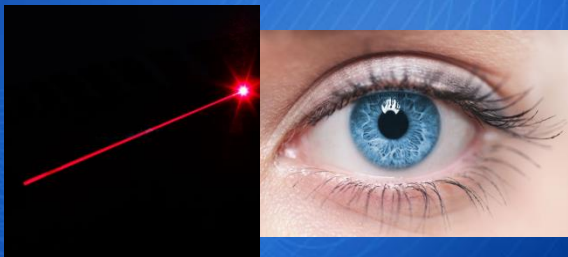


Sécurité laser de l'œil : les normes existantes, leur mise en œuvre et leurs évolutions futures

Pierre BOURDON

ONERA, Département d'Optique Théorique et Appliquée

pierre.bourdon@onera.fr



retour sur innovation

Les lasers... ils sont partout

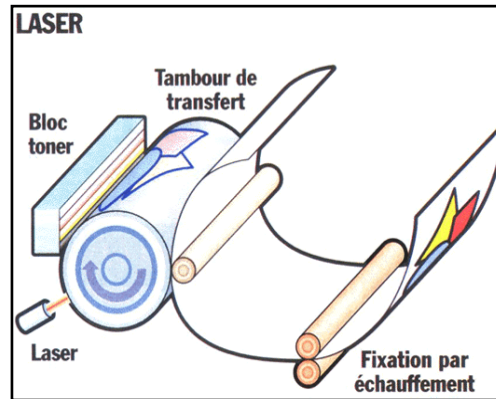
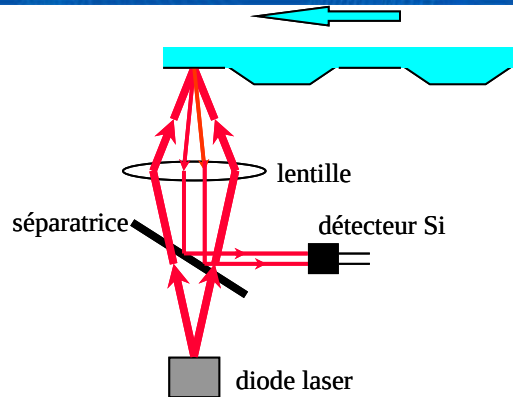


au 20^{ème} siècle...



...et aujourd'hui, au 21^{ème} siècle

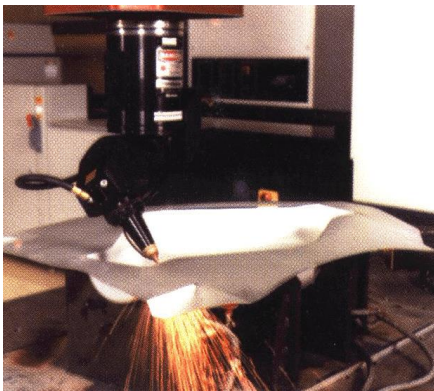
Les lasers – de multiples applications



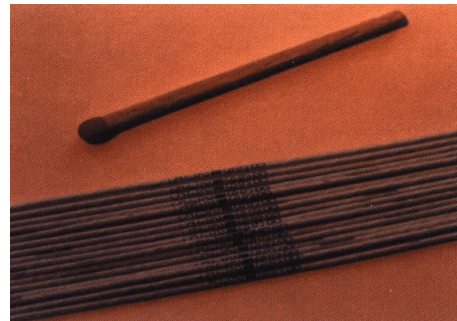
Lecture de CD – DVD - BluRay

Impression

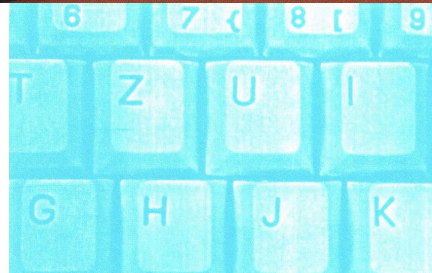
Télécom très haut débit



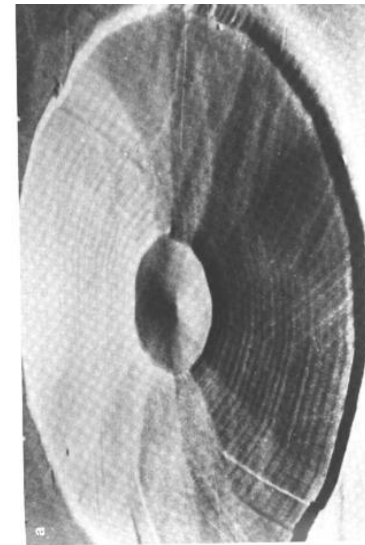
Découpe - soudure



Marquage



Nettoyage
– restauration
d'œuvres d'art



Ophtalmologie

Le laser, au final, qu'est-ce que c'est ?

« Si vous ne pouvez expliquer un concept à un enfant de 6 ans, c'est que vous ne le comprenez pas complètement » (A. Einstein)

Le laser, un CONCENTRÉ DE LUMIÈRE

- Directif
- Focalisable sur un petit diamètre
- Monochromatique (1 seule couleur)
- En impulsions brèves

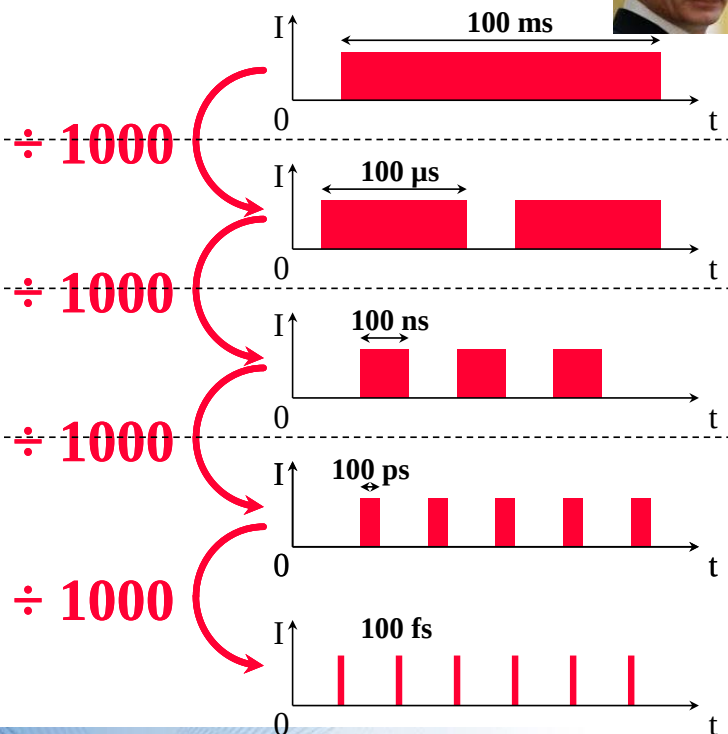
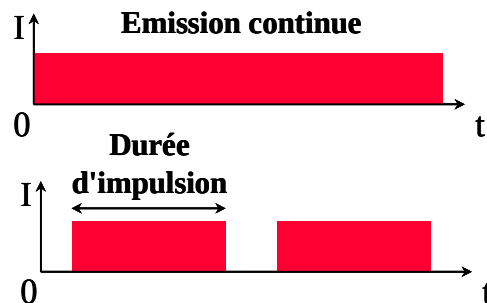
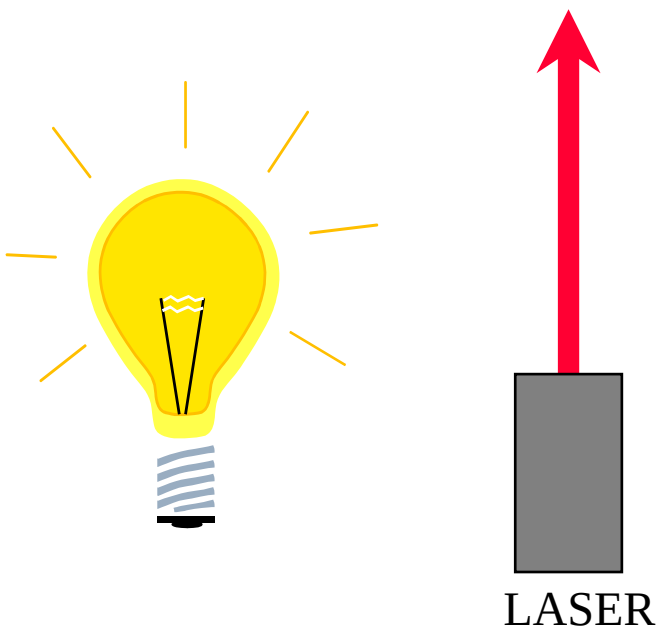


« en 1 clin d'œil »

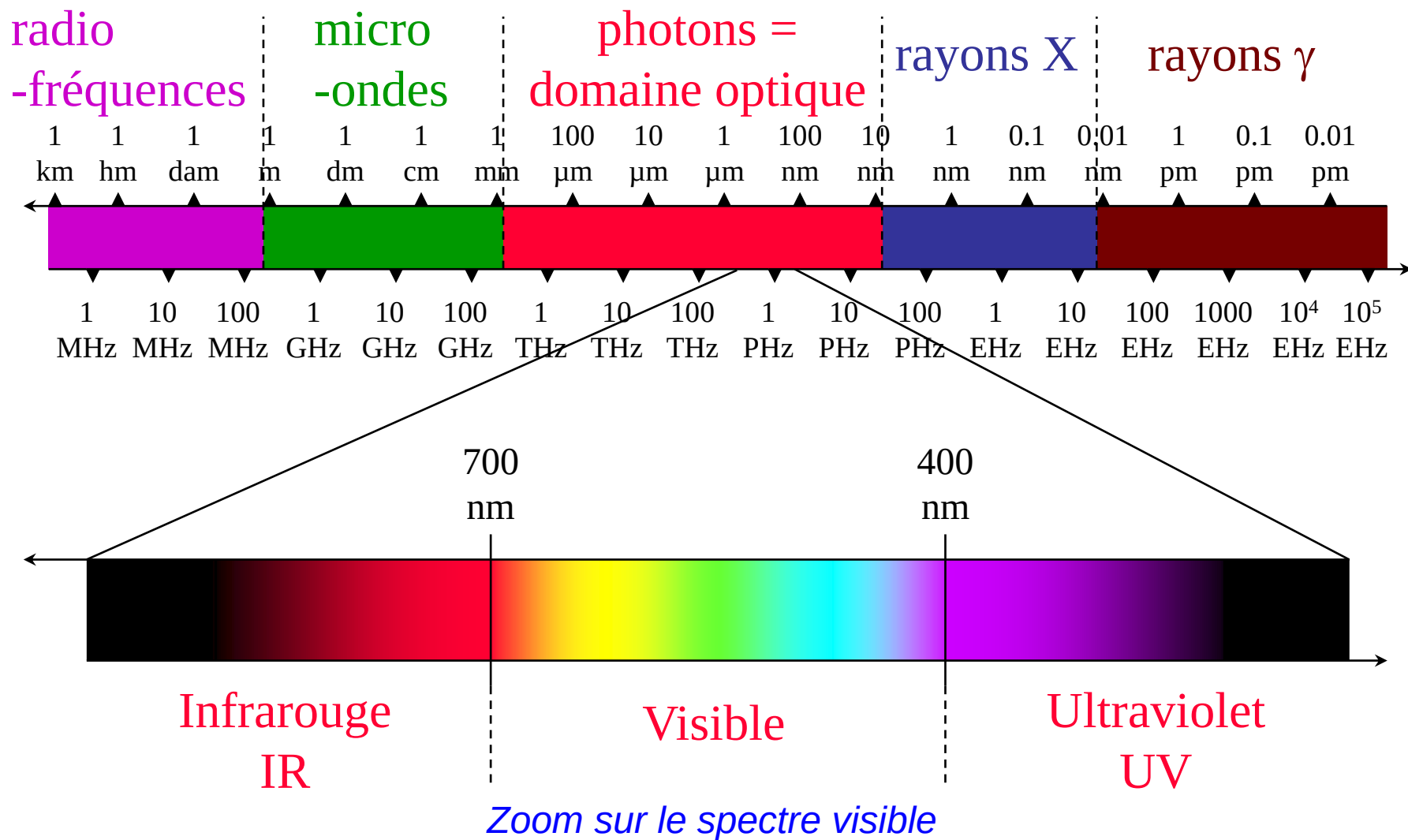
régime **relaxé**
= pompe impulsionnelle

régime **déclenché**
= porte rapide

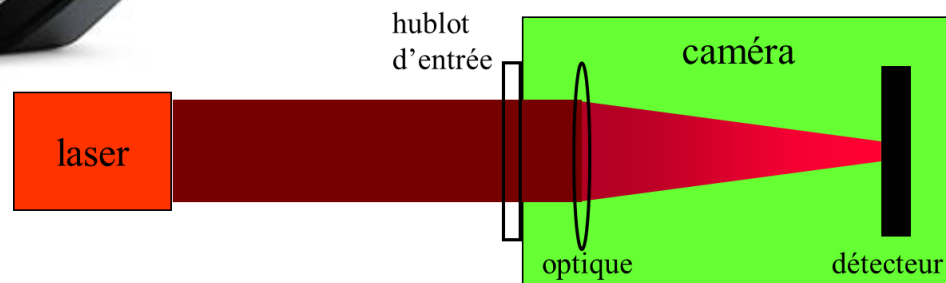
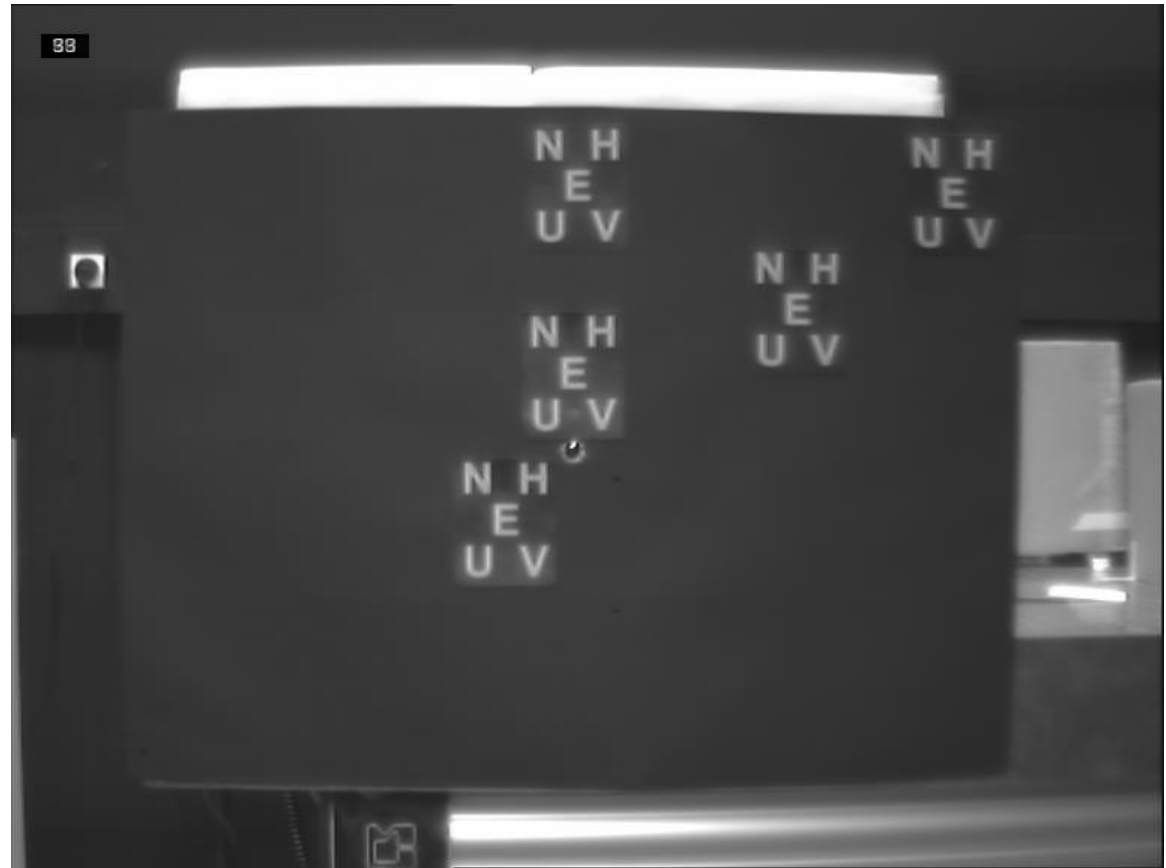
modes bloqués
= modulateur rapide
lasers très complexes



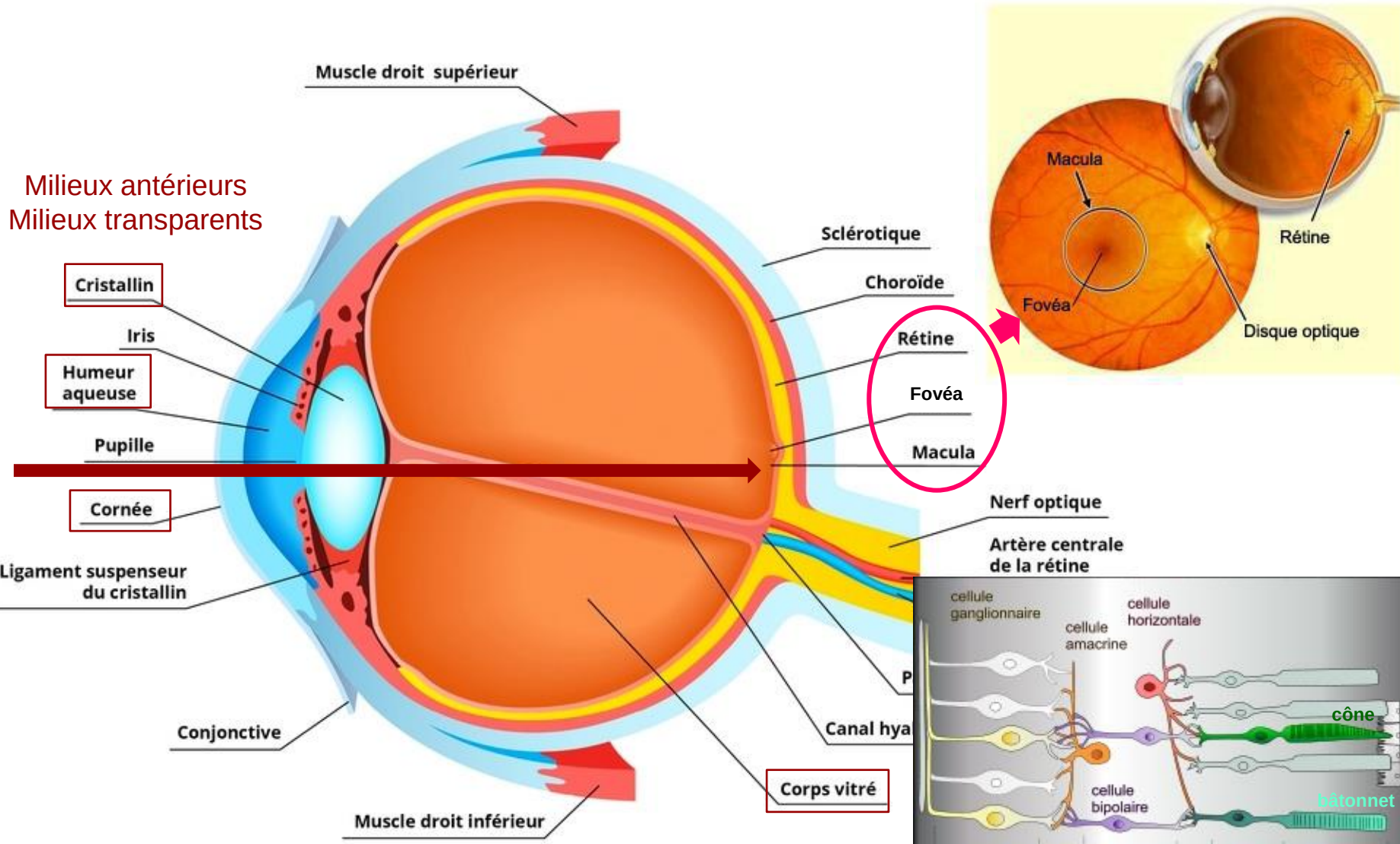
Le spectre lumineux



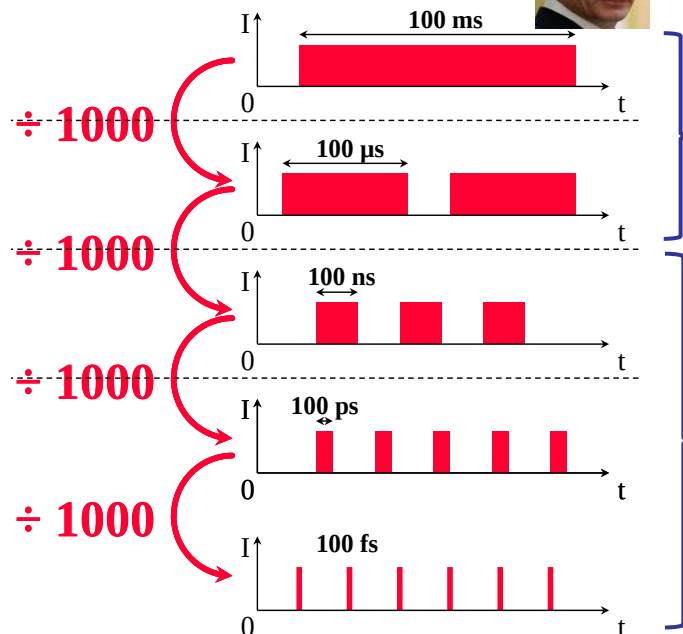
Vulnérabilité des instruments d'observation aux lasers



L'œil humain

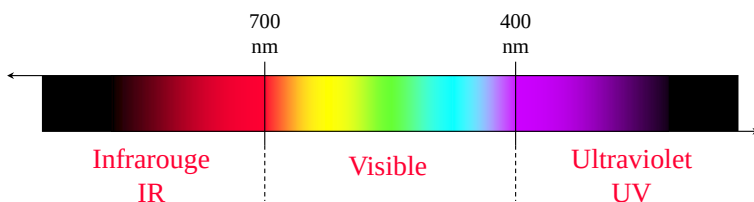


Effets des lasers sur les tissus biologiques



Effets thermiques = échauffement des tissus par le faisceau laser = **brûlure**, dépend de l'énergie totale intégrée déposée sur les tissus organiques

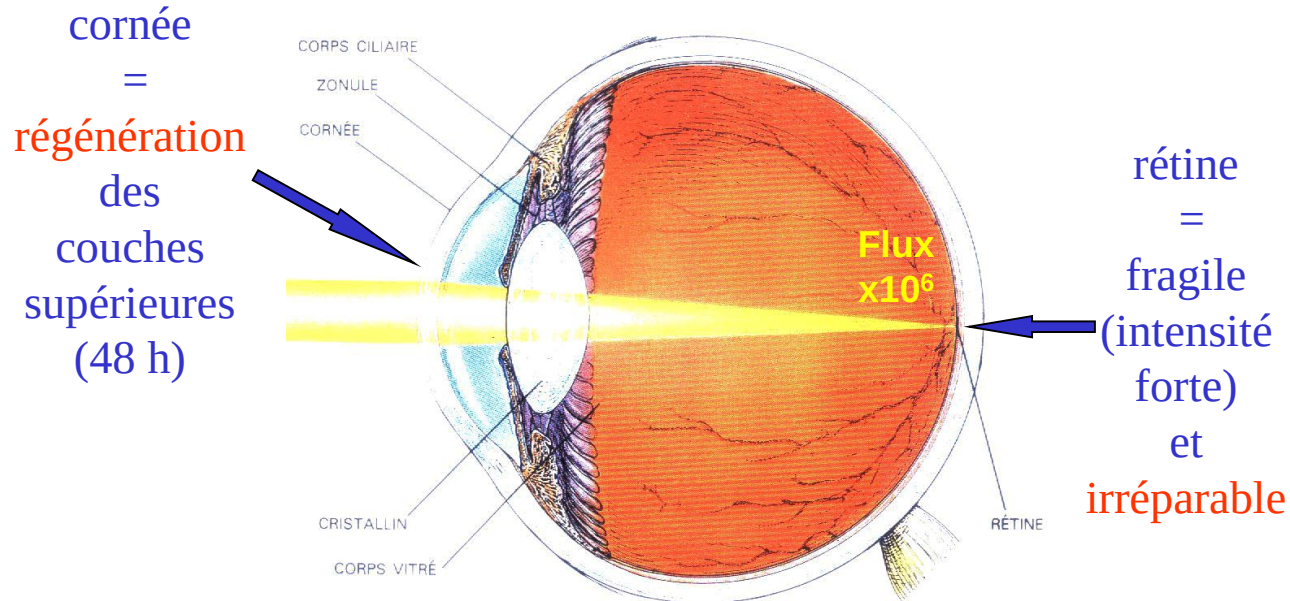
Effets photoablatifs = arrachement de matière et onde de pression locale = **claquage**, dépend de la puissance crête du laser i.e. énergie + durée de l'impulsion laser



Effets photochimiques = l'énergie des photons visibles et UV peut déclencher des modifications chimiques des cellules = **génération de toxiques, perturbation métabolique**, dépend de la durée d'exposition au rayonnement

Problématique de la sécurité oculaire

L'œil humain, un instrument optique ultra-performant → mais aussi très fragile, surtout dans sa zone d'acuité visuelle maximale, la fovéa



- Longueur d'onde dangereuse pour l'œil (ex. $1 \mu\text{m}$)
→ transmise par les milieux antérieurs ☹ + absorbée par la rétine ☹
- Longueur d'onde à sécurité oculaire (ex. $1,5 \mu\text{m}$ ou $2 \mu\text{m}+$)
→ absorbée dès la cornée ☺ + peu absorbée par la rétine ☺

Les normes de sécurité laser

En fait, la norme de sécurité laser → **IEC 60825-1:2014** (ou CEI 60825-1:2014)

- International Electrotechnical Commission (Genève)
- Série de normes 60825 relatives à la sécurité laser
- Pendant européen de la série de normes américaines ANSI Z136
- Edition 2014 = inclut les derniers amendements à la norme

La norme française NF EN 60825-1 est une traduction de cette norme validée par l'AFNOR.

Juridiquement parlant, la norme IEC est la référence, d'autant qu'elle est déjà traduite en français.

Autres normes de la série consacrées à des systèmes spécifiques comme les systèmes de télécoms par fibre optique ou en air libre, ou sur des points spécifiques comme la mesure de certaines caractéristiques ou la protection



IEC 60825-1

Edition 3.0 2014-05

**INTERNATIONAL
STANDARD**

**NORME
INTERNATIONALE**



GROUP SAFETY PUBLICATION
PUBLICATION GROUPEE DE SÉCURITÉ

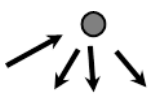
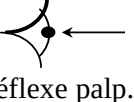
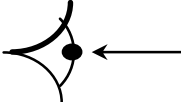
Safety of laser products –
Part 1: Equipment classification and requirements

Sécurité des appareils à laser –
Partie 1: Classification des matériels et exigences

Mise en œuvre de la norme IEC 60825-1 - Classification laser

On classe les lasers en fonction de leur danger pour l'œil en 7 classes :

Danger accru
= vision à travers
optique
grossissante

Classe		 + réflexe palp.		 + réflexe palp.	
1	OK	OK	OK	OK	OK
1M	OK	OK	OK	OK	
2	OK	OK		OK	
2M	OK	OK			
3R	OK	OK			
3B	OK				
4					

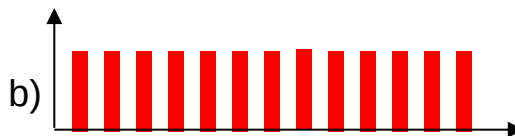
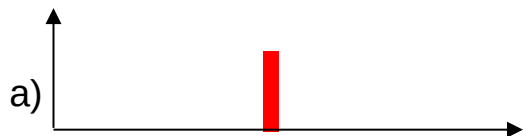
Laser visible
= protection par
réflexe palpébral

+ **classe 1C** pour les appareils de dermatologie
avec applicateur laser par contact avec la peau

Comment utiliser la norme de sécurité laser ?

Paramètres laser à connaître (par la mesure ou la fiche technique constructeur) :

- Longueur d'onde laser (de 180 nm à 10^6 nm / de 0,18 μm à 1 000 μm)
→ si laser multi-longueur d'onde, règle d'additivité des P = tableau 1 de la norme
- Durée d'exposition :
 - **base de temps = temps maximal d'exposition** à considérer (voir § 4.3.e)
= 0,25 s pour le visible (classes 2 à 3R), 100 s si $\lambda > 400$ nm sans expo. prolongée, 30 000 s pour laser UV ($\lambda < 400$ nm) ou expo. prolongée possible (ex. personnel médical mettant en œuvre un appareil laser)
 - si laser continu, **durée d'exposition = min(durée émission, base de temps)**
 - si laser impulsionnel, 3 évaluations à comparer (voir § 4.3.f) :
 - a) **Effet d'une seule impulsion** (temps d'exposition = durée de l'impulsion)
 - b) **Effet cumulatif des impulsions** (compter le nombre d'impulsions dans la base de temps) coef. C_5
 - c) **Effet moyen** de l'énergie totale intégrée pendant la durée d'exposition considéréet on retient la pire classification des 3 cas a), b) ou c)



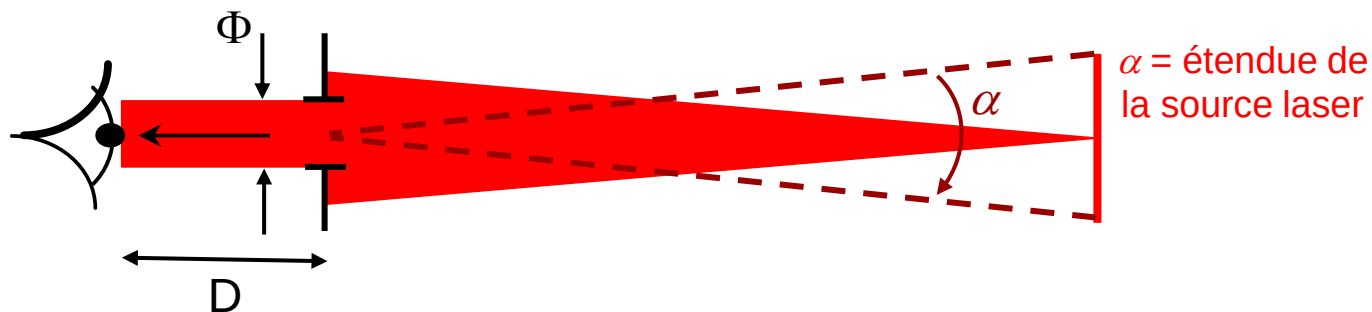
Comment utiliser la norme de sécurité laser ?

Paramètres laser à connaître (par la mesure ou la fiche technique constructeur) :

- Caractéristiques spatiales du faisceau laser :

→ Diamètre initial et divergence du faisceau laser

permet de calculer le diamètre du faisceau sur un diaphragme défini par la norme et placé à une distance définie par la norme de l'émetteur laser



→ Etendue de la source laser

permet de calculer un **coefficient C_6** dans le cas où le laser est une source étendue, cas rare, **la plupart du temps, $C_6 = 1$ car le laser est une source ponctuelle** ($\alpha < \alpha_{min} = 1,5 \text{ mrad}$)

→ Cas d'une source laser à balayage spatial

l'impact du balayage spatial sur le rayonnement traversant le diaphragme de mesure défini par la norme est à transposer en séquence d'impulsions laser

Déterminer la classe d'un laser

Le seuil de référence est l'Exposition Maximale Permise (EMP) = seuil de dommage de l'œil humain mesuré in vivo sur des animaux (voir Annexe A)

Longueur d'onde λ nm	Temps d'exposition t s						
	10^{-13} à 10^{-11}	10^{-11} à $5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-6}$ à $1,3 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-5}$ à 10	10 à 10^2	10^2 à 10^4	10^4 à 3×10^4
400 à 700	$1 \times 10^{-3} C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-3} C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$18 t^{0,75} C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	400 nm à 600 nm – Danger photochimique pour la rétine *			
				$100 C_3 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ using $\gamma_{ph} = 11 \text{ mrad}$		$1 C_3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ using $\gamma_{ph} = 1,1 t^{0,5} \text{ mrad}$	$1 C_3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ using $\gamma_{ph} = 110 \text{ mrad}$
				ET ^b			
				400 nm à 700 nm – Danger thermique pour la rétine			
				$(t \leq T_2)$ $18 t^{0,75} C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ $(t > T_2)$ $18 C_6 T_2^{-0,25} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$			
700 à 1 050	$1 \times 10^{-3} C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-3} C_4 C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$18 t^{0,75} C_4 C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$(t \leq T_2)$ $18 t^{0,75} C_4 C_6 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ $(t > T_2)$ $18 C_4 C_6 T_2^{-0,25} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$			
1 050 à 1 400 ^c	$1 \times 10^{-3} C_6 C_7 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$2 \times 10^{-2} C_6 C_7 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$90 t^{0,75} C_6 C_7 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$	$(t \leq T_2)$ $90 t^{0,75} C_6 C_7 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ $(t > T_2)$ $90 C_6 C_7 T_2^{-0,25} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$			

L'EMP est exprimée en **éclairement laser reçu au niveau de la cornée**

Ce tableau spécifique à l'œil est complété d'un tableau d'EMP de la peau couvrant le reste des longueurs d'onde (sensibilité de la cornée = sensibilité de la peau mais diaphragmes de mesure différents)

EMP → LEA

Déterminer la classe d'un laser

A partir de la connaissance des paramètres laser précédents :

- On détermine les Limites d'Emission Accessibles (LEA) des différentes classes

Tableaux 3 à 8 + Tableau 9 = valeurs des facteurs de corrections

- On les compare à l'éclairement laser collecté au niveau de la cornée :

→ **sans système grossissant, œil nu = flux à travers $\Phi = 7$ mm placé à $D = 100$ mm de l'œil** (pour $400 \text{ nm} < \lambda < 1400 \text{ nm}$) = vulnérabilité de la rétine

flux à travers $\Phi = 1 - 3,5$ mm au niveau de la cornée ($D = 0$) pour les autres λ
= vulnérabilité de la cornée

(→ voir tableau 10 – **condition 3**)

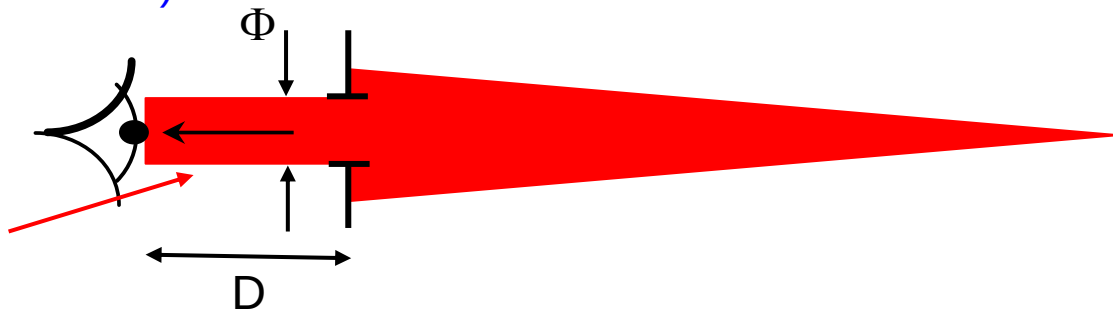
→ **avec système grossissant x7 = flux à travers $\Phi = 50$ mm placé à $D = 2$ m de l'œil** (pour $400 \text{ nm} < \lambda < 1400 \text{ nm}$) = vulnérabilité de la rétine

flux à travers $\Phi = 7$ mm placé à $D = 2$ m de l'œil pour les autres λ
= vulnérabilité de la cornée

(→ voir tableau 10 – **condition 1**)

Pour un faisceau laser gaussien :

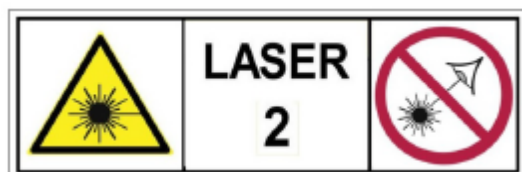
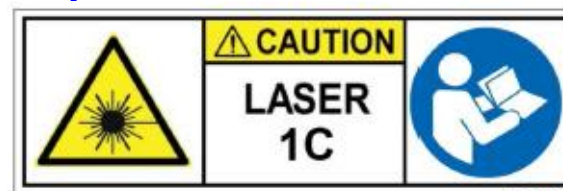
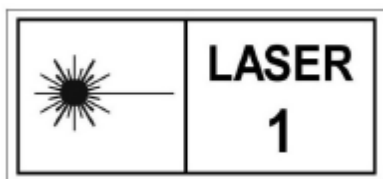
$$\eta = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d_a}{d_{63}}\right)^2\right)$$



Une fois la classification laser réalisée...

Pour le fabricant de laser : la norme impose un étiquetage du laser selon sa classe + certaines indications dans le manuel utilisateur (voir norme § 7 et § 8)

- les **couleurs** sont imposées
- les **dimensions et libellés** ne sont pas imposés, mais recommandées pour la **lisibilité et la compréhension**



Signalement
d'une ouverture
émettrice
dans un capot



Une fois la classification laser réalisée...

Pour l'utilisateur de laser : la norme impose certaines mesures de sécurité et fournit quelques recommandations de sécurité (voir § 6 de la norme)

- **DISTANCES DE SECURITE** (se calculent à partir de la LEA classe 1)
- Capot de protection
- Panneaux d'accès et verrouillages de sécurité
- Connecteur de verrouillage à distance (classes 3B ou 4)
- Réinitialisation manuelle (classe 4)
- Commande à clé (classes 3B ou 4)
- Avertissement (auditif ou visuel) d'émission laser (classes 3R invisible, 1C, 3B ou 4)
- Arrêt de faisceau ou atténuateur (classes 3B ou 4)
- Sécurités spécifiques (système à balayage ou classe 1C)
- Locaux fermés, à accès restreint et contrôlé, signalétique laser à l'entrée

Port de lunettes de protection obligatoire à partir de la classe 3R :

- Densité optique ($\log_{10}(\text{atténuation})$) des lunettes à employer pour atténuer le rayonnement laser en dessous de l'EMP = de la LEA de la classe 1
- Une étiquette sur les lunettes fournit la densité optique aux différentes gammes de longueurs d'onde couvertes → ex. DO 5, 700 – 1100 nm / DO 3, 400 – 700 nm

Autres risques et autres recommandations

Autres risques associés à l'usage d'un laser

- risque électrique
- incendie, explosion
- brûlure
- sons
- chimique (substances toxiques)
- génération de rayonnements ionisants (X, gamma) = en général, uniquement pour de grosses installations laser (LMJ, gros lasers femtoseconde...)

Autres recommandations

- Jamais l'œil dans le faisceau, ni le faisceau dans l'œil, ni vers l'œil
- Laser en marche = lunettes de protection
- Installer les optiques laser sur des supports rigides et toujours les fixer
- Faire très attention quand on travaille sur un système laser capot ouvert
- Eviter de travailler à 2 sans lunettes sur un banc laser
- Réfléchir avant de se baisser quand un laser est en marche
- Toujours respecter les consignes données par les personnels compétents
- Attention aux réflexions du faisceau sur les surfaces lisses (métal, vitres...)
- Attention si on utilise des optiques grossissantes (jumelles, viseur...)

Que faire en cas d'accident laser

Sensations associées à un accident laser

- éblouissement, flash lumineux
- sensation de choc (lasers impulsionnels)
- baisse d'acuité visuelle
- présence de sang dans le champ de vision
- post-image, zone aveugle dans le champ de vision

Les bonnes réactions en cas d'accident

- arrêter immédiatement le laser
- ne pas paniquer, de toute façon, si dommage il y a, c'est déjà trop tard
- aller consulter un ophtalmologiste en urgence
- surtout ne pas taire l'accident pour quelque raison (honte, culpabilité, peur de sanctions...)

Les suites d'un accident dépendent beaucoup du dommage causé

- évolution (en pire ou en mieux) dans les jours qui suivent suite à la cicatrisation
- dommage en vision périphérique souvent peu invalidant
- dans certains cas, même si la fovéa est touchée, le cerveau parvient à moyen terme à s'adapter, recentrer le champ de vision et retrouver de l'acuité visuelle

Evolutions futures de la norme de sécurité laser

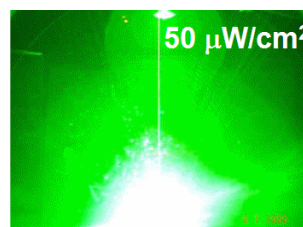
Mise à jour régulière des EMP en fonction des derniers résultats de mesure de seuils

→ **limitation au minimum des marges de sécurité** (typiquement x10 par rapport au seuil de probabilité 50 % de dommage oculaire)

Etablissement d'une nouvelle norme de sécurité laser prenant en compte le risque d'éblouissement laser

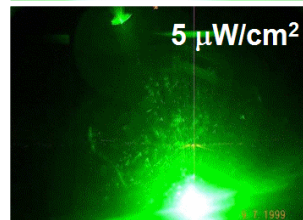
→ sur la base de mesures sur l'homme effectuées à l'AFRL

Air

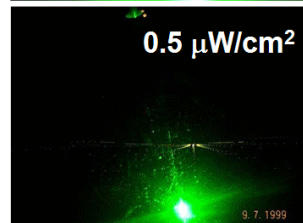


500 mW

1.1 km



3.6 km



11 km

Land



Merci de votre attention – Des questions ?

