³ C ₆ J.m ⁻²	18.t ^{0,75} .C ₆ J.m ⁻²			10 ² .C ₆ J.m ⁻²		10 ⁻² W.m ⁻²	
	550 à 700						10 ² .C ₃ .C ₆ J.m ⁻² pour t > T ₂ 18.t ^{0,75} .C ₆ J.m ⁻² pour t < T ₂		10 ⁴ .C ₃ .C ₆ W.m ⁻²	
	700 à 1050	5.10 ⁶ .C ₄ .C ₆ W.m ⁻²	5.10 ⁻³ C ₄ .C ₆ J.m ⁻²		18.t ^{0,25} .C ₄ .C ₆ J.m ⁻²				3,2.C ₄ .C ₆ W.m ⁻²	
	1050 à 1400	5.10 ⁷ .C ₆ .C ₇ W.m ⁻²	5.10 ⁻² C ₆ .C ₇ J.m ⁻²			90.t ^{0,75} .C ₆ .C ₇ J.m ⁻²			16.C ₆ .C ₇ W.m ⁻²	
	1400 à 1500	10 ¹² W.m ⁻²	10 ³ J.m ⁻²				5600.t ^{0,25} J.m ⁻²		10 ³ W.m ⁻²	
	1500 à 1800	10 ¹³ W.m ⁻²	10 ⁴ J.m ⁻²							
	1800 à 2600	10 ¹² W.m ⁻²	10 ³ J.m ⁻²				5600.t ^{0,25} J.m ⁻²			
2600 à 10 ⁶	10 ¹¹ W.m ⁻²	100 J.m ⁻²		5600.t ^{0,25} J.m ⁻²						

TABLEAU VI

VALEURS LIMITES D'EXPOSITION DE LA PEAU AU RAYONNEMENT LASER
 (d'après NF EN 60825-1) (Exposition énergétique H en $J.m^{-2}$; éclairement énergétique E en $W.m^{-2}$)

		Durée d'exposition (s)					
		< 10 ⁻⁹	10 ⁻⁹ à 10 ⁻⁷	10 ⁻⁷ à 10	10 à 10 ³	10 ³ à 3 x 10 ⁴	
Longueur d'onde (nm)	180 à 302,5	3.10 ¹⁰ W.m ⁻²	30 J.m ²				
	302,5 à 315		C ₂ J.m ⁻² pour t > T ₁ C ₁ J.m ⁻² pour t < T ₁		C ₂ J.m ⁻²		
	315 à 400		C ₁ J.m ⁻²		10 ⁴ J.m ²	10 W.m ⁻²	
	400 à 700	2.10 ¹¹ W.m ⁻²	200 J.m ⁻²	1,1.10 ⁴ .t ^{0,25} J.m ⁻²	2000 W.m ⁻²		
	700 à 1400	2.10 ¹¹ C ₄ W.m ⁻²	200.C ₄ J.m ⁻²	1,1.10 ⁴ .C ₄ .t ^{0,25} J.m ⁻²	2000.C ₄ W.m ⁻²		
	1400 à 10 ⁶	10 ¹¹ W.m ⁻²	100 J.m ⁻²	5600.t ^{0,25} J.m ⁻²	1000 W.m ⁻²		

Pour le rayonnement laser à impulsions répétitives voir le § 2.4.

**Diamètres
des diaphragmes
d'observation**

Pour l'évaluation des expositions, éclairagements et luminances énergétiques à comparer aux valeurs limites d'exposition des tableaux V et VI, il convient d'adopter des valeurs de diamètres des diaphragmes d'observation en fonction du diamètre pupillaire, soit :

- 1 mm pour 180 < λ < 400 nm, si t ≤ 3.10⁴ s
- 7 mm pour 400 < λ < 1400 nm, si t ≤ 3.10⁴ s
- 1 mm pour 1400 < λ < 10⁵ nm, si t ≤ 3 s
- 3,5 mm pour 1400 < λ < 10⁵ nm, si t > 3 s
- 11 mm pour 10⁵ < λ < 10⁶ nm, si t ≤ 3.10⁴ s

En ce qui concerne le tableau VI :

- 1 mm pour λ < 10⁵ nm
- 11 mm pour λ > 10⁵ nm

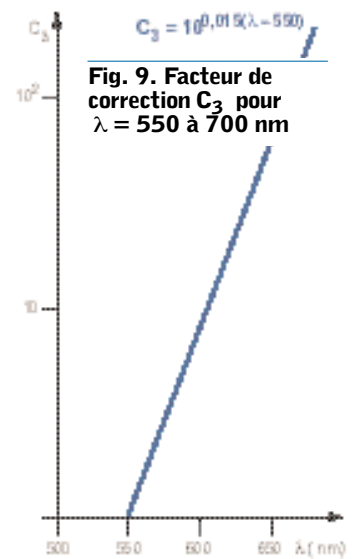
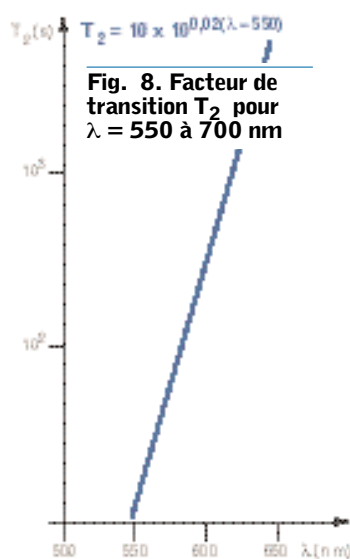
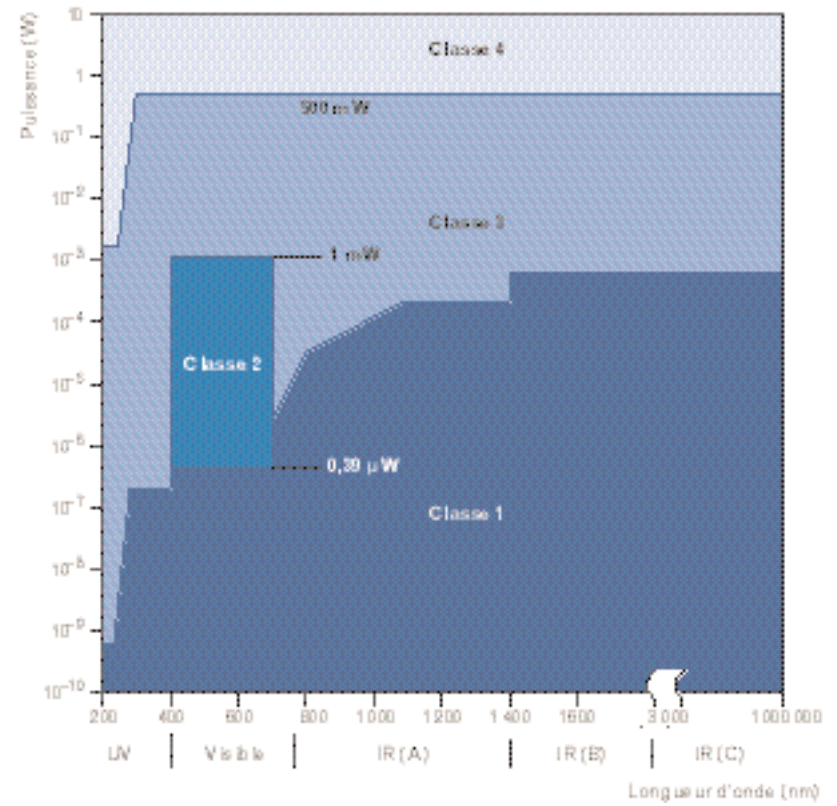
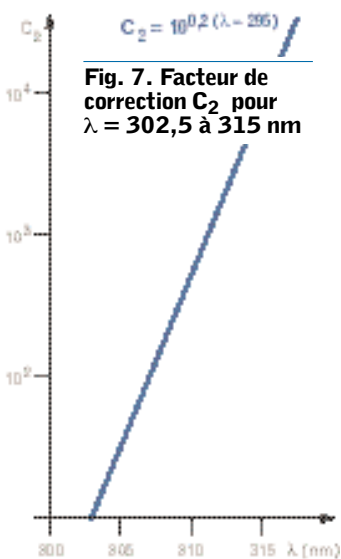
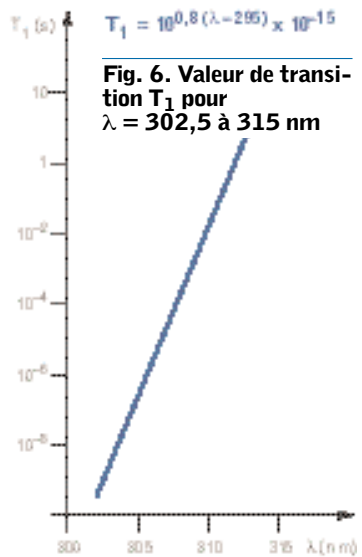
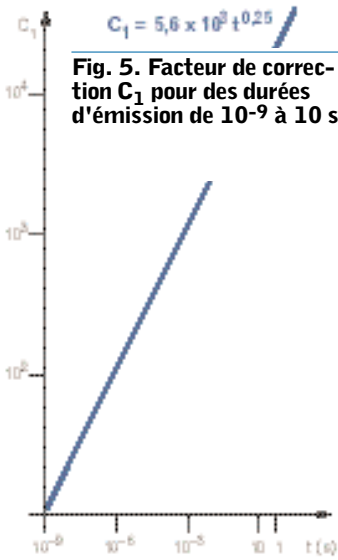


Fig. 4. Classification des lasers à émissions continues (d'après le NCDRH)

2.1. Exposition de l'œil

Les valeurs limites d'exposition sont considérées au niveau du plan tangent à la cornée au point d'intersection de l'axe optique de l'œil. Pour les lasers dont la longueur d'onde est comprise entre 400 nm et 1400 nm, il y a risque rétinien. Les valeurs limites correspondantes d'exposition, d'éclairement et de luminance énergétiques du tableau V sont plus faibles que celles du tableau VI, car elles tiennent compte des caractéristiques optiques de l'œil.

2.1.1. Vision dans un faisceau

Le tableau V donne les valeurs limites d'exposition directe de l'œil pour toutes les gammes de longueurs d'onde de la zone du spectre en fonction du temps d'exposition. Il précise les valeurs limites d'exposition pour lesquelles l'usage de valeurs correctives dites «facteurs de correction» $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_7, T_1$ et T_2 sont nécessaires.

Ces facteurs de correction peuvent être déterminés par calcul et/ou graphiquement à l'aide des *figures 4 à 9 et 11*.

Lors de l'observation accidentelle directe d'un faisceau laser visible, le réflexe de fermeture des paupières (réflexe palpébral) intervient en 0,25 s et limite, dans de nombreux cas, l'exposition de l'œil.

2.1.2. Source étendue

La vision d'une source étendue est une condition de vision pour laquelle un observateur voit une source apparente située à une distance égale ou supérieure à 100 mm sous un angle supérieur à l'angle limite α_{\min} .

Cette condition de vision ne concerne que les émissions dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 1400 nanomètres. Les valeurs données au tableau V (vision directe dans le faisceau laser) doivent être multipliées par le facteur de correction C_6 si le diamètre apparent α de la source (mesuré au niveau de l'œil de l'opérateur) est plus grand que α_{\min} donné au tableau IVa. Dans ce cas, le coefficient C_6 a les valeurs données au tableau IVb en sachant que α_{\max} est la valeur maximale du diamètre apparent de la source égale à 100 mrad au-dessus de laquelle les valeurs limites d'exposition (VLE) et les limites d'émission admissibles (LEA) sont indépendantes de la dimension de la source.

2.2. Exposition de la peau

Les valeurs limites d'exposition de la peau sont données dans le tableau VI.

Les facteurs de correction C_1, C_2, C_4 , et T_1 de ce tableau peuvent être déterminés à l'aide des figures 4, 5, 6 et 9.

2.3. Cas des lasers modulés ou à impulsions

La prudence s'impose lors de l'évaluation des valeurs limites d'exposition aux rayonnements à impulsions répétitives du fait du manque de données actuelles en ce qui concerne l'exposition aux impulsions multiples.

Les VLE oculaires pour les longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 1 mm sont déterminées en utilisant la plus restrictive des prescriptions a), b) et c). Pour les autres longueurs d'onde, seuls les points a) et b) servent à l'évaluation des VLE. En ce qui concerne les VLE pour la peau, on ne considère également que les points a) et b).

a) L'exposition à une seule impulsion dans un train d'impulsions ne doit pas dépasser la VLE pour une impulsion unique.

b) L'exposition moyenne pour un train d'impulsions de durée T ne doit pas dépasser la VLE donnée dans les tableaux V et VI pour une impulsion unique de durée T .

c) L'exposition à une impulsion quelconque comprise dans un train d'impulsions ne doit pas excéder la VLE pour une impulsion unique multipliée par le facteur de correction C_5 de la *figure 10* :

$$VLE_{\text{train}} = VLE_{\text{unique}} \cdot C_5$$

où : VLE_{train} : VLE à une impulsion quelconque comprise dans le train d'impulsions.

VLE_{unique} : VLE pour une seule impulsion.

$$C_5 : N^{-1/4}$$

N : nombre total d'impulsions prévu durant le temps d'exposition.

Dans certains cas, cette valeur est susceptible d'être inférieure à la VLE qui s'appliquerait à une émission continue de même puissance crête et de même durée. Dans ces conditions, la VLE pour une exposition continue peut être utilisée.

2.4. Calcul de l'exposition de la cornée

L'exposition ou l'éclairement énergétique ($J \cdot \text{cm}^{-2}$ ou $W \cdot \text{cm}^{-2}$) qui parvient à la cornée, peut se calculer à partir des caractéristiques du laser et de la distance de la source à l'œil, selon la relation suivante :

$$I = \frac{4 P}{\pi(d + \Phi R)^2}$$

P est la puissance en watts du laser (ou l'énergie J en joules délivrée par impulsion).

d est le diamètre du faisceau à la source en cm.

Φ est l'angle de divergence du faisceau en rad.

R est la distance source-œil en cm.

Dans la relation précédente, on néglige l'atténuation de la lumière par l'atmosphère qui introduirait un facteur minorant de la forme : $e^{-\mu R}$ où μ est le coefficient d'atténuation atmosphérique à une longueur d'onde donnée.

De plus, les VLE entre 400 et 1400 nm ayant été établies sur la base d'un diamètre pupillaire de 0,7 cm, il faut considérer dans les calculs que l'énergie incidente d'un faisceau de diamètre inférieur à 0,7 cm est réparti sur toute la surface de la pupille de l'œil, soit 0,4 cm². Le terme $d + \Phi R$ doit donc être pris égal à 0,7 cm quand le calcul donne une valeur inférieure et à sa vraie valeur au-delà de 0,7 cm.

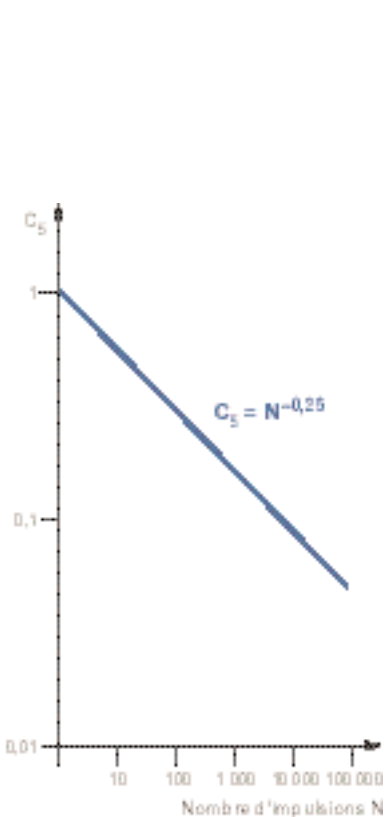


Fig. 11. Facteur de correction C_5 pour N (nbre d'impulsions) compris entre 1 et 100000

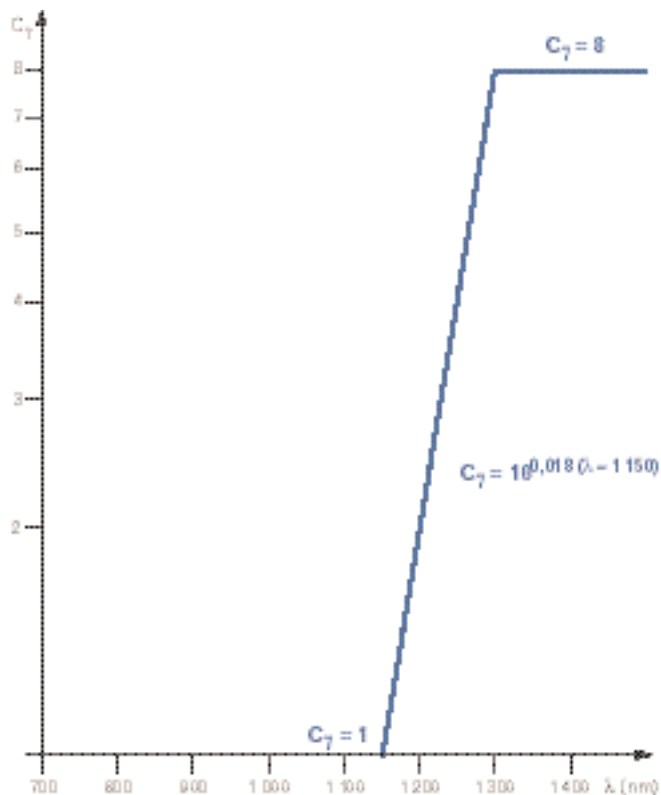


Fig. 12. Facteur de correction C_7 pour $\lambda = 1050$ à 1400 nm

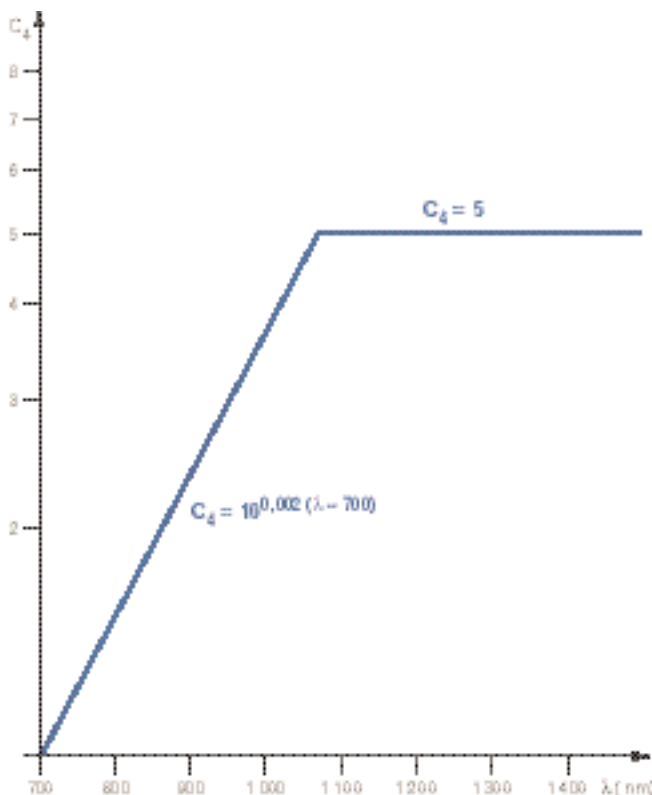


Fig. 10. Facteur de correction C_4 pour $\lambda = 700$ à 1400 nm

3. Classification des appareils à laser

Elle est normalisée et spécifiée dans la norme NF EN 60825-1 de juillet 1994. Cette classification, du ressort du fabricant, est associée à la prescription de mesures de sécurité. La norme range les lasers en cinq classes de risques.

Pour connaître en détail les critères d'affectation d'un laser à une classe particulière, consulter la norme NF EN 60825-1, tableaux I à IV (limites d'émission accessibles).

Classe 1 - Lasers considérés comme sans danger dans toutes les conditions d'utilisation prévisibles.

Classe 2 - Lasers émettant un rayonnement visible dans la gamme de longueurs d'onde comprises entre $0,4 \mu\text{m}$ et $0,7 \mu\text{m}$.

La protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral censé intervenir dans un délai de 0,25 s.

Pour ces appareils, la puissance maxi-

male des lasers à émission continue est généralement de 1 mW. Cependant, une exposition oculaire prolongée peut entraîner un dépassement des VLE. Il est donc recommandé de ne pas garder intentionnellement l'œil dans le faisceau pour des durées d'exposition allant jusqu'à 0,25 s.

Classe 3A - Lasers sans danger pour la vision à l'œil nu.

Pour les lasers émettant dans la gamme de longueurs d'onde comprises entre 0,4 μm et 0,7 μm , la protection de l'œil est normalement assurée par les réflexes de défense comprenant le réflexe palpébral. Pour les autres longueurs d'onde, le risque pour la vision à l'œil nu ne doit pas être supérieur à celui de la classe 1. La vision directe dans le faisceau de lasers de la classe 3A à l'aide d'instruments optiques (jumelles, télescopes, microscopes par exemple) peut être dangereuse.

Ces lasers ont généralement une puissance de sortie pouvant atteindre 5 mW pour les émissions continues ou cinq fois la limite d'émission accessible de la classe 2 pour les émissions à impulsions répétitives ou à balayage en lumière visible. Toutefois en un point quelconque du faisceau, l'éclairement énergétique ne doit pas être supérieur à 25 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Classe 3B - Lasers dont la vision directe du faisceau est toujours dangereuse.

La vision de réflexions diffuses est normalement sans danger et, dans la gamme de longueurs d'onde correspondant à l'émission de lumière visible, il y a lieu de respecter une distance minimale écran-cornée de 13 cm et une durée maximale de vision de 10 s. D'autres conditions de vision imposent une comparaison de l'exposition à la réflexion diffuse avec la valeur limite d'exposition VLE.

A titre indicatif, cette classe correspond aux lasers dont la puissance d'émission continue est inférieure à 0,5 W.

Classe 4 - Lasers de puissance supérieure à celle des lasers de classe 3B et qui sont capables de produire des réflexions diffuses dangereuses.

Ils peuvent causer des dommages sur la peau et constituer un danger d'incendie. Leur utilisation requiert des précautions significatives.

4. Protection contre le rayonnement

Elle s'attache principalement à garantir les personnes des effets thermiques ou photochimiques du rayonnement, notamment sur l'œil.

4.1. Évaluation de l'ordre de grandeur et calcul du risque

On peut se faire une idée approximative du niveau de risque que présente l'utilisation d'un laser par la classe à laquelle il appartient. Cette classe doit être déterminée et communiquée par le constructeur, l'ensemblier ou le fournisseur.

On considère a priori que certains lasers, sans être inoffensifs, ne peuvent occasionner des lésions graves aux personnes et n'appellent pas de mesures de protection importantes. Ce sont les lasers de classe 2 et à la limite, de classe 3A. En revanche, pour les lasers de classes 3B et 4, le calcul ou la mesure des densités d'énergie apportées et, en conséquence, la prise de mesures de protection élaborées sont indispensables.

Le CEN TC 123 (comité technique 123 du comité européen de normalisation) a été chargé d'étudier les modalités d'application de ces règles de sécurité au cas des machines utilisant des sources laser. La norme expérimentale NF E 60-601 «Machine à laser pour le travail des matériaux - Sécurité» de décembre 1991 constitue la contribution française en vue d'une normalisation européenne.

4.2. Dispositions de construction

Lors de la conception et de la fabrication des appareils à lasers, les spécifications techniques de la norme NF EN 60825-1 doivent être respectées, notamment :

- mise en place de dispositifs de sécurité adéquats (capots de protection, atténuateur, verrouillage à sécurité positive, commande à clef, avertisseur d'émission...);
- étiquetage des appareils;
- fourniture d'une notice détaillée (instructions pour le montage, l'entretien et l'utilisation sans danger...);

Des logiciels sont actuellement disponibles pour apporter une aide au diagnostic des risques qui peut également être établi par des sociétés spécialisées de services (cf. chapitre 6).

4.3. Mesures de protection collectives

Ces mesures portent sur les locaux ou les lieux où sont mis en œuvre des lasers, plus particulièrement les zones de parcours des rayonnements directs et réfléchis, de manière à empêcher des propagations dangereuses pour les personnes et éventuellement, les matériels. Ces mesures s'attachent aussi à organiser, dans le même sens, l'exploitation des appareils.

4.3.1. Locaux d'exploitation

■ Autant que possible, l'exploitation d'un laser doit se faire dans un local ou dans un lieu réservé à cet usage, clos ou délimité. Il peut en être ainsi pour des machines à laser destinées à des travaux d'usinage et surtout à des travaux de recherche. Il n'en va pas de même pour des lasers de faible puissance utilisés sur des chantiers (de l'ordre de quelques mW), des lasers de faible puissance destinés à des réglages dans des installations industrielles (alignement d'éléments de machines, interféromètres, barrages immatériels...), des lasers destinés à des opérations de topographie, de communications, des lidars (lasers pour la détection à distance ou affectés à la télémétrie).

■ Il est conseillé de prévoir un bon éclairage des locaux où sont exploités les lasers afin de réduire l'ouverture de la pupille.

■ Les accès des locaux et leurs ouvertures vers l'extérieur ne doivent pas être situés dans l'axe d'un faisceau direct.

■ Le sol doit être libre d'obstacles.

■ Les causes de réflexion et de diffusion accidentelles de faisceaux laser doivent être supprimées (vitres mal placées, meubles ou objets présentant des faces polies). Les peintures (murs, cloisons, plafonds...) et les revêtements de sol doivent de préférence être mats. A cet égard, les réflexions diffuses de lasers de la classe 4, des faisceaux focalisés de lasers de la classe 3 à lumière visible ou infrarouge proche doivent être considérées comme dangereuses et traitées comme telles.

■ Lors de l'utilisation de lasers puissants (des classes 3 à faisceau focalisé ou 4), il faut éliminer les possibilités d'impact du faisceau sur des matériaux inflammables (bois, papier, tissus ou matières plastiques) qui peuvent être à l'origine d'incendies sous des densités de puissance de

l'ordre de quelques $W.cm^{-2}$ appliquées pendant quelques secondes.

■ Les accès aux zones d'émission laser doivent être signalés en utilisant les panneaux conformes à l'arrêté ministériel du 4 novembre 1993 «Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail» et à la norme NF X 08-003 «Symboles graphiques et pictogrammes - couleurs et signaux de sécurité» de décembre 1994. Cette signalisation est complétée par la mention de la classe de l'appareil à laser et les consignes prévues dans la norme NF EN 60825-1. Ces accès peuvent être contrôlés, au moins quand des lasers sont en fonctionnement.

4.3.2. Parcours du faisceau laser

■ La détermination et l'aménagement du parcours du faisceau laser sont évidemment inutiles s'il est totalement enclos (déviations et réflexions comprises) dans une enveloppe fermée comme, par exemple, dans les granulomètres, les imprimantes...).

■ La détermination du parcours des faisceaux laser hors fibre optique quand cette technique est utilisée (Norme NF EN 60825-2 «Sécurité des appareils à laser - Partie 2 : sécurité des systèmes de télécommunication par fibres optiques» d'avril 1994), doit être effectuée en tenant compte de leurs déviations, leurs réflexions, leurs diffusions normales ou accidentelles (si possible).

Cette détermination, qui ne doit pas être réalisée à l'œil nu, peut faire appel à des moyens particuliers : papiers fluorescents pour l'ultraviolet et l'infrarouge proche, feuilles de matière plastique...

a) Parcours dangereux

En dehors des cas d'appareils spécialement conçus (transferts de lasers d'alignement en fonction ou robots de soudage, par exemple), l'orientation d'un laser ne doit pas être modifiée pendant qu'il émet. Il est souhaitable que le parcours des faisceaux laser soit situé à une hauteur différente de l'œil des personnes debout ou assises. On évitera des propagations intempestives en fixant par des supports appropriés les émetteurs laser et les éléments optiques placés sur le parcours des rayonnements.

Les fenêtres de Brewster (dispositif à lames servant à minimiser les réflexions) peuvent provoquer dans un plan vertical des réflexions inattendues et dangereuses.

Lors de l'utilisation de lasers pour des opérations d'usinage, les réflexions intem-

pestives proviennent le plus souvent des pièces à usiner.

b) Écrans pour lasers

Les parcours des rayonnements dangereux (normaux ou anormaux mais prévisibles) doivent être totalement encagés par des écrans appropriés. Ceux-ci sont aptes à supporter l'impact d'un faisceau direct accidentel jusqu'à l'intervention nécessaire et protège efficacement les opérateurs pendant ce laps de temps.

Pour les rayonnements visibles et invisibles, des matériaux opaques, foncés et à surface mate conviennent (aluminium anodisé, par exemple). On leur préfère souvent des matériaux translucides, voire transparents (tubes sur certains trajets, écrans...), qui permettent de repérer les faisceaux visibles et d'avoir une bonne vision des opérations d'usinage.

Pour les infrarouges de longueurs d'onde supérieures à 5000 nm (lasers à CO_2), les matières plastiques courantes (polymères) ou des verres à vitre suffisent (polyméthacrylate de méthyle, «plexiglas», ou polycarbonate).

Pour les ultraviolets de longueurs d'onde inférieures à 330 nm, le verre à vitre convient. Le polyméthacrylate de méthyle, modérément transparent aux longueurs d'onde comprises entre 250 et 320 nm, peut être utilisé s'il est suffisamment épais.

Pour les rayonnements situés entre 800 et 5000 nm, il faut disposer de verres spéciaux, ou éventuellement, entre 2000 et 5000 nm, de matière plastique suffisamment épaisse. Des normes internationales et européennes sont en cours de préparation.

c) Limitation de la propagation d'un faisceau laser

La propagation libre d'un faisceau constitue un danger qui doit être maîtrisé.

Les cibles réceptrices du rayonnement laser peuvent être des pièces à usiner (elles peuvent donner lieu à réflexion intempestive), le plan de pose de ces pièces, des dispositifs expérimentaux destinés à utiliser de l'énergie, des intercepteurs pour la matérialisation de position et des récepteurs de diverses natures. Les points d'impact du faisceau peuvent constituer des sources dangereuses par réflexion spéculaire ou même diffuse. Au plan de la sécurité, ils doivent être prises en compte comme des sources supplémentaires.

Les zones de travail des faisceaux laser utilisés pour l'usinage doivent présenter des surfaces mates et sombres. Les matériaux des absorbeurs d'énergie ne doivent pas être inflammables lorsqu'ils arrêtent des faisceaux laser de classe 4. Dans des

cas sévères, on peut mettre en œuvre des «pièges à énergie» ou des réflexions par miroirs convexes, qui répartissent l'énergie sur des surfaces de dimensions suffisantes pour absorber l'énergie sans dommage.

4.3.3. Signalisation

Les zones parcourues par les rayonnements laser doivent être signalées de façon apparente, d'autant plus qu'un rayonnement peut être invisible et que le port de lunettes de protection limite la perception du faisceau visible dont celles-ci protègent l'œil. Doivent également être signalés de manière évidente les points d'émergence, de réflexion (normale ou anormale, mais prévisible), d'absorption ou d'impact de faisceaux laser.

4.3.4. Mesures relatives à l'exploitation

■ Contrôle de l'aire ou de l'espace où le rayonnement laser est dangereux, incluant l'interdiction d'accès pour toute personne non concernée, pendant les périodes d'émission.

■ Réalisation des réglages en évitant les émissions dangereuses : les opérations d'alignement et de réglage précédant les émissions de lasers puissants peuvent se faire en munissant le laser d'un atténuateur ou au moyen d'un laser peu puissant coaxial au laser principal (He-Ne de l'ordre du mW, par exemple).

■ Mesures particulières : les personnes présentes ne doivent pas porter d'objets réfléchissants.

■ Commande des émissions : le pupitre de commande devrait être placé en dehors des emplacements exposés à des émissions dangereuses. La commande des lasers des classes 3 et 4 doit être sous la dépendance d'une clef de contrôle, enlevée lorsque l'appareil n'est pas utilisé et détenue par une personne qualifiée. On peut utiliser des tapis de contact interdisant la commande des lasers tant que les personnes sont présentes à l'intérieur de certaines zones dangereuses. On doit disposer d'une commande d'arrêt d'urgence, aisément repérable, pour les lasers de classes 3 et 4.

■ Un système d'avertissement doit être installé en vue de prévenir les personnes susceptibles de pénétrer dans une zone dangereuse, avant le début de l'émission.

4.3.5. Problèmes particuliers

L'utilisation d'appareils d'optique pour la vision de la cible des faisceaux laser des classes 3 et 4 est dangereuse : c'est le cas de certains lasers d'usinage. La commande du faisceau peut être asservie à l'occultation des appareils d'optique (un miroir basculant, par exemple) ou des atténuateurs suffisants doivent y être insérés, ce qui est aisé pour la plupart des rayonnements invisibles.

Des lasers à balayage (lecture de codes barres, relevés topographiques...) doivent leur relative sécurité d'emploi à la courte durée du passage du faisceau au niveau de l'œil et à la faible puissance des lasers utilisés. L'arrêt accidentel du balayage doit entraîner l'arrêt ou l'occultation de l'émission laser.

4.4. Mesures de protection individuelles

La mise à disposition de protections individuelles, telles que lunettes ou gants, et leur utilisation effective a pour buts :

- de suppléer une protection collective techniquement impossible à réaliser ou beaucoup trop onéreuse ;

- d'attendre la mise en place de la protection collective ou de mettre en place celle-ci ;

- de compléter une protection collective;

- d'intervenir ponctuellement et brièvement.

4.4.1. Protection de la peau

S'il y a possibilité d'approcher les mains de points non protégés du parcours d'un faisceau laser puissant, il est nécessaire de porter des gants de protection ininflammables. Les gants tricotés ne conviennent pas dans la mesure où ils peuvent laisser pénétrer le faisceau. Cette protection convient pour des faisceaux de quelques watts à quelques dizaines de watts. Au delà, il faut atténuer le faisceau avant d'intervenir.

4.4.2. Protection de l'œil

L'emploi de lunettes de protection est en particulier nécessaire pour des postes de travail où il existe un risque de réflexion spéculaire liée, notamment, au pivotement ou au dérèglement accidentels des éléments du système optique. C'est l'analyse du risque qui permet de définir

le type de lunette appropriée. Cette analyse doit être conduite avec le plus grand soin par une personne spécialement formée au risque laser.

Les lunettes vendues en Europe doivent porter le marquage de conformité CE, attestant qu'elles sont conformes aux exigences essentielles de sécurité de la directive européenne n° 89/686/CEE relative aux équipements de protection individuelle.

Les normes NF EN 207 et NF EN 208 permettent de vérifier cette conformité en définissant les spécifications, les méthodes d'essai et le marquage de ces équipements. Elles imposent un marquage d'identification sur les lunettes comprenant, en particulier, le domaine spectral d'utilisation et le numéro d'échelon. Ces normes fournissent aussi un guide pour le choix et l'utilisation.

Les filtres de protection oculaire sont caractérisés par un numéro d'échelon qui dépend de la densité optique et de la stabilité au rayonnement laser aux longueurs d'onde spécifiées.

Les numéros d'échelon sont définis dans les tableaux résumés VI et VII. Pour chacun des trois domaines spectraux, ces tableaux donnent l'éclairage et la densité d'énergie que le protecteur doit supporter sans augmentation de sa transmission (une dégradation de la qualité optique est admise). Les spécifications

TABLEAU VI

NUMÉROS D'ÉCHELON DES FILTRES ET DES LUNETTES DE PROTECTION LASER
(facteur spectral de transmission maximal et résistance contre le rayonnement laser)

Numéro d'échelon	Facteur spectral maximal de transmission aux longueurs d'onde laser	Eclairage (E en W.m ⁻²) et exposition énergétique (H en J.m ⁻²) pour la mesure de la transmission et le contrôle de la stabilité au rayonnement laser selon les domaines de longueurs d'onde								
		180 à 315 nm			> 315 à 1400 nm			> 1400 nm à 10000 μm		
		E	H	E	E	H	E	E	H	E
		Pour les conditions d'essai								
		D	I, R	M	D	I, R	M	D	I, R	M
L ⁿ (*)	10 ⁻ⁿ	10 ⁿ⁻³	3.10 ⁿ⁺¹	3.10 ⁿ⁺¹⁰	10 ⁿ⁺¹	5.10 ⁿ⁻³	5.10 ⁿ⁺⁶	10 ⁿ⁺³	10 ⁿ⁺²	10 ⁿ⁺¹¹

TABLEAU VII

LUNETTES DE RÉGLAGE LASER. NUMÉROS D'ÉCHELON, FACTEUR SPECTRAL DE TRANSMISSION ET PUISSANCE MAXIMALE DU LASER

Numéro d'échelon	Domaine du facteur spectral de transmission τ		Lasers continus et lasers impulsifs avec une durée d'impulsions ≥ 2.10 ⁻⁴ s	Lasers impulsifs avec une durée d'impulsions ≥ 10 ⁻⁹ à 10 ⁻⁴ s
	Filtres	Montures	Puissance maximale du laser (W)	Energie maximale des impulsions (J)
R ⁿ (*)	10 ⁻⁽ⁿ⁺¹⁾ < τ(λ) ≤ 10 ⁻ⁿ	τ(λ) ≤ 10 ⁻ⁿ	10 ⁿ⁻³	2.10 ⁿ⁻⁷

(*) 1 ≤ n ≤ 10 pour les lunettes de protection laser. 1 ≤ n ≤ 5 pour les lunettes de réglage laser.

correspondent aux différents modes d'émission des lasers : continu (D), à impulsion relaxée (R) ou déclenchée (I), à modes couplés (M).

En pratique un protecteur d'échelon Ln peut avoir une densité supérieure à n, ou une résistance supérieure aux chiffres du tableau. C'est la plus restrictive des deux valeurs qui fixe le numéro d'échelon.

Les normes européennes distinguent deux catégories de protecteurs :

- les lunettes de protection contre les rayonnements laser dans la plage comprise entre 180 nm et 1000 µm, qui sont couvertes par la norme EN 207,

- les lunettes de réglage laser destinées aux travaux de réglage des systèmes laser pour lesquels les rayonnements dangereux sont émis dans la plage allant de 400 nm à 700 nm, qui sont l'objet de la norme EN 208.

Le CEN/TC 85 prépare un guide pour le choix et l'utilisation des protecteurs individuels de l'œil et de la face, qui est disponible en 1999.

a) Lunettes de protection contre les lasers

Les numéros d'échelon pour les lunettes de protection sont résumés dans le tableau simplifié VI. Les spécifications correspondent aux différents modes d'émission des lasers : continu (D), à impulsions relaxées (R) ou déclenchées (I), à modes couplés (M).

Les lunettes de protection contre les lasers doivent être conçues de façon à :

- atténuer convenablement l'énergie du faisceau à la longueur d'onde ou à la bande de longueur d'onde spécifique du laser utilisé ;

- conserver leur efficacité sous l'effet d'un rayonnement caractérisé par les valeurs d'éclairement et d'exposition énergétique indiquées au tableau VI ;

- résister par leurs filtres à 100 impulsions pour les lasers impulsifs et à une exposition de 10 s pour les lasers continus ;

- protéger complètement chaque œil en évitant, en particulier, une pénétration latérale de la lumière laser.

De plus, ces lunettes doivent :

- assurer une bonne qualité visuelle : transmission dans le visible au moins égale à 20 % (aberrations, altération des couleurs et diffusion de la lumière minimisées, champ visuel adapté) ;

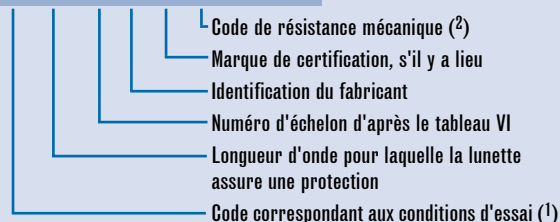
- résister suffisamment au vieillissement par les UV, à la chaleur, à la chute sur un sol dur et être ininflammables.

Les oculaires doivent former avec leur monture un ensemble indissociable afin d'éviter leur remplacement erroné par d'autres filtres inadéquats.

Les lunettes de protection étant conçues pour une longueur d'onde et une densité d'énergie maximale bien déterminées, leur utilisation pour des lasers de caractéristiques différentes est très dangereuse puisqu'elles n'apportent plus de protection.

EXEMPLE 1 (d'après pr EN 207 révisée) Marquage des lunettes de protection laser

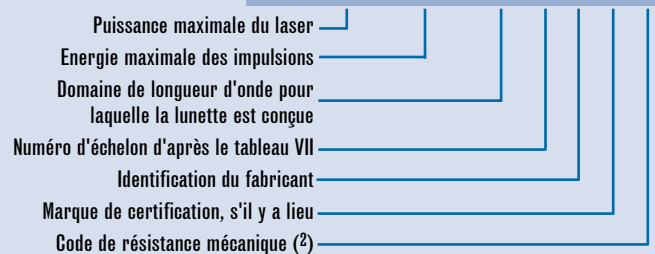
D 633 L₅ X ZZ S



(1) Ces codes sont les suivants : D : pour les lasers continus, I : pour les lasers à impulsions, R : pour les lasers à impulsions géantes, M : pour les lasers à impulsions à modes couplés.

EXEMPLE 2 (d'après pr EN 208 révisée) Marquage des lunettes de réglage laser

1 W 2.10⁻⁴ J 514 R₄ X ZZ S



(2) Les lunettes satisfaisant à la spécification de résistance mécanique doivent porter un des codes indiqués dans l'EN 166 (article 9) de septembre 1995 "Protection individuelle de l'œil - Spécifications". S : solidité renforcée, F : impact à faible énergie, B : impact à moyenne énergie, A : impact à haute énergie.

Des précautions particulières doivent être prises pour éviter tout risque d'erreur dans le choix des lunettes, notamment lors de la mise en œuvre de lasers émettant une lumière dont la longueur d'onde est réglable (lasers à gaz ionisé, lasers à colorant). Dans le marquage normalisé porté sur les montures ou les filtres sont mentionnés notamment le code (D,R,I,M) correspondant à l'essai de stabilité au laser, la longueur d'onde ou domaine de longueurs d'onde pour lequel le protecteur de l'œil assure une protection ainsi que le numéro d'échelon (cf. Exemple 1).

Les lunettes de protection ont, à la longueur d'onde du laser concerné, des facteurs d'absorption très élevés, ce qui ne permet pas à leurs utilisateurs de distinguer le faisceau du laser, donc de situer la zone dangereuse. Cette absence de vision du faisceau peut leur faire oublier la présence d'un danger important et les conduire à des expositions directes au rayonnement plus fréquentes (risque de brûlure et détérioration rapide des lunettes).

Pour les lasers ultraviolets et infrarouges, dont les rayonnements sont par nature invisibles, il est nécessaire de prévoir une délimitation stricte des zones dangereuses et une matérialisation du parcours du rayon laser.

La résistance des lunettes de protection contre les laser au rayonnement direct, même répondant aux spécifications des normes, est en général limitée. De ce fait, il est important d'éviter la vision directe du faisceau et de remplacer les filtres dès l'apparition de signes évidents de détérioration (décoloration, fissuration, points de fusion...).

En particulier les lunettes de protection contre les lasers YAG et CO2 ne protègent presque jamais contre les faisceaux HeNe d'alignement associés. Il est donc toujours dangereux de placer l'œil dans le trajet des faisceaux de ces lasers.

b) Lunettes de réglage laser

Les lunettes de réglage sont utilisées pour les travaux sur des lasers émettant dans le domaine visible et dont la puissance ne dépasse pas 100 W, si la vision du faisceau laser est indispensable. Elles répondent à des exigences similaires de conception que les lunettes de protection, quant à la stabilité au laser, à la qualité optique et à la solidité.

Les caractéristiques des filtres sont calculées pour que la puissance du faisceau incident soit réduite à 1 mW au plus (valeur supérieure spécifiée pour les laser continus de classe 2) tout en permettant

une vision correcte du faisceau laser. La norme européenne considère en effet que la protection contre les lasers de classe 2 est normalement assurée par le réflexe de fermeture des paupières (cf. § 2),

Les numéros d'échelon des lunettes de réglage sont résumés au tableau VII.

Le marquage selon la norme EN 208 prévoit l'indication de la puissance maximale du laser et l'énergie maximale des impulsions, la longueur d'onde (ou domaine de longueurs d'onde) pour laquelle la protection est assurée ainsi que le numéro d'échelon (cf. Exemple 2).

Ces lunettes sont très utiles sur le plan pratique mais ne garantissent donc une protection que si le réflexe de fermeture de la paupière est normal. Leur emploi doit être réservé aux travaux où la vision du faisceau laser est indispensable.

Pour les lasers dont la puissance est supérieure à 100 W ou l'énergie des impulsions est supérieure à 0,02 J, ainsi que pour les personnes dont le réflexe palpébral est déficient, des lunettes de protection laser doivent être utilisées à la place des lunettes de réglage.

Une liste indicative des fournisseurs de lunettes de protection figure en annexe II.

5. Autres mesures de protection

5.1. Protection contre les risques électriques

Les tensions utilisées dans les lasers, au-delà de l'alimentation de certains circuits basse tension, peuvent être très élevées, de l'ordre de plusieurs kV. Les pièces sous tension - notamment les bancs de condensateurs - doivent être inaccessibles en cours de fonctionnement. L'accès à ces pièces ne doit être possible que si l'alimentation est coupée et les condensateurs déchargés. Le risque peut subsister pour le personnel d'entretien et de dépannage.

Les dispositions du décret n° 88-1056 du 14 novembre 1988 concernant la protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques sont à respecter. Les éléments des appareils à laser alimentés en basse tension doivent répondre aux spécifications de la norme NF C 15-100 «Installations électriques à basse tension : Règles» de mai 1991 et de ses additifs de décembre 1994 et de décembre 1995. Les circuits sous haute tension doivent être conçus selon la norme NF C 13-200 «Installations électriques à haute tension :

Règles» d'avril 1987 et de son additif de décembre 1989.

Les accès aux zones d'émissions lasers doivent être signalés en utilisant les panneaux conformes à l'arrêté ministériel du 4 novembre 1993 «Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail» et à la norme NF X 08-003 «Symboles graphiques et pictogrammes - couleurs et signaux de sécurité» de décembre 1994. Ces accès peuvent être contrôlés, au moins quand des lasers sont en fonctionnement.

En ce qui concerne les appareils à laser proprement dit, cette signalisation est complétée par la mention de la classe du matériel et les indications prévues dans la norme NF EN 60825-1 (cf. fig. 13 et 14).

Pour les appareils à laser à usage médical, il y a lieu de se référer aux règles particulières de sécurité électrique de la norme NF EN 60601-2-22 classée en France sous le numéro NF C 74-341 «Appareils électromédicaux - 2^e partie : Règles particulières de sécurité pour les appareils thérapeutiques et de diagnostic à laser» d'avril 1996.

5.2. Protection contre la pollution chimique

En cas d'émission de fumées incommodes, insalubres, irritantes ou toxiques, il convient de capter ces fumées à la source, au fur à mesure de leur production et les évacuer à l'extérieur des locaux de travail. Les systèmes de captage employés à de telles fins sont analogues aux matériels utilisés pour le soudage à l'arc

(cf. Guide pratique de ventilation, n° 7, INRS ED 668, 2^e éd., 1993).

5.3. Surveillance médicale

Une telle surveillance paraît nécessaire pour les personnes opérant avec des lasers des classes 3B et 4. Elle a pour but d'établir l'état de la vue et l'aptitude des personnes avant exposition, périodiquement et, après des incidents, de détecter et d'évaluer les dommages corporels occasionnés aux yeux, éventuellement à la peau.

6. Signalisation

Il convient de se référer à l'arrêté ministériel du 4 novembre 1993 «Signalisation de sécurité et de santé sur les lieux de travail» et aux exemples proposés dans la norme NF EN 60825-1 (cf. fig. 13 et 14).

En plus des dispositions réglementaires et normatives précédentes, il est vivement conseillé pour les lasers de puissance, de placer un panneau d'interdiction d'approche aux porteurs d'implants actifs.

Cette signalisation, actuellement généralisée en Allemagne, peut être disposée à proximité des circuits haute tension, sur les portes d'armoire les contenant, par exemple (cf. fig. 15).

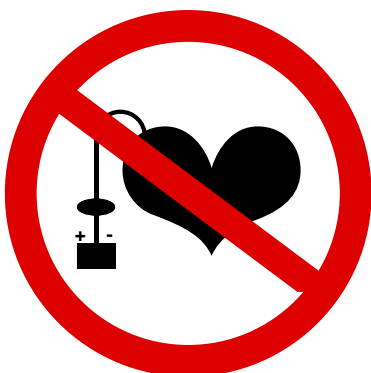
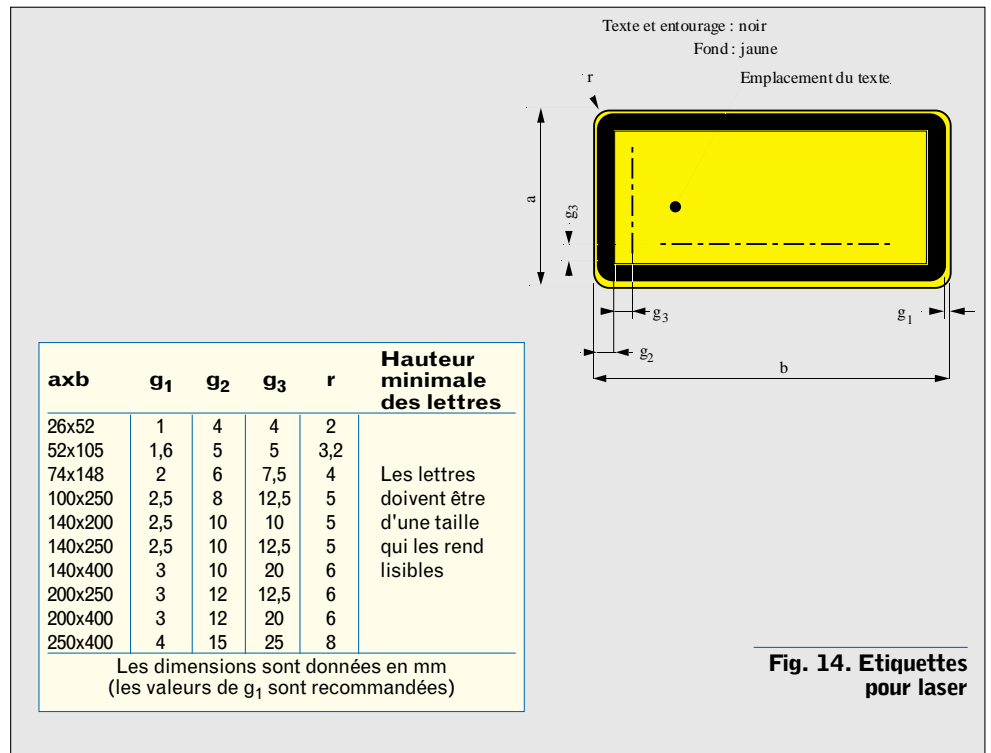
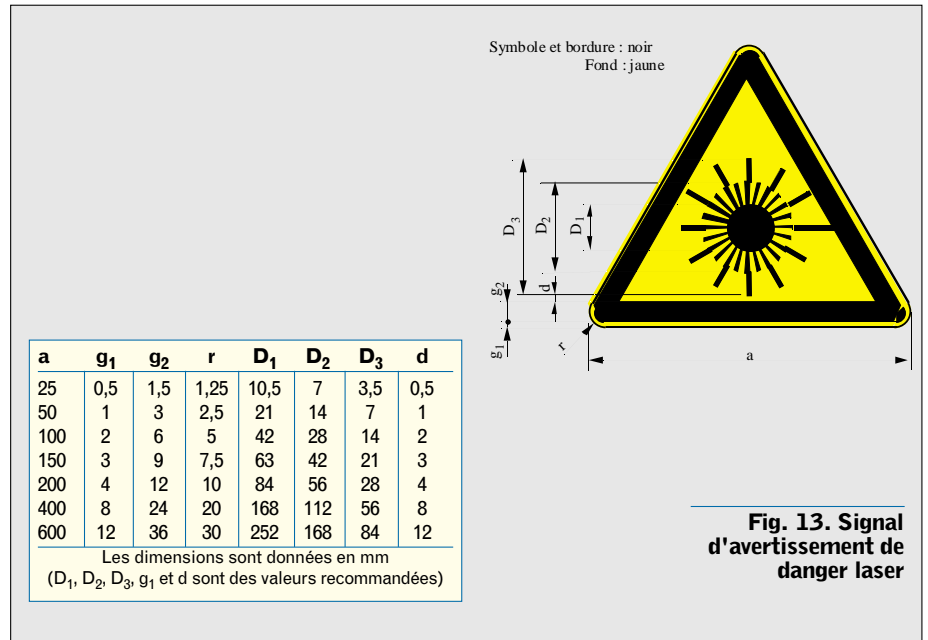


Fig. 15. Signal d'interdiction aux porteurs d'implants actifs (un panneau similaire figure dans la norme NF EN 50061 «Sécurité des stimulateurs cardiaques implantables» de juillet 1988 amendée en novembre 1996)

BIBLIOGRAPHIE

Les textes de normes qui suivent sont disponibles à l'Association Française de Normalisation - AFNOR, Tour Europe, 92080 Paris-La Défense cedex 7

NF EN 60825-1 - Sécurité des appareils à laser - Partie 1 : classification des matériels - Prescriptions et guide de l'utilisateur. juillet 1994.

NF EN 60825-2 - Sécurité des appareils à laser - Partie 2 : sécurité des systèmes de télécommunication par fibres optiques. avril 1994.

EN 207 - Protection individuelle de l'œil - Filtres et protecteurs de l'œil contre les rayonnements laser (lunettes de protection laser). octobre 1993 (version révisée en cours de publication).

EN 208 - Protection individuelle de l'œil - Lunettes de protection pour les travaux de réglage sur les lasers et les systèmes laser (lunettes de réglage laser). octobre 1993 (version révisée en cours de publication).

NF EN 61040 - Détecteurs, instruments et matériels de mesurage de puissance et d'énergie des rayonnements laser. février 1993.

NF EN 12626 - Sécurité des machines. Machines à laser. Prescriptions de sécurité. décembre 1997.

NF EN 31252 - Lasers et équipements associés aux lasers. Sources lasers. Exigences minimales pour la documentation. septembre 1994.

NF EN 31253 - Lasers et équipements associés aux lasers. Sources laser. Interfaces ???? septembre 1994.

NF EN 60601-2-2 - Appareils électromédicaux. Partie 2 : règles particulières de sécurité pour les appareils thérapeutiques et de diagnostic à laser. avril 1996.

NF EN ISO 11149 - Optiques et instruments d'optiques. Tubes et équipements associés aux lasers. Connecteurs pour fibres optiques pour les applications autres que télécommunications. décembre 1997.

NF EN ISO 11151 - Optiques et instruments d'optiques. Lasers et équipements associés aux lasers. Méthodes d'essai des facteurs d'absorption des composants optiques pour laser. décembre 1997.

pr EN 12254 - Ecrans pour postes de travail au laser. Exigences et essais de sécurité. date????

pr NF EN ISO 11151-1 - Lasers et équipements associés aux lasers. Composants optiques standard. Partie 1 : composants pour la plage spectrale UV, visible et proche infrarouge.

pr NF EN ISO 11151-2 - Lasers et équipements associés aux lasers. Composants optiques standard. Partie 2 : composants pour la plage spectrale infrarouge.

pr NF EN ISO 11145 - Optique et instruments d'optique. Lasers et équipements associés aux lasers. Vocabulaire et symbole;

pr NF EN ISO 11254-1 - Lasers et équipements associés aux lasers. Détermination du seuil d'endommagement provoqué par laser sur les surfaces optiques. Partie 1 : Essai 1 sur 1.

pr NF EN ISO 13694 - Optiques et instruments d'optiques. Lasers et équipements associés aux lasers. Méthodes d'essai de distribution de la sensibilité de puissance (d'énergie) du faisceau laser.

pr NF S 10-140 - Optiques et instruments d'optiques. Lasers et équipements associés aux lasers. Compatibilité électromagnétique (CEM). Exigences et essais.

pr NF EN ISO 11810 - Lasers et équipements associés aux lasers. Draps chirurgicaux et couverture de protection des patients adaptées à l'utilisation des lasers

Textes réglementaires, documents scientifiques et techniques

Proposition de directive concernant l'exposition aux agents physiques. Journal officiel des Communautés européennes le 19 août 1994 sous le numéro 94/C 230/03.

Valeurs limites d'exposition et indices d'exposition biologiques, pour 1997-1998. ACGIH, Cincinnati, 1997.

La protection contre les rayonnements non ionisants, 2^e éd., OMS - Publications régionales - Série européenne n°25.

HEE G. et coll. - Valeurs limites d'exposition aux agents physiques en ambiance de travail. Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail,

1992, 148 (tiré à part ND 1886, mis à jour en mai 93).

HEE G., GOUERNE R. - Les lasers de chantiers du BTP. Appareils d'alignement et rotatifs. Paris, INRS, coll. Fiche pratique de sécurité ED 61 - ED 62- revue TS de novembre et décembre 1996.

Risques biologiques dus aux lasers, Service Éditions de la CRAM du Centre.

SALSIS, et coll. - Comportement non linéaire des équipements de protection contre les lasers induit par des flux lumineux élevés. Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 1998, 171, pp. 129-138.

Les lasers au laboratoire - Conseils pratiques de prévention et protection, 3^e éd. Saclay, CEA/CE, Rapport CEA-R-5432, 1992.

Syndicat des Industries de Tubes Electroniques et Semiconducteurs «SITELESC» : Laser - Mesures de prévention, recommandations de mise en œuvre, 4^e édition, 1995.

APAVE, CEA, IREPA, LASOPTIC : Laser - Notice d'information sur les risques liés à l'utilisation des lasers en milieu industriel et de recherche. Paris, APAVE, coll. Notices d'information.

APAVE : Laser - Notice d'information sur les risques liés à l'utilisation des lasers en milieu médical. Paris, APAVE, coll. Notices d'information.

Risque laser : logiciel : base de données interactive pour la formation et l'information sur la sécurité des lasers utilisés en milieu industriel ou scientifique conçue et réalisée par l'APAVE de l'OUJEST et la société GÉNÉSIE (à paraître en janvier 1998).

Directive européenne «EPI» n° 89/686/CEE du 21 décembre 1989, modifiée par les directives n° 93/95/CEE du 29 octobre 1993 et n° 96/58/CEE du 3 septembre 1993.

Décret n° 93-765 du 29 juillet 1993 (transcription de la directive «EPI» en droit français).

ANNEXE I

MESURAGES - CALCULS

Ce chapitre donne quelques moyens de mesurage et d'assistance pour l'analyse du risque laser.

Les appareils et systèmes à laser conformes à la norme NF EN 60825-1 comportent un étiquetage de classification et sont accompagnés des informations suffisantes pour que l'utilisateur prenne les mesures de sécurité nécessaires. Cependant de nombreux lasers vendus n'ont pas cette conformité (il n'y a pas de directive européenne pour les lasers en général, ni de réglementation nationale). Par ailleurs, la mise en œuvre particulière de l'utilisateur modifie généralement la classification initiale.

L'évaluation du risque réel doit être faite par une personne spécialement formée. Le chapitre 3 a montré que de nombreux paramètres sont à prendre en compte, impliquant des mesures de puissance ou d'énergie, des mesures d'éclairement ou de densité

de puissance, de fréquence et de durée, des mesures de surface et de distance.

Le tableau ci-contre fournit des informations sur quelques radiomètres destinés à mesurer les puissances ou énergies des faisceaux laser. Pour bien choisir un radiomètre, il faut prendre en compte, en plus des caractéristiques citées dans le tableau, le diamètre de la partie sensible et les niveaux d'éclairement maximal. Les mesures de fréquence et de durée nécessitent un détecteur rapide et un oscilloscope ou, mieux, un fréquencemètre, l'ensemble ayant une bande passante au moins égale à deux fois l'inverse de la plus petite durée d'impulsion. Radiomètres et fréquencemètres doivent être régulièrement raccordés aux étalons nationaux (raccordement garanti par un certificat d'étalonnage COFRAC).

Il peut être nécessaire de connaître dans le détail la répartition d'éclairement dans le faisceau. On utilise pour cela un analyseur de faisceau. Des analyseurs utilisant une caméra CCD pour les faisceaux de l'UV à 1 μm sont distribués par certains fournisseurs cités ci-après (Coherent, Equipements scientifiques, LOT-Oriel, Melles Griot, Optilas, etc.). D'autres techniques (balayage par une aiguille tournante par exemple) permettent d'analyser les faisceaux continus de forte puissance. Enfin, la société Lasoptic, 91160 Champlan (tél. 01 69 09 12 46) propose un détecteur dénommé «Diamètre» avec sonde au silicium ou au germanium destiné à faciliter l'analyse du risque laser en indiquant, par exemple, les caractéristiques de la protection nécessaire. Elle commercialise également un logiciel d'assistance à la détermination du risque laser (Lasersafety).

ANNEXE I

(suite)

TABLEAU X

APPAREILS DE MESURAGE : LISTE NON LIMITATIVE

Fabricant	Type (1)	Gammes de mesure (2)	Principaux distributeurs en France
COHERENT	Thermopile + DAS Pyroélectrique + DAS Silicium	$0,19 \mu\text{m} < \lambda < 10,6 \mu\text{m} : 100 \text{ mW} < P < 6 \text{ kW}.$ $0,19 \mu\text{m} < \lambda < 20 \mu\text{m} : \mu\text{J} < E < 20 \text{ J}$ $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 1 \mu\text{m} : 1 \text{ nW} < P < 50 \text{ mW}.$	Coherent 4 rue René Razel, bât. Azur, domaine technologique de Saclay, 91892 Orsay cedex tél. 01 69 85 51 45
DIGIRAD	Pyroélectrique + DAS Silicium	$UV < \lambda < IR : \mu\text{W} < P < W ; \mu\text{J} < E < J.$ $UV < \lambda < 1 \mu\text{m} : \text{pW} < P < \mu\text{W} ; \text{pJ} < E < \mu\text{J}.$	Optilas Composants 4 allée du Cantal, ZI la Petite Montagne, 91018 Evry Lisses tél. 01 60 79 59 00
GENTEC	Pyroélectrique + DAS Thermopile + DAS Thermopile + DAV	$190 \text{ nm} < \lambda < 40 \mu\text{m} : \mu\text{J} < E < 100 \text{ J}.$ $190 \text{ nm} < \lambda < 10 \mu\text{m} : W < P < \text{kW}.$ $193 \text{ nm} < \lambda < 10 \mu\text{m} : P < 30 \text{ W} ;$ $H < 10^{11} \text{ W/cm}^2.$	Equipements scientifiques 127 rue de Buzenval, 92380 Garches tél. 01 47 95 99 00
ILX Lightwave	PD (Si ou InGaAs) PD (Si ou InGaAs) + C Thermopile + DAS	$0,4 \mu\text{m} < \lambda < 1,6 \mu\text{m} : \text{nW} < P < W.$ $1 \mu\text{m} < \lambda < 1,6 \mu\text{m} : 10 \mu\text{W} < P < 1 \text{ W}.$ $190 \text{ nm} < \lambda < 20 \mu\text{m} : 5 \text{ mW} < P < 30 \text{ W}.$	Photonetics 52 avenue de l'Europe, BP 39, 78160 Marly-le-Roi tél. 01 39 16 33 77
LASER METROLOGIE	Thermopile + C	$Vis < \lambda < 11 \mu\text{m} : W < P < 50 \text{ kW} ;$ $1 \text{ J} < E < 100 \text{ J}.$	Laser métrologie 49 rue Carnot, 74000 Annecy tél. 04 50 45 15 20
LASER PROBE (ex LASER PRECISION)	PD (Si) Pyroélectrique + C	$0,3 \mu\text{m} < \lambda < 1,1 \mu\text{m} : \text{pW} < P < 10 \text{ mW}.$ $UV < \lambda < 16 \mu\text{m} : 0,1 \mu\text{W} < P < 100 \text{ W}.$	Optilas Composants
LICONIX	PD (Si)	<i>pour lasers HeCd, HeNe, YAG, Ar, Kr :</i> $1 \mu\text{W} < P < 10 \text{ W}.$	Optilas Composants
MELLES GRIOT	Thermopile + DAS	$190 \text{ nm} < \lambda < 20 \mu\text{m} : 5 \text{ mW} < P < 30 \text{ W}.$	Melles Griot Parc du Mérentais rue Guynemer 78114 Magny-les-Hameaux tél. 01 30 21 06 80
MOLECTRON	Thermopile + DAS Pyroélectrique + DAS	$250 \text{ nm} < \lambda < 11 \mu\text{m} : 100 \mu\text{W} < P < 7,5 \text{ kW}.$ $100 \text{ nm} < \lambda < 100 \mu\text{m} : \text{fJ} < E < \text{J}.$	Optilas Composants Photonetics
NEWPORT	Thermopile + DAS Pyroélectrique + DAS	$190 \text{ nm} < \lambda < 11 \mu\text{m} : 1 \text{ mW} < P < 300 \text{ W}.$ $190 \text{ nm} < \lambda < 20 \mu\text{m} : 35 \text{ nJ} < E < 1 \text{ J}.$	Micro-contrôle PA de St Guénault, 3 bis rue Jean Mermoz, BP 189, 91006 Evry cedex tél. 01 60 91 68 56 Photonetics
OPHIR	PD (Si) Thermopile + DAS Thermopile + DAV	$350 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm} : 2 \mu\text{W} < P < 2 \text{ W}.$ $190 \text{ nm} < \lambda < 20 \mu\text{m} : \text{mW} < P < 5 \text{ kW}.$ $190 \text{ nm} < \lambda < 10,6 \mu\text{m} : P < 400 \text{ W} ;$ $H < 10 \text{ kW/cm}^2$	Optilas Composants
ORIEL	Silicium Pyroélectrique	$100 \text{ nm} < \lambda < 1100 \text{ nm} : 20 \text{ fJ} < E < 450 \text{ nJ}.$ $UV < \lambda < 40 \mu\text{m} : 15 \text{ nJ} < E < 5 \text{ J}.$	Lot - Oriel ZA de Courtaboeuf, 9 avenue de Laponie, 91951 Les Ulis cedex tél. 01 30 60 92 16
SCIENSTECH	Pyroélectrique + DAS ou thermopile + DAV ou DAS	$200 \text{ nm} < \lambda < 20 \mu\text{m} : \text{nW} < P < 30 \text{ W} ;$ $\text{nJ} < E < 30 \text{ J}.$	Laser 2000 13 rue St Honoré 78000 Versailles Tél. : 01 30 80 00 40
SYNRAD	Thermopile + DAS	$250 \text{ nm} < \lambda < 11 \mu\text{m} : 1 \text{ mW} < P < 450 \text{ W}$	Optilas Composants

(1) DAS : disque avec absorption en surface - DAV : disque avec absorption en volume - C : cavité (cône ou sphère) avec absorption en surface - PD : photodiode (nature).

(2) La gamme citée peut combiner les performances de plusieurs appareils.

ANNEXE II

LISTE DES PRINCIPAUX FOURNISSEURS DE LUNETTES DE PROTECTION LASER

Les lunettes vendues en Europe doivent posséder le marquage «CE», attestant qu'elles sont conformes aux exigences de la directive sur les équipements de protection individuelle (EPI).

Cette directive classe les lunettes de protection contre les lasers en catégorie II. Elles doivent donc faire l'objet d'un essai de type par un organisme notifié avant la mise sur le marché. Parmi les laboratoires européens notifiés pour ces essais, on peut citer le LNE en France et le PTB en Allemagne.

Sur la quarantaine de fournisseurs existant dans le monde, un petit nombre seulement a fait réaliser les essais nécessaires à l'obtention du marquage CE.

Bien que les produits non marqués CE soient maintenant interdits à la vente dans l'Union Européenne, l'acheteur potentiel doit rester vigilant et vérifier que le produit envisagé ait bien fait l'objet de tous les contrôles de conformité nécessaires.

Le fait qu'un fournisseur soit cité dans le tableau ci-dessous ne préjuge en rien de la conformité de ses produits. En ce qui concerne l'acheteur, une bonne méthode consiste à demander au fournisseur la déclaration de conformité CE établie et signée par le fabricant. Cette déclaration associée au marquage atteste de la conformité aux dispositions de la directive. En particulier, elle permet d'identifier l'organisme notifié qui a procédé à la certification du produit et les références de l'attestation d'examen CE de type délivrée.

Les fournisseurs ont tous des lunettes adaptées à la plupart des lasers courants, à la fois en longueur d'onde et en numéro d'échelon. Le numéro d'échelon maximal disponible varie de L4 à L9 selon les longueurs d'onde, et plus rarement ou sur commande, de R3 à R5 pour les lunettes de réglage. Mais on ne trouvera pas de lunettes de protection contre les faisceaux directs de la plupart des lasers industriels.

Pour s'assurer que les produits livrés correspondent bien, sur le plan technique, aux risques à prévenir, l'utilisateur devra **vérifier le marquage et la notice d'utilisation qui doit obligatoirement être fournie avec chaque lunette acquise.** Dans cette notice d'utilisation, on devra retrouver, en particulier, toutes les informations utiles quant aux domaines d'emploi et aux performances des protecteurs concernés. La vérification du marquage normalisé, s'il est correct, constitue un indice supplémentaire d'adéquation du produit.

Plusieurs types de lunettes sont proposés : lunette-masque à écran plat couvrant les deux yeux, lunettes à branches enveloppantes portables par dessus des lunettes correctrices, lunettes classiques à monture légère opaque ou filtrante (comme les oculaires).

FABRICANTS	PRINCIPAUX DISTRIBUTEURS EN FRANCE
BOLLE	BOLLE , BP 139, 01104 Oyonnax, tél. 04 74 77 21 23 GERIN , 70 cours Tolstoï, BP 1226, 69607 Villeurbanne cedex, tél. 04 72 65 33 80 OPTILAS Composants , 4 allée du Cantal - ZI la Petite Montagne, 91018 Evry Lisses, tél. 01 60 79 59 00 PHOTONETICS , 52 avenue de l'Europe, BP 39, 78160 Marly-le-roi, tél. 01 39 16 33 77
EALING	COHERENT EALING , 4 rue René Razel, bât. Azur, domaine technologique de Saclay, 91892 Orsay cedex, tél. 01 69 85 51 45
GPT (Glendale Protective Technology)	BILSOM International , 6 rue Simon, 51100 Reims, tél. 03 26 85 61 14 LOT - ORIEL , ZA de Courtaboeuf, 9 avenue de Laponie, 91951 Les Ulis cedex, tél. 01 30 60 92 16 16 MICRO-CONTROLE , PA de St Guénault, 3 bis rue Jean Mermoz, BP 189, 91006 Evry cedex, tél. 01 60 91 68 56 OPTILAS Composants
KENTEK Corp	OPTOPHOTONICS , 4 ter rue Cristino Garcia, BP 47, 95602 Eaubonne cedex
LASERVISION	MICRO-CONTROLE OPTILAS Composants
SPINDLER & HOYER	SCHNEEBERGER , 15 rue du Roussillon, BP 7, 91222 Brétigny-sur-Orge cedex, tél. 01 69 88 50 00