

# Sécurité laser

MICKAËL LELEK

# Table des matières

<b>I. Présentation</b>	<b>4</b>
<b>II. Cours</b>	<b>5</b>
1. Rappels sur les lasers.....	<b>5</b>
1.1. Catégories de lasers.....	<b>5</b>
1.2. Le rayonnement laser.....	<b>6</b>
1.3. Les risques.....	<b>6</b>
2. Dangers des lasers pour la santé.....	<b>7</b>
2.1. Effets biologiques engendrés par les rayonnements laser.....	<b>7</b>
2.2. Risques laser.....	<b>8</b>
2.3. Autres dangers des lasers.....	<b>15</b>
3. Sécurité du rayonnement laser.....	<b>15</b>
3.1. La norme NF-EN 60825.....	<b>15</b>
3.2. Limites.....	<b>16</b>
3.3. Distance et Zone Nominale de Risque Oculaire.....	<b>18</b>
3.4. Prévention individuelle.....	<b>19</b>
3.5. Affichage préventif.....	<b>20</b>

---

<b>III. Etude de cas</b>	<b>24</b>
1. Cas 1.....	24
2. Cas 2.....	25
3. Cas 3.....	25
4. Cas 4.....	26
5. Cas 5.....	26
6. Cas 6.....	27
7. Guide du parfait manipulateur laser.....	28
<b>IV. Exercice</b>	<b>29</b>
1. Rappels sur les faisceaux Gaussiens.....	29
2. SECTION A : Calcul d'EMP dans le cas de lasers à impulsion unique.....	30
3. SECTION B : Calcul d'EMP dans le cas de lasers à impulsions répétitives.....	30
4. SECTION C : Distance nominale de risque oculaire (DNRO).....	31
5. SECTION D : Choix d'une paire de lunette de protection.....	32
6. Annexes.....	33
<b>Solution des exercices</b>	<b>35</b>
<b>Signification des abréviations</b>	<b>39</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>40</b>
<b>Crédit des ressources</b>	<b>41</b>

# I.Présentation

## *Module :*

---

Lasers et optique non linéaire

## *Auteur(s) :*

---

Mickaël LELEK - attaché temporaire d'Enseignement et de Recherche - Institut Pasteur

## *Résumé :*

---

Les lasers sont de plus en plus performants et divers. On trouve ainsi aujourd'hui des lasers impulsions et continus dans une gamme de longueurs d'onde qui s'étend sur tout le spectre visible et qui déborde dans l'infrarouge et l'UV. D'un point de vue puissances, les lasers d'aujourd'hui délivrent des puissances qui peuvent atteindre plusieurs centaines de Watts. Avec ces performances, il est nécessaire pour un manipulateur laser ou même un simple utilisateur de prendre d'énormes précautions en terme de sécurité laser pour protéger sa santé. C'est dans cet objectif de sensibilisation que ce cours a été rédigé. Il permet à toute personne novice en laser de débiter un travail en toute sécurité et en toute connaissance de cause.

## *Mots-clés :*

---

laser, sécurité laser

## *Pré-requis :*

---

Connaissance sur le laser

## *Objectif(s) pédagogique(s) et plan du cours :*

---

Former les personnes débutantes en laser, n'ayant jamais travaillé sur de telles sources, sur le comportement à adopter lorsque l'on travaille avec un laser.

- Introduction
- Rappels sur les lasers
- Dangers des lasers pour la santé
- Sécurité du rayonnement laser
- Conclusion

## *Conception & production :*

---

PRN - Le Mans Université

## *Licence :*

---

Licence GNU<sup>1</sup>

1 - <http://www.gnu.org/licenses/fdl.txt>

# II.Cours

Les lasers sont des sources qui émettent un « concentré de lumière » concentré à la fois spatial et temporel.

Le **concentré spatial** se traduit par la capacité de la lumière laser à se focaliser sur de très petites surfaces, tout en transportant des puissances non négligeables. Par exemple, un simple laser hélium néon émettant une puissance de 1 mW est capable d'induire un effet d'éblouissement dix fois supérieur à l'éblouissement provoqué par le soleil.

Le **concentré temporel** quant à lui correspond à la capacité de la lumière laser à transporter un nombre de photons considérable concentrés en un temps très court. Il est assez classique pour des lasers de pouvoir disposer d'impulsions lumineuses ayant une énergie de l'ordre du joule et une durée de l'ordre de la nanoseconde. La puissance instantanée de l'impulsion laser dans ce cas est de l'ordre du gigawatt ! Des impulsions lumineuses encore plus puissantes (jusqu'au petawatt  $10^{15}$ W) sont de plus en plus courantes. Les effets provoqués sur la matière par de telles impulsions sont très violents : absorption extrêmement rapide puis éjection de matière à grande vitesse.

Le laser est donc un outil dangereux à manipuler car il peut agir sur la peau et sur les yeux de façon irréversible.

Dans un contexte où le laser a tendance à se démocratiser et à être utilisé dans un nombre croissant d'applications, dans un contexte où les performances des sources lasers augmentent d'années en années (les sources émettant des puissances au niveau du kilowatt en continu et du terawatt en impulsions deviennent monnaie courante). La sécurité laser est donc un chapitre incontournable pour les utilisateurs de lasers.

Ce grain pédagogique sur la sécurité laser a pour objectif de sensibiliser le lecteur aux risques encourus et la façon de s'en prémunir. Le cours est organisé en trois parties : après quelques rappels sur les lasers, les dangers lasers seront abordés. La sécurité laser comprenant la norme et des grandeurs capables de quantifier le risque laser et les moyens de prévention seront ensuite décrits. Les études de cas permettront de revenir sur des accidents lasers réels et sur un ensemble de bonnes pratiques concrètes pour ceux qui seront amenés à manipuler les lasers.

## 1. Rappels sur les lasers

Une source laser associe un milieu amplificateur optique (matériau solide, liquide ou gazeux) à une cavité optique résonnante (composée de plusieurs miroirs dont l'un au moins est partiellement réfléchissant). Dans cette cavité, la lumière effectue de multiples allers-retours et est amplifiée à chaque traversée du milieu amplificateur pour finalement s'échapper par le miroir partiellement réfléchissant. Les caractéristiques géométriques de cet ensemble imposent au faisceau émis d'avoir une faible divergence (d'être spatialement cohérent) et d'avoir également une grande pureté spectrale (d'être temporellement cohérent).

### 1.1. Catégories de lasers

Un laser, suivant les caractéristiques qu'il présente, peut être classé dans deux grandes catégories :

- Dans une première catégorie, sont classés **les lasers pour lesquels la nature temporelle diffère**. On trouve alors dans cette catégorie des sources émettant un rayonnement dit continu (durée de l'impulsion :  $\tau > 0,25$  s, exemple de l'He-Ne) et des

sources dites impulsionnelles (lasers relaxés :  $\tau = 10\mu s$  à  $0,1 s$  ; lasers déclenchés :  $\tau = 10 ns$  à  $10 ps$  ; lasers à modes synchronisés :  $\tau =$  quelques femtosecondes à quelques dizaines de picosecondes)

- Dans une seconde catégorie peuvent être classés **les lasers pour lesquels la nature du milieu actif diffère**. On trouve alors quatre sous-classes qui sont :
  - Les lasers à gaz tels que les lasers atomiques neutres (laser He-Ne, He-Cd, ...), les lasers atomiques ionisés (Argon  $Ar^+$ , Krypton  $Kr^+$ ) et les lasers moléculaires ( $CO_2$ , excimères, ...).
  - Les lasers solides tels que le laser à rubis (premier laser développé), YAG, ...
  - Les lasers à colorants
  - Les lasers à semi-conducteurs.

## 1.2. Le rayonnement laser

Pour la plupart des sources lasers dites continues, le rayonnement laser est souvent composé d'un ensemble discret de raies très fines, à des longueurs d'ondes bien précises correspondantes à des transitions énergétiques particulières du milieu amplificateur.

Pour les lasers dits impulsionnels, le rayonnement lumineux est composé d'une multitude de fréquences contenues dans une enveloppe spectrale qui peut s'étendre sur plusieurs centaines de nanomètres.

A titre d'exemple, un laser délivrant des impulsions de dix femtosecondes émet un rayonnement dont la largeur spectrale est égale à 90 nm.

La lumière émise par un laser appartient à la partie « optique » du spectre électromagnétique. Celle-ci s'étend dans une gamme de longueur d'onde allant de 180 nm à 1 mm. Par convention les différents rayonnements optiques peuvent être classés de la manière suivante :

Domaines	Sigles	Longueur d'onde
Ultraviolet C	UVC	180 – 280 nm
Ultraviolet B	UVB	280 – 315 nm
Ultraviolet A	UVA	315 – 400 nm
visible	/	400 – 780 nm
Infrarouge A	IRA	780 – 1400 nm
Infrarouge B	IRB	1,4 – 3 $\mu m$
Infrarouge C	IRC	3 $\mu m$ – 1 mm

La technologie laser a connu et connaît encore de grands développements tant au point de vue caractéristiques de faisceaux, qu'au point de vue record de puissance mais aussi au niveau encombrement. On comprend alors que l'on retrouve aujourd'hui la technologie laser dans divers domaines tels que les télécommunications, la médecine, la physique fondamentale.... Vu cette diversité d'applications, on comprend aussi la nécessité de former les utilisateurs de dispositif laser à la sécurité laser.

## 1.3. Les risques

La difficulté de ce cours réside dans le fait que les risques dus aux lasers sont très différents selon le type de personnel concerné (utilisateur, chercheur ou personnel de maintenance).

Cette difficulté est accrue par le fait qu'un équipement laser ne présente pas seulement des risques dus :

- au faisceau laser : Ce dernier est caractérisé par une forte densité d'énergie sur une petite surface du fait qu'un laser émet un « concentré de lumière ». Ainsi lorsqu'un faisceau rencontre un obstacle, il va être absorbé et l'énergie lumineuse sera transformée en énergie calorifique (chaleur).

Mais aussi des risques dus :

- aux dispositifs périphériques :
  - Alimentation hautes tensions : risques électriques
  - Risques chimiques plus particulièrement dans le cas des lasers à colorant
  - Risques acoustiques
  - Risque dû à l'emploi de bouteilles de gaz sous pression

Avant d'entrer dans la présentation des risques, voyons tout d'abord quelques statistiques à partir de graphes. Ces statistiques s'appuient sur le type de laser provoquant le plus d'accidents mais aussi sur le type de personnel le plus soumis aux risques laser ( figures 1-a) et 1-b)).

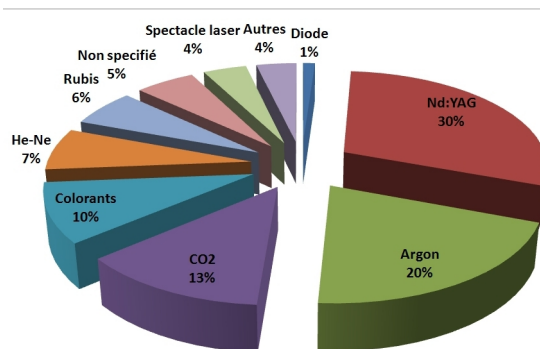


Figure 1a

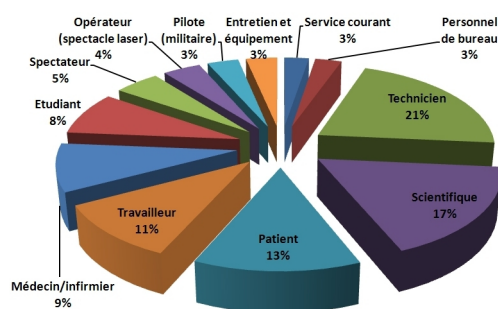


Figure 1b

## 2. Dangers des lasers pour la santé

### 2.1. Effets biologiques engendrés par les rayonnements laser

Avant de décrire les différents dangers que représente le laser pour certains organes particuliers de l'homme, il est utile de présenter les différents effets qu'il peut engendrer. Il est facile de comprendre que le rayonnement laser, suivant sa puissance confinée sur une section radiale de quelques centimètres voire quelques millimètres, va provoquer, lors de sa rencontre avec un obstacle occultant sa propagation libre dans l'air, des effets physiques secondaires :

- Les **effets thermiques** se produisent lorsque le rayonnement laser est absorbé par l'obstacle (peau). Ils induisent alors une réaction tissulaire qui est liée à l'évolution de la température de l'organisme et à la durée de l'échauffement. Suivant l'élévation de la température du tissu, il peut se produire différents types de réactions :
  - *L'hyperthermie* : L'élévation de température du tissu est modérée de l'ordre de quelques degrés. Ainsi, une température de l'ordre de 41 °C du tissu pendant plusieurs dizaines de minutes peut entraîner une mort cellulaire.

- *La coagulation* : Cette action correspond à une nécrose irréversible sans destruction tissulaire immédiate. Dans cette action, la température du tissu peut atteindre des températures comprises entre 50 °C et 100 °C pendant environ une seconde. Cette température produit alors une dessiccation, un blanchissement et une rétraction des tissus par dénaturation des protéines et du collagène. Les tissus vont dans un second temps s'éliminer (détersion) puis se cicatriser.
- *La volatilisation* : quand à elle correspond à une perte de substance. Ici, on parle d'une température des tissus supérieure à 100 °C. Dans ces conditions, les constituants cellulaires sont évaporés pendant un laps de temps relativement bref. On observe au niveau des berges de la zone volatilisée une zone de nécrose de coagulation car la transition thermique entre la zone volatilisée et la zone saine se fait graduellement.
- Risque dû à l'emploi de bouteilles de gaz sous pression.
- **Les effets mécaniques** : Ces effets sont induits par la création d'un plasma, d'une vaporisation explosive, ou par un phénomène de cavitation. Ces effets sont principalement liés à l'expansion d'une onde de choc (créée à partir des effets thermiques) qui va engendrer un effet destructif. En effet, lorsque l'on éjecte de la matière du substrat par éclairnement, ce dernier va reculer. Cet effet de recul est lié à la conservation d'énergie est au fait que l'énergie lumineuse est transformée en énergie cinétique.

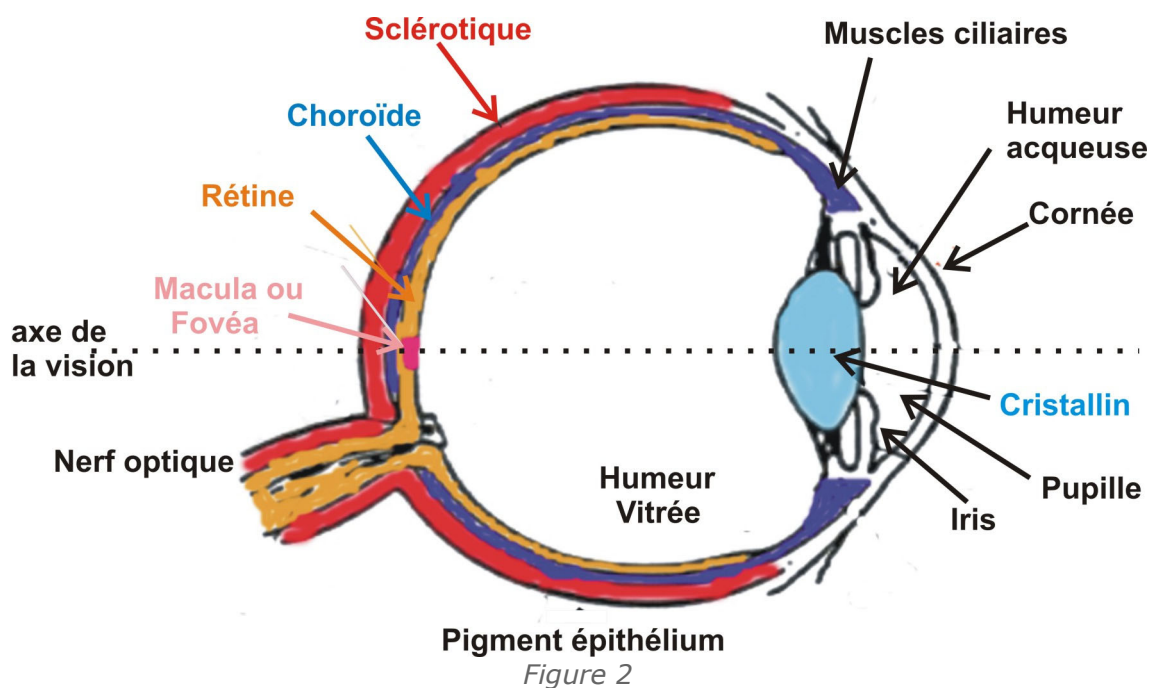
Ces effets jouent un double rôle. En effet, lorsqu'ils sont obtenus par manque de prudence, ils peuvent être néfastes à la santé de l'homme. Néanmoins, lorsqu'ils sont utilisés en connaissance de cause, ils peuvent avoir un caractère thérapeutique. L'onde de choc peut par exemple trouver des applications en ophtalmologie ou encore dans le domaine industriel.

## 2.2. Risques laser

### a) Pour l'œil

Le rayonnement issu d'une source laser est constitué de rayons lumineux qui peuvent être considérés comme quasi-parallèles entre-eux. L'œil de part sa fonction peut être assimilé à une lentille convergente. Lorsque ce faisceau laser transportant une puissance forte, traverse l'œil, cette puissance va se retrouver concentrée sur une tache focale de plus petit diamètre, qui se localise au niveau de la rétine. Ce concentré d'énergie réparti sur une tache de diamètre petite créerait des dommages irréversibles l'œil. Cependant, la puissance n'est pas le seul danger pour l'œil. En effet, la longueur d'onde, la durée d'exposition ainsi que la répartition de cette exposition dans le temps (exposition continue ou pulsée) sont aussi dangereux et sont complémentaires de la puissance laser pour endommager l'œil.

Comme on peut le voir sur la figure 2, l'œil n'est pas un organe simple, il est composé de différents éléments biologiques, optiques qui possèdent un indice de réfraction différents. Ainsi, lors de la propagation d'un rayon laser dans l'œil, ce dernier va rencontrer différents milieux d'indice de réfraction et de transparence différents. Suivant le milieu et la longueur d'onde de rayon, l'effet engendré par le laser sera différent.



### i La Cornée

Tout d'abord, la cornée possède un indice de réfraction de 1,377 et un spectre d'absorption représenté sur la figure 3. La cornée est avasculaire et possède une épaisseur d'environ 1 mm et un diamètre de 12 mm. Elle se trouve isolée de l'air ambiant par un film lacrymal.

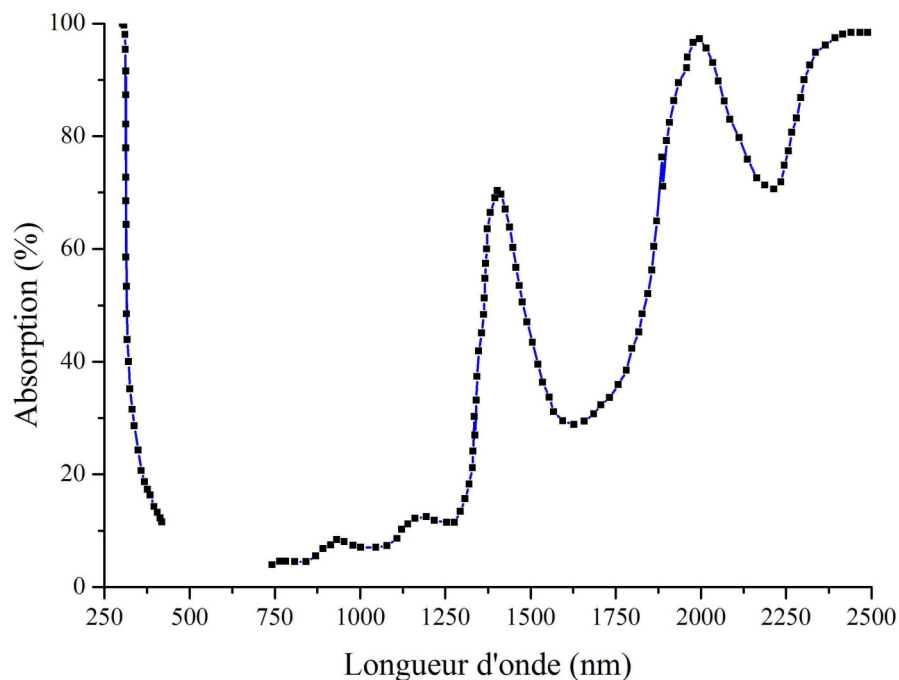


Figure 3

La courbe montrée en figure 3 permet d'observer que les longueurs d'onde principalement absorbées se trouvent dans les infrarouges lointains (> 800 nm - > 2400 nm) et les

ultraviolets ( $< 300 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$ ), ce sont donc elles qui vont provoquer des lésions sévères au niveau de cet élément optique complexe.

Aussi, suivant la fréquence absorbée par la cornée, les dommages seront de différentes natures. Ainsi, les ultraviolets UV-B, UV-C faibles vont provoquer des conjonctivites, des photokératites de l'épithélium, des latences. Ces lésions sont accompagnées de rougeurs et de larmoiement et ne sont pas irréversibles. De telles lésions disparaissent au bout de 48 heures maximum de part la guérison naturelle de l'œil.

Les ultraviolets, UV-B, UV-C élevés provoquent principalement des dommages sur la membrane de Bowman et sur le stroma cornéen. La couche de Bowmann ne se renouvelle jamais et par conséquent une lésion de celle-ci est définitive. Le stroma cornéen représente la majeure partie de l'épaisseur de la cornée. Il est constitué de fibres de collagène de diamètre constant (35 nm) et d'espacement constant (59 nm), groupées en lamelles parallèles à la surface cornéenne.

Les rayonnements UV précédemment cités provoquent sur la cornée une néovascularisation qui se caractérise par l'apparition de capillaires sanguins. L'initialisation de cette néovascularisation peut par la suite entraîner une aggravation des dommages et conduire à l'apparition d'un œdème et à la production d'acide lactique. L'accumulation de cet acide peut alors conduire à un aspect laiteux de la cornée et à une perte de transparence (voir figure 4). Ces lésions sont irréversibles, la cornée est perdue. Des opérations chirurgicales peuvent être pratiquées, mais conduisent à l'apparition d'une cicatrice opaque. Pour retrouver l'usage de son œil, la seule solution n'est autre que la greffe.

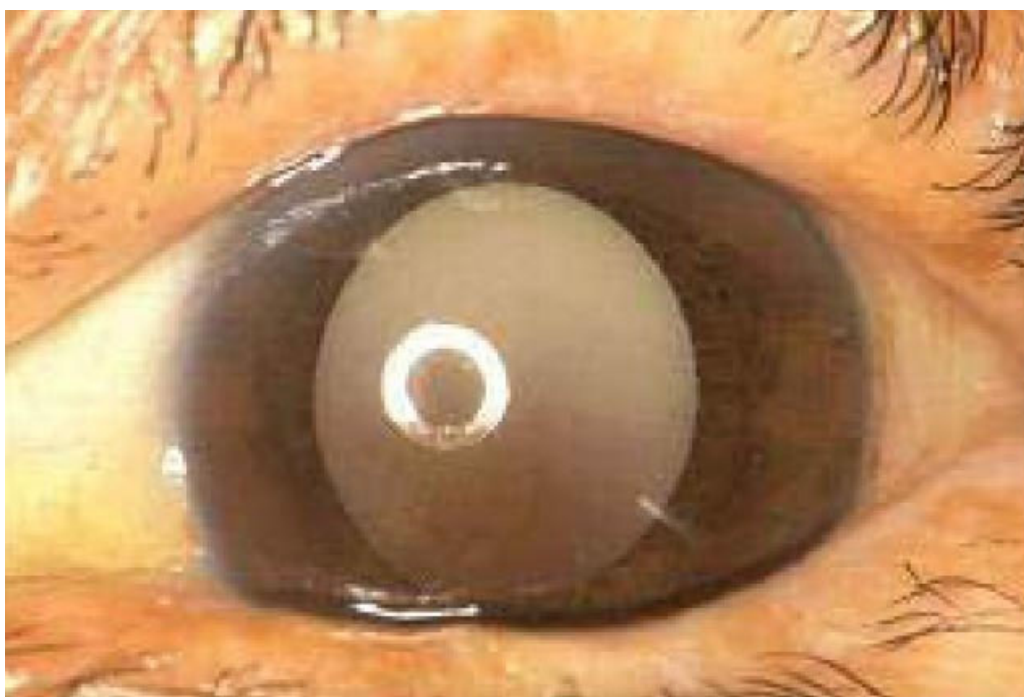


Figure 4

Les infrarouges de faibles énergies provoquent des dommages sur l'épithélium, des brûlures légères et de l'astigmatisme. Ces lésions conduisent à une opacité de même diamètre que celui du faisceau. Lorsque les énergies du faisceau interagissant dépassent un certain seuil ( $\approx 30 \text{ J/cm}^2$ ), ces fréquences peuvent endommager la stroma cornéenne d'une manière identique aux rayonnements UV (perte de transparence de la cornée). A de telles puissances, ce type de rayonnement est absorbé et transformé en chaleur, conduisant alors à l'apparition d'un creusement de la cornée et à un écoulement de l'humeur aqueuse. Les dommages alors engendrés sont irréversibles et nécessitent des interventions chirurgicales qui conduisent généralement soit à une cicatrice opaque, soit à une greffe.

## ii L'Iris

Comme il est montré sur la figure 2, l'iris sépare la chambre antérieure de la chambre postérieure. C'est elle qui colore notre œil puisqu'elle est constituée de pigments colorés. Au centre, on retrouve bien sûr la pupille. L'iris est un muscle qui permet de dilater ou de contracter la pupille afin de réguler le flux lumineux pénétrant dans l'œil. Elle joue donc le rôle de diaphragme (son diamètre varie de 1,5 à 9 mm). Le rayonnement laser n'entraîne pas de lésions définitives mais a pour effet de créer des zones de pigmentation. Ces zones apparaissant après un impact laser conduisent à un œdème et à l'apparition d'un myosis. Cependant, ce type de lésions s'atténuent naturellement après 2 à 3 semaines.

Néanmoins, si les impacts sont répétés, on voit alors apparaître une migration des pigments dans la chambre antérieure, une atrophie voire même une éventuelle déchirure de l'iris.

A forte énergie, une décoloration de l'iris à l'endroit de l'impact apparaît et dans le pire des cas l'impact laser peut conduire à une paralysie totale de l'iris suivie d'une nécrose.

Comme il a déjà été dit précédemment, l'iris joue le rôle de diaphragme. Cependant, l'ouverture de ce diaphragme est variable et dépend surtout de la longueur d'onde du rayonnement. Ainsi, pour un rayonnement UV, le diamètre de la pupille est de l'ordre de 1 mm, pour un rayonnement visible et proche infrarouge, le diamètre de celle-ci est de 7 mm. Pour des longueurs d'onde plus grandes l'ouverture de la pupille peut atteindre 11 mm. Face aux rayonnements visibles et proches infrarouges, l'iris ne joue plus son rôle protecteur pour les structures profondes de l'œil qui encourent des risques majeurs.

## iii Le Cristallin

Le cristallin se situe derrière la pupille et sépare l'humeur aqueuse, du corps vitré. Cet élément optique joue le rôle d'une lentille ronde transparente biconvexe. Il permet donc par son pouvoir d'accommodation, de focaliser les rayons lumineux provenant de l'objet observé sur la rétine. Pour obtenir une image nette sur la rétine, le cristallin a le pouvoir de se déformer par traction des muscles ciliaires et ainsi modifier le rayon de courbure de la lentille. Comme tout élément transparent, il est plus ou moins absorbant suivant la longueur d'onde (voir figure 5)

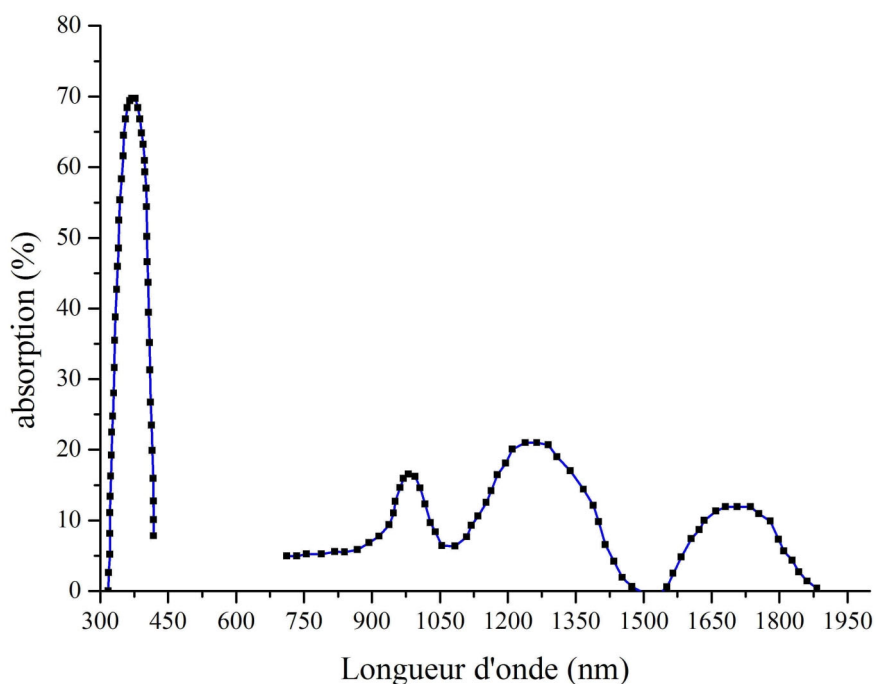


Figure 5

Le cristallin en tant que lentille convergente permet de faire focaliser tous faisceaux parallèles à l'axe optique (axe de vision) en un point focal, qui se trouve, pour un œil emmétrope, localisée au niveau de la rétine et plus particulièrement au niveau de la fovéa. Pour d'autres rayons lumineux toujours parallèles entre eux mais inclinés par rapport à l'axe optique, la focalisation aura lieu en un point focal secondaire localisé en un point quelconque de la rétine.

Les lésions que peut subir le cristallin sont principalement dues aux ultraviolets proches et infrarouges lointains. Les dommages sont soit des opacités ovoïdes grises-blanchâtres qui se situent sur le trajet du faisceau laser incident, soit des lésions définitives entraînant une cataracte d'origine thermique.

#### iv La Rétine

La rétine est une surface mince d'environ 0,5 mm d'épaisseur, qui se situe au fond de l'œil. C'est vers elle que converge via le cristallin, la totalité des rayons lumineux émis par l'objet observé. On comprend alors rapidement que la rétine constitue la partie sensible de la vision.

La rétine comprend les récepteurs neurosensoriels nécessaires à la vision ; elle joue le rôle de plaque ou pellicule photographique. Son rôle est de transformer en un signal analogique l'image renversée de l'objet observé grâce à l'activité neuronale. Cette transformation s'effectue de la manière suivante : la lumière focalisée sur la rétine traverse les couches rétinienne et l'épithélium pigmenté qui adhère à la choroïde. L'épithélium quant à lui joue le rôle de protecteur vis à vis des récepteurs rétiniens. La lumière alors filtrée active les photorécepteurs qui se présentent sous forme de bâtonnets ou de cônes. Ces photorécepteurs vont émettre un signal synaptique codé en un signal analogique se propageant par contacts synaptiques et par diffusion chimique. Ceux-ci vont s'activer en avant des cellules bipolaires puis le signal se propage en avant vers les cellules ganglionnaires dont le prolongement constitue le nerf optique. Ces cellules permettent donc de véhiculer l'information visuelle jusqu'au cerveau. Ces différentes étapes complexes de la vision, nous permettent de nous représenter avec fidélité et dans le moindre détail l'objet observé.

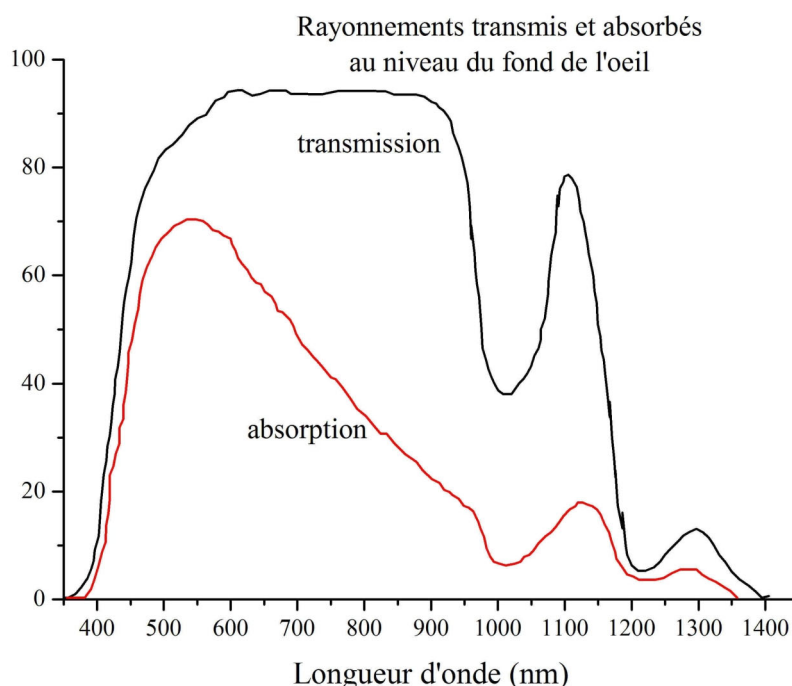


Figure 6

Sur la figure 6 sont représentées les fréquences absorbées et transmises au niveau du fond de l'œil. Sur cette figure, on peut voir que les longueurs d'onde visibles et infrarouges sont les

plus transmises au niveau de la rétine. A ces fréquences correspond une pupille dont l'ouverture est maximale, ce qui explique en partie la transmission maximale au fond de l'œil. On comprend alors rapidement que les rayonnements visibles et infrarouges (IR-A) vont provoquer le maximum de dommages sur la rétine. Cependant, la gravité des lésions est variable et va dépendre de leur localisation et de leur diamètre sur la surface rétinienne.

Les principales lésions observées sont des brûlures avec coagulation et destructions tissulaires, elles se localisent principalement au niveau de l'épithélium pigmentée qui offre une très bonne absorption au rayonnement. Elles sont diagnostiquées par l'apparition d'une zone circulaire centrale dépigmentée entourée d'un anneau de pigmentation dont le diamètre dépend de la dimension de l'image. Dans beaucoup de cas, s'ensuit le décollement de l'épithélium.

Un endommagement de la rétine s'accompagne d'un éblouissement physiologique qui consiste en une diminution non-négligeable de la perception visuelle. Mais il peut aussi s'accompagner d'une baisse significative de la sensibilité rétinienne. Cette baisse se caractérise par la difficulté de l'œil à s'adapter à l'obscurité ou encore une baisse du sens chromatique.

La localisation de ces lésions sur la rétine dépend de l'inclinaison du faisceau incident à l'œil par rapport à l'axe visuel (voir figure 2). Ainsi, un rayonnement lumineux peut être focalisé sur une partie de la macula et détruire la zone concernée. Apparaît alors un scotome, encore appelé zone sans vision. La macula lutea (ou tache jaune) dont le diamètre est d'environ 2 mm est principalement constituée de cônes. En son centre, parfaitement localisée sur l'axe de la vision, on trouve une petite dépression (0,2 mm de diamètre) appelée fovéa. Cette dernière est entièrement composée de cônes serrés les uns contre les autres. C'est dans cette zone d'acuité maximale de l'œil que la vision est la plus précise en éclairage diurne.

Ainsi, lorsque les rayons laser se propagent sur l'axe de la vision, ceux-ci sont parfaitement focalisés sur la macula. Si la tache focale est de petite dimension, seule la fovéa peut être altérée. Dans ce cas, l'acuité visuelle de l'œil diminue de moitié. Si le diamètre de l'image est plus grand, le rayonnement peut détruire en totalité la macula et provoquer une perte de l'acuité visuelle de 3/4, une perte de discernement des détails fins et créer une vision crépusculaire (floue).

Pour des rayons incidents inclinés par rapport à l'axe optique de l'œil, les lésions vont avoir lieu sur la rétine périphérique, ce qui altère uniquement la vision périphérique.

### *Remarque*

---

La fovéa ne contient pas de cônes bleus, elle se trouve donc particulièrement insensible aux ondes bleues.

## b) Pour la Peau

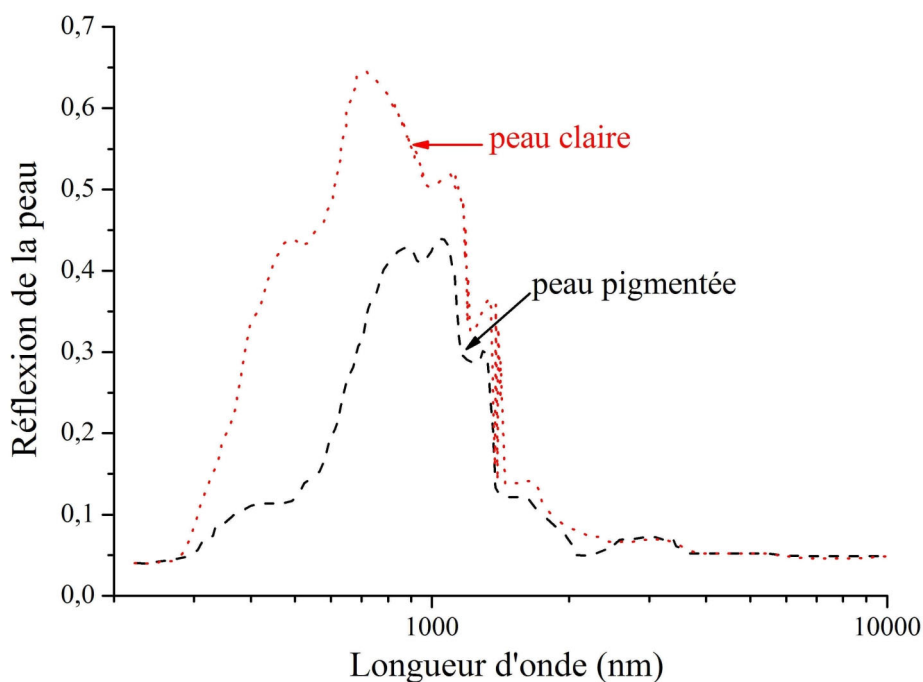


Figure 7

L'épiderme cutané se compose de différentes couches comme il est montré en figure 7. Suivant la fréquence du rayonnement laser, la profondeur de pénétration de l'onde sera plus ou moins grande.

Les effets d'un rayonnement laser sur la peau sont moins importants qu'au niveau de l'œil. Nous n'avons pas d'effet de concentration de la puissance (seulement en cas d'utilisation d'un élément optique externe) et la perception douloureuse est assez rapide.

Les risques principaux encourus par la peau sont principalement de type thermique, car l'épiderme ne peut supporter des densités de puissance calorifique supérieures à quelques dixièmes de  $W/cm^2$  en permanence à quelques  $W/cm^2$  en impulsionnel. A titre d'exemple, l'été, au soleil par temps clair, la peau est soumise à  $0,14 W/cm^2$ .

L'effet thermique dépend bien entendu de la puissance délivrée par le laser mais aussi de la longueur d'onde et du type de pigmentation de la peau. En effet, la pigmentation permet de protéger de façon plus ou moins efficace la peau suivant le type de coloration (voir figure 5). Ainsi, un faisceau de 5 à 10 joules n'a aucun effet sur la peau blanche alors qu'une peau pigmentée est brûlée, d'où l'importance du rôle de la mélanine et de l'hémoglobine dans l'absorption du rayonnement. D'après cette figure 7, les rayonnements situés dans le visible et le proche infrarouge ( $< 1,4 \mu m$ ) sont principalement réfléchis par la peau alors que les fréquences extérieures à cette bande sont principalement absorbées. Ce sont donc ces rayons qui vont provoquer la majeure partie des dommages cutanés.

Les couches constitutives de la peau sont plus ou moins résistantes au rayonnement. Ainsi, les zones épaisses hyperkératosiques sont résistantes alors que les couches plus fines (derme) et plus proches de la surface sont fragiles.

Les lésions observées vont alors dépendre de la fréquence du rayonnement et vont se manifester de différentes manières.

- Les rayonnements UV, suivant leur type UV-A, UV-B vont agir plus ou moins en profondeur à l'intérieur des couches cutanées. Les rayons UV-B affectent la couche externe de la peau, l'épiderme, et sont responsables de l'apparition de rougeurs

(identiques aux coups de soleil). Les rayons UV-A quand à eux sont responsables des nombreux problèmes cutanés, ils pénètrent la peau plus profondément que les UV-B. Les UV-B et A sont à l'origine des altérations cutanées allant du vieillissement au cancer en passant par l'apparition d'érythèmes (rougeur), une pigmentation voire une photosensibilisation.

- Les rayonnements visibles et infrarouges agissent plus en profondeur et par effet thermique profond. Ce type de rayonnement peut alors créer une vasodilatation et des rougeurs entraînant des brûlures cutanées en surface mais aussi en profondeur.

## 2.3. Autres dangers des lasers

### a) Risques électriques

Le fonctionnement du laser passe obligatoirement par l'utilisation d'une source primaire qui va permettre d'engendrer l'inversion de population nécessaire à l'effet laser. Cette source est bien souvent de type électrique. Bien entendu, il existe aussi le pompage optique qui peut se faire soit par un autre laser (par exemple, le laser argon permet de pomper des lasers à saphir dopés au titane) soit par d'autres sources lumineuses (lampe flash...). Mais dans tout les cas, il est nécessaire de faire appel à l'énergie électrique.

Bien souvent, l'efficacité électrique/optique des sources laser est faible (quelques dixièmes de pourcents). Pour illustrer cette idée, prenons l'exemple du laser argon qui peut délivrer une puissance optique de plusieurs dizaines de Watts en continue. Une source électrique de pompage délivrant plusieurs centaines de Watts doit être utilisée. On comprend à travers cet exemple qu'un utilisateur laser doit être conscient des dangers électriques. De plus, pour de telles sources laser, il est souvent nécessaire d'utiliser un système de refroidissement à eau. Il faut donc prendre énormément de précautions pour isoler la source électrique du système de refroidissement.

### b) Risques de pollutions chimiques

Ils existent différents types de risques chimiques :

- Le premier peut être lié directement au laser via le milieu amplificateur. En effet, dans la large gamme de lasers, le milieu laser peut se présenter sous différentes formes. Lorsqu'il est solide, les risques encourus sont minimes. Lorsqu'il est liquide (laser à colorants), le milieu actif est généralement très toxique et un soin particulier doit être apporté pour ne pas mettre en contact la peau et le milieu. Lorsqu'il est gazeux, les risques sont là aussi minimes puisque le gaz est confiné dans un tube hermétiquement isolé. Les précautions à prendre interviennent surtout lors des actions de maintenance.
- Le second est lié à l'utilisation des lasers sur des matériaux à transformer. Le rayonnement laser peut entraîner une pollution chimique. Le matériau ayant sur sa surface une substance particulière (revêtement anticorrosion, traces de solvant de dégraissage...), lorsqu'il est soumis à un champ optique de forte intensité peut dégrader le traitement de surface thermiquement et provoquer l'émission d'un gaz toxique.

## 3. Sécurité du rayonnement laser

### 3.1. La norme NF-EN 60825

[ [Norme NF-EN 60825]] La norme appliquée en Europe est la norme européenne NF EN 60825-1/A2 « *sécurité des appareils à laser, classification des matériels, prescription et guide de l'utilisateur* ». Cette norme est à la base des programmes de mise en application de la

sécurité laser en industrie, médecine et en recherche. Elle est référencée en France par les Ministères du travail, de la santé et les Caisses Primaires d'Assurance Maladie.

La norme NF EN 60825-1/A2 pour la sécurité des appareils à laser fournit des informations sur le classement des lasers pour la sécurité, les calculs de sécurité laser, les mesures de contrôle des risques, des recommandations pour les responsables sécurité laser et pour les comités d'hygiène et sécurité des entreprises. Ces normes sont conçues pour fournir à l'utilisateur laser les informations demandées et aider à la compréhension des programmes de sécurité laser.

Pour les fabricants de produits laser, la norme sert de référence pour la conformité des installations. Tous les produits laser vendus en Europe doivent répondre à cette norme et comporter le marquage CE.

### 3.2. Limites

Afin d'assurer la sécurité du rayonnement laser, il existe deux types de limites : les EMP★ et les LEA★. Ces limites ont été définies à partir des paramètres de longueur d'onde et de temps d'exposition ou d'émission, caractérisant les sources lasers.

#### a) EMP : Exposition Maximale Permise

Les EMP représentent le niveau maximal de rayonnement laser auquel les personnes peuvent être exposées sans subir de dommage immédiat ou à long terme. Cette exposition maximale permise est établie à partir des valeurs limites de densité d'énergie ou de puissance surfacique à admettre au niveau de la cornée et de la peau. Ces valeurs ont été obtenues en extrapolant à l'homme, les résultats d'EMP obtenus sur des animaux.

Ainsi, les niveaux d'EMP ont été calculés en fonction de la longueur d'onde du rayonnement, de la durée d'impulsion ou du temps d'exposition du tissu soumis au rayonnement (peau ou œil) et de la dimension de l'image de l'objet sur la rétine. Dans le tableau 2, quelques niveaux EMP sont résumés. Pour plus de détails et d'avantages de valeurs d'EMP, il faut se reporter à la norme NF EN 60825-1/A2 présente en annexe 1 (à la fin des exercices).

LASERS	MODES DE FONCTIONNEMENT	E.M.P OEIL	E.M.P PEAU
Excimères	Pulsé	30 J/m <sup>2</sup>	30 J/m <sup>2</sup>
He-Ne	Continu (t=2,25 s)	25 W/m <sup>2</sup>	3.10 <sup>4</sup> J/m <sup>2</sup>
Nd:YAG	Pulsé (t=1ms)	0,5 J/m <sup>2</sup>	9780 J/m <sup>2</sup>
CO <sub>2</sub>	Continu (t>10s)	1000 W/m <sup>2</sup>	1000 W/m <sup>2</sup>

#### Remarque

Dans tous les cas, quelle-que soit la manipulation effectuée avec le faisceau laser (réglage, maintenance,...), l'exposition au rayonnement laser doit toujours être placée au niveau le plus faible possible pour toujours être à un niveau inférieur à celui donné par les EMP.

#### b) LEA : Limite d'Emission Accessible et classe de lasers

Ces limites ont été définies selon la norme NF EN 60825-1/A2 : elles permettent de définir une classification des lasers en fonction des risques qu'ils présentent suivant leurs caractéristiques. Ces limites ont été établies sur des valeurs de puissance ou d'énergie que peut émettre le laser et qui sont accessibles à l'utilisateur, d'où l'acronyme LEA. Ainsi, chaque classe de laser possède un niveau maximal d'émission accessible à ne pas dépasser.

Contrairement aux limites EMP, les limites LEA sont des limites basées sur l'émission laser alors que les EMP sont les limites basées sur la réception de l'œil ou de la peau d'une partie de cette émission directe ou réfléchie.

En raison de la gamme de longueurs d'ondes que couvrent aujourd'hui les lasers, de la gamme d'énergie et bien d'autres caractéristiques (telle que la durée des impulsions), les risques causés par leur utilisation sont très variables. Étant donné l'impossibilité de considérer les sources lasers comme n'étant qu'un seul groupe, auquel les limites de sécurité communes pourrait être appliquées. Une classification des lasers en fonction d'une limite d'émission accessible (LEA) a été établie. Ces classes sont au nombre de quatre et ont été définies à partir de la norme européenne NF EN 60825-1/A2 et lorsque le laser est utilisée dans des conditions normales de fonctionnement.

- **Classe 1** : Les lasers de cette classe sont intrinsèquement sans danger de part leurs performances. Les énergies transportées par le faisceau sont inférieures aux EMP les plus limitatives. Ce type de laser est de classe 1 lorsqu'il est utilisé en **fonctionnement normal** mais peut s'avérer être de classe supérieure lorsqu'il est manipulé hors de ses conditions normales d'utilisation (dépassement des EMP).
- **Classe 1M** : Dans cette classe se retrouve les lasers de classe 1 qui émettent dans une bande spectrale qui s'étend de 302,5nm à 4000 nm. Ils sont comme tous lasers de classe 1 sans danger dans des conditions d'utilisation prévisibles, mais peuvent se trouver dangereux si l'utilisateur emploie une optique dans le faisceau. Se présentent alors 2 conditions :
  - Soit l'utilisateur doit concentrer l'énergie ou collimater un faisceau initialement divergent. Dans ce cas, le laser de classe 1 initialement devient de classe 1M, si l'utilisateur place les composants optiques à moins de 100 mm de la source.
  - Soit le faisceaux est déjà collimaté à la sortie de la source et le diamètre du faisceau est supérieur au diamètre spécifié dans le tableau 1 pour les mesures de l'éclairement énergétique ou de l'exposition.
- **Classe 2** : La classe 2 regroupe tous les dispositifs de faible puissance et dont la bande spectrale est comprise dans le spectre visible (400 nm-700 nm). Les lasers de cette classe sont sans danger pour l'œil grâce à la protection naturelle de l'œil qui n'est autre que le réflexe palpébral (clignement de la paupière). Cette réaction peut être attendue de manière à assurer une protection accrue dans des conditions d'utilisation normale, y compris lorsque l'utilisateur doit utiliser des instruments optiques pour visualiser le faisceau.
- **Classe 2M** : Comme pour le laser de classe 1M, les lasers de classe 2M peuvent se montrer dangereux si l'utilisateur emploie une optique dans le faisceau, dans ce cas deux conditions s'appliquent :
  - Soit l'utilisateur doit concentrer l'énergie ou collimater un faisceau initialement divergent. Dans ce cas, le laser de classe 2 initialement devient de classe 2M, si l'utilisateur place les composants optiques à moins de 100 mm de la source.
  - Soit le faisceaux est déjà collimaté à la sortie de la source et le diamètre du faisceau est supérieur au diamètre spécifié dans le tableau 1 pour les mesures de l'éclairement énergétique ou de l'exposition.
- **Classe 3** : Elle regroupe les dispositifs laser dont la puissance transportée par le faisceau est moyenne. L'exposition momentanée de la peau n'entraîne aucun dommage. Cette classe peut encore être divisée en deux sous-classes :
- **Classe 3R** : Lasers émettant dans la gamme des longueurs d'onde de 302,5 nm à  $10^6$  nm où la vision directe dans le faisceau est potentiellement dangereuse, mais le risque est inférieur à celui présenté par les lasers de la classe 3B, et moins de prescriptions de fabrication et de mesures de contrôle pour l'utilisateur ne s'appliquent que pour des lasers de la classe 3B. La limite d'émission accessible est de cinq fois la LEA de la classe 2 dans la gamme de longueurs d'onde de 400 nm à 700 nm et de cinq fois la LEA de la classe 1 pour les autres longueurs d'onde.
- **Classe 3B** : Il s'agit de dispositif à base de lasers de puissance moyenne pour lesquels la vision directe du faisceau est toujours dangereuse. Contrairement à la Classe 3A, les réflexions diffuses ou les sources étendues sont dangereuses si le temps d'exposition est supérieur ou égal à dix secondes et si la distance minimale est inférieure à 13 cm. Pour appartenir à cette classe, les lasers à émission continue ne doivent pas dépasser

500 mW et l'exposition énergétique provenant des lasers impulsionnels doit être inférieure à  $10^5 \text{ J.m}^{-2}$ .

- **Classe 4** : Tous les lasers de cette classe sont dangereux pour l'œil, aussi bien en vision directe qu'en réflexions diffuses. Ces lasers provoquent des dommages cutanés et constituent un risque d'incendie. Ainsi, leur utilisation exige une très grande précaution. A titre indicatif, la puissance continue émise par un laser de classe 4 est supérieure à 500 mW.

### Remarque

A noter que toutes les machines de production mettant en œuvre une source laser appartenant à la classe 4 doivent être utilisées suivant les définitions de la classe 1. C'est à dire que l'EMP pour l'œil ou pour la peau reçue par l'utilisateur doit toujours être en dessous du seuil minimal défini dans la classe 1. Le fabricant doit obligatoirement définir une ZNRO★ et une DNRO★ à ne pas dépasser.

Longueur d'onde (nm)	Pour les valeurs exprimées en puissance (W) ou en énergie (J)				Pour l'éclairement énergétique ( $\text{W/m}^2$ ou l'exposition énergétique ( $\text{J/m}^2$ ))	
	Condition 1		Condition 2		Diaphragme limite mm	Distance mm
	Diaphragme mm	Distance mm	Diaphragme mm	Distance mm		
<302,5 nm	-	-	7	14	1	0
≥302,5 nm à 400 nm	25	2000	7	14	1	100
≥400 nm à 1400 nm	50	2000	7	R	1	100
≥1400 nm à 4000 nm	25	2000	7	14	1 pour $t \leq 0,35\text{s}$ pour $0,35\text{s} < t < 10\text{s}$ 3,5 pour $t \geq 10\text{s}$	1,5 $t^{3/8}$ 100
≥ 4000 nm à $10^5$ nm	-	-	7	14	1 pour $t \leq 0,35\text{s}$ pour $0,35\text{s} < t < 10\text{s}$ 3,5 pour $t \geq 10\text{s}$	1,5 $t^{3/8}$ 0
≥ $10^5$ nm à $10^6$ nm	-	-	7	14	11	0

## 3.3. Distance et Zone Nominale de Risque Oculaire

### a) Distance Nominale de Risque Oculaire (D.N.R.O)

Cette distance représente la distance pour laquelle l'éclairement énergétique E ou l'exposition énergétique H tombe en dessous de la valeur de l'Exposition Maximale Permise (EMP) au niveau de la cornée ou de la peau, ce qui équivaut à la distance de danger du faisceau laser.

Cette distance comme l'EMP est fonction de plusieurs paramètres. Elle dépend :

- Des caractéristiques d'émission du laser : puissance de sortie, diamètre et divergence du faisceau émis,
- Des valeurs d'EMP permises au niveau de la cornée,
- Du type de système optique utilisé si éventuellement il y a.

A titre d'exemple, pour les lasers de classe 3B et 4, cette distance peut être considérable (voir exercice), il est alors nécessaire de stopper le faisceau en fin de distance utile.

Lorsqu'un faisceau laser est visualisé à travers un système optique quelconque, il faut tenir compte de l'accroissement du flux énergétique pénétrant dans l'œil, en majorant la D.N.R.O (on parle alors de D.N.R.O étendue).

Le calcul de cette distance peut se faire à partir de l'expression suivante dans le cas où le faisceau se propage librement.

$$D.N.R.O = \frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{4 \times P_0}{\pi \times EMP} - (2 \times w)^2}$$

Dans cette expression, la *D.N.R.O* représente la distance nominale de risque oculaire (m),  $P_0$  la puissance du faisceau (en watts) ou énergie d'une impulsion (en Joules), *EMP* l'exposition maximale permise (en  $\text{W.m}^{-2}$  ou  $\text{J.m}^{-2}$ ),  $w$  le rayon de col du faisceau gaussien à l'émission (en m) et  $\theta$  la divergence du faisceau ( en mrad/m).

Si un système optique est utilisé pour observer le faisceau, il faut tenir compte de la concentration de la lumière par le dispositif optique. Dans ce cas l'expression adéquate s'écrit de la manière suivante :

$$D.N.R.O = f + \frac{1}{\tan(\alpha)} \sqrt{\frac{P_0}{\pi \times EMP}}$$

Dans cette expression,  $f$  représente la distance focale (en m) et  $\alpha$  le demi angle d'ouverture du faisceau (en °).

### b) Zone Nominale de Risque Oculaire (ZNRO)

A l'intérieur de cette zone, l'éclairement énergétique ou l'exposition énergétique du faisceau laser dépasse les EMP appropriées au niveau de la cornée. Cette zone s'étend jusqu'à la limite de la D.N.R.O. Cependant, la délimitation de cette zone est très difficile à évaluer puisqu'elle va dépendre de la nature de l'environnement (poussièreux ou non, ...) et des objets susceptibles de se trouver sur le trajet du faisceau, en d'autres termes, il faut tenir compte des réflexions spéculaires.

## 3.4. Prévention individuelle

### a) La formation

Une formation à la sécurité laser doit être obligatoire pour toute personne susceptible d'utiliser des lasers de classe supérieure à la classe 1.

Bien entendu, le personnel de maintenance doit être formé plus largement. En effet, il peut être amené à intervenir directement sur le laser, mais aussi sur les dispositifs périphériques au laser tels que l'alimentation haute tension par exemple. Des formations plus spécifiques peuvent être apportées suivant le type de laser sur lequel la personne va intervenir. Par exemple, pour un laser à gaz ou à colorant, une formation sur les risques chimiques peut venir compléter la formation sur la sécurité laser.

### b) L'aptitude médicale

Comme la majeure partie des salariés, des visites médicales doivent être effectuées régulièrement pour évaluer l'aptitude du manipulateur à occuper son poste professionnel. Le médecin pratique une visite médicale assez générale et dans certains cas particuliers oblige le salarié à passer un examen complémentaire chez un spécialiste. L'employeur doit donc donner au médecin les renseignements sur le poste occupé par le salarié. Dans le cas d'un laser de puissance, il doit s'assurer que la fiche de condition de travail a été établie et remise au médecin.

La surveillance médicale spéciale concerne surtout des utilisateurs de lasers de classe 3A, 3B et 4. Outre l'examen clinique habituel, un bilan ophtalmologique chez un spécialiste est requis lors de l'embauche, tous les 2 à 3 ans et en cas d'accident ou de symptôme oculaire.

### c) La protection individuelle

Cette protection concerne surtout la protection d'un seul individu en l'isolant totalement ou en partie de l'environnement laser. Cette protection comprend généralement la protection oculaire et parfois la protection cutanée.

Cette protection permet d'atténuer suffisamment le faisceau laser de façon à avoir une exposition de l'œil toujours inférieure à l'EMP définie dans la norme, à la longueur d'onde considérée. Cette protection est obligatoire lorsqu'il est impossible de canaliser par des moyens quelconques le faisceau laser et les éventuelles réflexions parasites (ce qui est souvent le cas lors des expériences de laboratoire) et surtout pour tout opérateur de

maintenance. Cette protection individuelle se présente principalement sous forme de lunettes de protection.

Les lunettes de protection sont elles aussi soumises à des normes de sécurité NF-EN 207 [ [Norme NF-EN 207]] et NF-EN 208 [ [Norme NF-EN 208]]. Pourquoi deux normes? Suivant la protection que doit apporter la paire de lunettes (simple lunette de protection ou lunette de réglage laser), elle doit respectivement obéir à l'une ou l'autre des normes.

Pour une simple lunette de protection obéissant donc à la norme NF EN 207, celle-ci doit être marquée de la manière suivante:

- Une première lettre indique le type de laser :
  - D pour les lasers continus,
  - I pour les lasers à impulsions,
  - R pour les lasers à impulsions géantes,
  - M pour les lasers à modes bloqués.
- Un nombre indiquant la (les) longueur(s) d'onde ou le domaine spectral en nanomètres pour lequel le filtre assure la protection,
- Un numéro d'échelon (L1 à L10),
- Le nom du fabricant,
- La marque de certification s'il y a lieu,
- Et éventuellement la référence à la norme.

Les lunettes de réglage laser doivent quant à elles obéir à la norme NF-EN 208. Sur celles-ci est spécifié :

- La puissance maximale du laser ou l'énergie maximale des impulsions,
- La longueur d'onde ou le domaine spectral (en nanomètres),
- Le numéro d'échelon (R1 à R5),
- L'identification du fabricant,
- La marque de certification,
- L'inscription « lunettes de réglage » doit apparaître en français sur la monture,
- Éventuellement un des codes spécifiant la résistance mécanique conformément à la norme NF EN 166.

### 3.5. Affichage préventif

L'affichage préventif peut être de deux types :

- L'affichage ou protection intégrée,
- L'action de protection complémentaire.

#### a) L'affichage ou protection intégrée

Cet affichage découle de la mise en application de la norme NF EN 60825-1/A2 par les fabricants. Cette mise en application consiste à placer sur tous lasers ou systèmes lasers une signalisation donnant les détails relatifs à leurs puissances de sortie maximale, leurs longueurs d'onde et indiquant s'ils fonctionnent en mode continu ou pulsé (avec mention de la durée et de la fréquence des impulsions). De plus, chaque classe de laser doit être signalée comme indiqué ci-après :

L'étiquetage des lasers dépend de la classe définie ci-dessus :

- **Classe 1**

Sur tout appareil à laser de classe 1 doit être fixée une plaque indicatrice portant les mots :

**APPAREIL A LASER DE CLASSE 1**

*Figure classe 1*

Sur chaque appareil à laser de classe 1M, une étiquette explicative doit être apposée, portant les mots :

**RAYONNEMENT LASER**  
**NE PAS OBSERVER DIRECTEMENT A L'AIDE D'INSTRUMENTS D'OPTIQUE**

**APPAREIL A LASER DE CLASSE 1M**  
*Figure classe 1b*

- **Classe 2**

Sur tout appareil à laser de classe 2 doivent être fixées une plaque d'avertissement (comme montrée à la figure 6) et une plaque indicatrice portant les mots :

**LASER RADIATION**  
**DO NOT STARE INTO THE BEAM**  
**CLASS 2 LASER PRODUCT**

*Figure classe 2*

Sur chaque appareil à laser de classe 2M, une étiquette explicative doit être apposée, portant les mots :

**RAYONNEMENT LASER**  
**NE PAS REGARDER DANS LE FAISCEAU OU OBSERVER DIRECTEMENT**  
**A L'AIDE D'INSTRUMENTS D'OPTIQUE**

**APPAREIL A LASER DE CLASSE 2M**  
*Figure classe 2b*

- **Classe 3R**

Sur tout appareil à laser de classe 3R dans la gamme des longueurs d'onde de 400 à 1400 nm doivent être fixées une plaque d'avertissement (figure 6) et une plaque indicatrice portant les mots :

**LASER RADIATION**  
**DO NOT STARE INTO THE BEAM OR VIEW**  
**DIRECTLY WITH OPTICAL INSTRUMENTS**  
**CLASS 3A LASER PRODUCT**

*Figure classe 3a*

De plus, un panneau « **sorties laser** » doit être placé à proximité immédiate de la ou des sorties du faisceau.

- **Classe 3B**

Sur tout appareil à laser de classe 3B dans la gamme des longueurs d'onde de 400-1400 nm doivent être fixées une plaque d'avertissement (figure 6) et une plaque indicatrice portant l'indication :

**LASER RADIATION**  
**AVOID DIRECT EYE EXPOSURE**  
**CLASS 3B LASER PRODUCT**

*Figure classe 3b*

De plus, un panneau « **sorties laser** » doit être placé à proximité immédiate de la ou des sorties du faisceau.

- **Classe 4**

Sur tout appareil à laser de classe 4 doivent être fixées une plaque d'avertissement (figure 6) et une plaque indicatrice portant les mots :

**LASER RADIATION**  
**AVOID DIRECT EYE OR SKIN EXPOSURE TO**  
**DIRECT OR SCATTERED RADIATION**  
**CLASS 4 LASER PRODUCT**

*Figure classe 4*

De plus, un panneau « **sorties laser** » doit être placé à proximité immédiate de la ou des sorties du faisceau.

### *Remarque*

Si le rayonnement émis se trouve hors de la gamme de fréquences 400-700 nm, l'affichage préventif devra être modifié de la manière suivante : «Rayonnement laser invisible».

#### b) Action de protection complémentaire

Pour encore améliorer la protection d'utilisateurs ou manipulateurs laser, une protection supplémentaire peut être apportée par l'organisme employeur (entreprise, laboratoire,...). Celle-ci consiste par exemple :

- En la délimitation de la zone laser dont l'accès peut être contrôlé. Cette délimitation peut se faire de différentes manières : soit en plaçant à l'extérieur de cette zone un affichage permanent, clairement lisible présentant les dangers, soit placer le laser dans une salle dont l'accès est limité aux personnes formées.
- Il peut aussi être placé au sol un marquage piétonnier qui empêche toute personne de couper le faisceau laser.
- Il est aussi conseillé d'installer un éclairage minimal (500 lx) permanent dans la zone laser. Cet éclairage permet de garder une pupille non-dilatée, ce qui limite la puissance laser pénétrant dans l'œil.

\* \*

\*

Comme on a pu le voir précédemment, la grande efficacité et la directivité du rayonnement laser font que nous avons des sources optiques extrêmement dangereuses pour l'oeil. Or les seuils de dommages les plus faibles pour l'oeil (mis à part la rétine) concernent les rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 1400 nm. En effet, si on suppose que l'image formée sur la rétine par un faisceau parallèle est d'environ 10  $\mu\text{m}$  et que le diamètre d'une pupille dilatée atteint 7 mm, une impulsion de quelques microjoules ou un faisceau laser He-Ne à émission continue de 1 mW suffisent à provoquer une lésion rétinienne.

Pour trouver une bande spectrale où le seuil de dommage de l'oeil est le plus élevé et les risques encourus sont les moins importants, il s'agit de trouver un compromis entre les spectres d'absorption des différentes parties de l'oeil.

Ainsi, pour une bande spectrale comprise entre 1,5 et 1,55 $\mu\text{m}$ , l'absorption est nulle au niveau du cristallin, de 75% au niveau de la cornée et de 25% au niveau de l'humeur aqueuse. On voit alors que la majeure partie de l'énergie laser va être absorbée au niveau de la cornée. L'épaisseur de cet élément optique permet de répartir l'absorption et d'avoir une énergie déposée par unité de volume faible limitant ainsi les dommages. La cornée présente une résistance aux rayonnements équivalente à celle de la peau, de plus elle a un pouvoir régénératif très important. En dehors de cette gamme de longueur d'onde l'oeil encoure de graves problèmes.

Les lasers pouvant fonctionner en propagation libre sans danger pour les utilisateurs doivent donc émettre dans la bande spectrale de sécurité oculaire (1,5-1,55 $\mu\text{m}$ ). Ces lasers sont dit à **sécurité laser oculaire**. Cette bande spectrale présente d'autres avantages car elle est aussi utilisée dans les télécommunications par fibres optiques puisqu'elle correspond au minimum d'absorption de la silice et c'est une fenêtre de transmission de l'atmosphère.

# III. Etude de cas

Le point commun entre les accidents laser qui sont décrits ci-dessous est qu'ils ont tous eu lieu dans des laboratoires de recherche. Pourquoi uniquement dans des laboratoires, car c'est dans ce type de lieu que l'on travaille le plus sur le faisceau laser directement (développement laser). C'est dans ce travail de développement laser que les EMP laser peuvent dépasser les EMP tolérées. Si on se rapporte à la figure 1 du cours, on peut voir qu'en effet les accidents laser concernent le plus souvent les scientifiques et les techniciens spécialisés en laser qui développent ou optimisent les lasers et ne sont pas seulement de simples utilisateurs contrairement à d'autres métiers. Dans les métiers qui utilisent le laser en tant qu'outil, ces sources sont nécessairement de classe 1 d'après la norme NF-EN 60825. Dans ce cas, les utilisateurs reçoivent souvent un rayonnement lumineux dont l'EMP est souvent inférieure à l'EMP tolérée.

## 1. Cas 1

Dans un laboratoire français, un chercheur a été soumis au rayonnement diffus d'un faisceau laser provenant d'une source laser de classe 4.

L'Institut de recherche avait pourtant pris quelques précautions pour éviter les accidents laser. En effet, la source lumineuse était placée dans une salle isolée dont l'accès était limité à quelques personnes formées. La salle où est arrivé l'accident était voisine de cette salle laser. L'accès au faisceau dans cette salle d'expérience se faisait par une petite ouverture dans le mur mitoyen. Par ce moyen, le faisceau laser peut alimenter plusieurs expériences simultanément (dans ce cas deux ouvertures placées dans deux salles différentes). Cependant les ouvertures faites dans le mur n'étaient pas protégées par des opercules permettant de fermer le trou lorsque l'une des expériences ne fonctionnaient pas et ainsi il n'était pas possible de pouvoir pénétrer dans la salle en toute sécurité.

Dans l'accident qui s'est produit, un enseignant chercheur se trouvait dans l'une des salles d'expériences pour récupérer des données d'expériences, sans intention de travailler. Cependant, il n'a jamais pensé qu'une autre personne était en train de travailler dans l'autre salle, donc que le laser était en fonctionnement, il n'était donc pas protégé par ses lunettes de protection laser pourtant placées à l'entrée de sa salle d'expérience.

Dans sa salle, le faisceau laser s'est réfléchi sur un miroir et a malheureusement été dirigé vers un poster plastifié. Lorsque l'enseignant s'est approché de ce poster, il a observé deux taches circulaires sur le poster. La première était due au faisceau laser lui-même qu'il n'a donc pas observé alors qu'intrigué par la seconde d'origine inconnue il l'a observé plus longuement. Après avoir observé cette tache blanchâtre pendant plus d'une dizaine de seconde, l'agent a été ébloui et quatre heures après, une tache brillante dans le champ visuel de son œil gauche est apparue.

Ce qu'il faut retenir de cet accident :

- L'institut de recherche a isolé la source laser pour éviter ce type d'accident. Cependant, il aurait dû placer sur chaque ouverture un opercule permettant d'obturer celle-ci lorsque le faisceau laser n'est pas nécessaire dans la salle d'expérience.
- A l'entrée des salles d'expériences aurait dû être placé un **témoin lumineux** permettant l'identification immédiate de la présence d'un rayonnement lumineux dans la salle. Le chercheur aurait dans ce cas pris ces lunettes de protection adaptées à la longueur d'onde du faisceau du laser et à la puissance de ce dernier.
- Ce type d'accident aurait pu très bien arriver, même si l'agent pénétrait dans sa salle sachant que le faisceau laser était présent. En effet, le poster n'aurait pas dû se trouver au niveau du faisceau laser. Le poster aurait dû être isolé du faisceau laser.

- La puissance laser devrait être réglable, ainsi lorsqu'il n'est pas nécessaire de travailler à pleine puissance, le manipulateur ne court aucun danger.

## 2. Cas 2

Lors d'une opération de réglage d'expériences utilisant un laser de classe 4, un oscillateur laser Saphir dopé au titane, un étudiant en thèse a subi brièvement un choc laser.

Pour faciliter la procédure d'alignement, l'étudiant a souhaité travailler en continu, à pleine puissance (c'est à dire 700 mW) et dans l'obscurité totale, sans porter de lunette de protection pour pouvoir observer le faisceau à l'œil nu pour ne pas avoir recours à d'autres outils d'observation (caméra, viseur infrarouge,...).

L'étudiant souhaitant surélever le faisceau pour être à hauteur d'expérience, il a dans un premier temps préréglé le périscope de manière à ce que les deux miroirs soient le plus proches possibles l'un de l'autre, en fixant bien sur le miroir du bas qui devait remonter le faisceau. Par contre, sachant que le second miroir devait encore bouger, il n'a pas fixé solidement celui-ci. Au cours de son réglage, il s'est penché sur la table de manip juste à la verticale du périscope et a bousculé malencontreusement le périscope, le miroir du haut n'étant pas fixé le faisceau s'est échappé du périscope pour pénétrer brièvement dans l'œil de l'étudiant. La rétine de la victime a été touchée, des cellules nerveuses de la zone maculaire ont été brûlées entraînant une gêne permanente et irréversible de son champ de vision sans perte d'acuité visuelle.

Cet accident aurait pu être évité si :

- L'étudiant avait porté sa paire de lunette de protection adaptée au laser impulsionnel qui se trouvait pourtant à proximité.
- Lors de la manipulation avec un laser, il faut toujours travailler avec une **lumière ambiante minimale** afin de toujours avoir sa pupille qui soit la plus fermée possible.
- Toujours travailler avec une **puissance minimale** lorsque l'on aligne tout dispositif optique.
- Pour suivre le trajet du faisceau, toujours utiliser soit une caméra ou une carte de visualisation qui transforme le faisceau invisible en un point lumineux visible à l'œil.
- Toujours fixer solidement les éléments optiques même si la position de ceux-ci doivent par la suite être optimisée.

## 3. Cas 3

Dans le genre personne n'ayant pas de chance, voici cet exposé. Au cours d'expériences faisant intervenir un laser impulsionnel femtoseconde, le chercheur était en train de faire des mesures de taille de faisceau à partir d'une caméra développée pour ce type de mesure. La tête de détection placée sur un pied afin d'être centrée sur la position du faisceau était mal fixée. Il a donc fait sa série de mesure et a voulu reporter les résultats de ces expériences sur son cahier de manip qui se trouvait sur un bureau standard placé à proximité de la table d'expériences. Sur ce bureau était installé un écran d'ordinateur. L'expérimentateur s'est assis sur une chaise tournant le dos à sa manip sachant pertinemment que le faisceau était dans son dos. Au cours de son report de données sur son cahier la tête de mesure a glissé et a cessé d'obstruer la propagation libre du faisceau. Le faisceau a alors continué sa propagation jusqu'à l'écran d'ordinateur. Là, il a subi une réflexion parfaite sur le moniteur qui se trouvait à hauteur du rayonnement. L'expérimentateur a relevé la tête et pendant un court instant, son œil a été soumis à la réflexion du faisceau sur l'écran. Il a alors été immédiatement ébloui. Heureusement grâce au réflexe naturel palpébral de l'œil, l'expérimentateur n'a subi aucun dommage. Il a seulement eu des douleurs à la tête pendant quelques jours, dues certainement à l'éblouissement subit.

Cet accident qui au final fini assez bien, aurait facilement pu être évité simplement en fixant correctement la tête de mesure, ceci aurait permis d'obturer la propagation du faisceau pendant l'acquisition des données expérimentales. Mais cette protection n'est pas suffisante. Le laser aurait du être séparé de la partie bureau par une cloison opaque au rayonnement laser. Cette cloison permet alors d'isoler la partie expérience de la partie destinée à la bureautique. Mais aussi en plaçant le moniteur a une hauteur bien supérieure au niveau du trajet du faisceau, la réflexion n'aurait pas eu lieu.

## 4. Cas 4

Dans une université britannique, au cours d'une expérience, un étudiant était en train d'aligner deux lasers impulsions de longueurs d'onde différentes. Le premier un laser à colorant délivrant des impulsions de 10 ns à une cadence de 10 Hz, l'énergie par impulsion était de 10 mJ, la longueur d'onde centrale était de 720 nm, le second un laser impulsions Nd:YAG délivrant des impulsions de 10 ns à une cadence de 10 Hz, l'énergie par impulsion était de 50 mJ, la longueur d'onde centrale de ce dernier est de 266 nm. Dans cette expérience le faisceau issu du premier laser traverse un miroir dichroïque traité pour avoir une réflexion totale à 266 nm et être hautement transparent pour les autres longueurs d'onde. Malheureusement une réflexion vers le haut de l'ordre de 5% de l'énergie du faisceau à 720 nm s'est produite sur la face arrière de ce miroir. Ne pouvant observer son faisceau, il a pendant un laps de temps retiré ses lunettes et c'est à ce moment que l'accident est arrivé. Le manipulateur a complètement oublié la présence de ce faisceau parasite, il s'est penché et a reçu une impulsion laser issu de cette réflexion. Immédiatement, il s'est aperçu de la présence d'une tâche aveugle dans la vision centrale de son œil en observant un objet quelconque présent dans la salle de manip. Pourtant, comme tout manipulateur sensible au danger du rayonnement laser, l'étudiant portait sa paire de lunette de protection à 266 nm.

Il a par la suite été mené d'urgence à l'hôpital pour subir un examen ophtalmologique, les médecins ont alors observé une petite brûlure sur la fovéa. Cet étudiant avait connaissance de la présence du faisceau et dans des expériences précédentes, il avait placé des obstacles sur le trajet de ce faisceau pour qu'il soit stoppé. Cependant, au cours de cette expérience toute nouvelle, les caches optiques ont été ôtés.

De cet accident, il faut retenir :

A aucun moment les lunettes de protection ne doivent être retirées. Dans le cas précédent, bien qu'il y ait deux lasers de longueurs d'onde bien différentes, la paire de lunette doit toujours être portée, même si celles-ci sont données pour une longueur d'onde précise, elles protègent tout de même pour d'autres longueurs d'onde moins efficacement mais protègent tout de même l'œil. Pour chaque nouvelles expériences, une évaluation des risques encourus par le manipulateur doit être faite.

Suite à un accident laser, les dommages reçu par l'œil sont souvent irréversibles sauf dans quelques cas bien particuliers. Il est alors essentiel d'effectuer des **examens médicaux** dès que possible et **dans un délai de 24 heures**. Il peut aussi être envisagé d'utiliser un laser d'alignement souvent de classe 1 qui est inoffensif pour l'œil.

## 5. Cas 5

Dans un laboratoire américain, un étudiant équivalent français d'un niveau licence, commençait son stage de fin d'études sur un laser Titane: Saphir dont le rayonnement laser a une longueur d'onde centrale de 800 nm. Avant de commencer les expériences, l'étudiant n'a subit aucune formation préalable sur la sécurité laser et les dangers du rayonnement laser. Son encadrant lui a simplement précisé l'obligation de porter une paire de lunettes de

protection sans lui donner davantage d'informations sur le type de lunettes à utiliser ou même sur les indications annotées sur la monture de lunettes.

Ainsi, au cours d'une expérience, l'étudiant comme tout bon étudiant a pris la première paire de lunettes qu'il a trouvée, la paire de lunettes portée était de couleur orangée. Sans formation, il s'est cru protégé de tout rayonnement laser sans savoir que la paire de lunettes portée protégeait seulement du rayonnement vert à 532 nm.

En alignant le faisceau dans son expérience, l'étudiant s'est penché pour observer le faisceau et il a placé son œil dans l'axe de propagation du faisceau. Tout au long de son alignement, il a observé une lumière bleue dans son œil due à un effet non-linéaire produit par l'interaction faisceau laser à 800 nm et l'œil. Il n'a pas porté attention et a continué à travailler de cette manière.

Au soir en prenant le bus, il s'est rendu compte qu'il n'arrivait plus à lire le panneau d'affichage des stations desservies par le bus. Le lendemain, il a immédiatement fait un rapport auprès de son laboratoire qui l'a en urgence envoyé passer un examen ophtalmologique. L'examen a révélé une brûlure partielle du cristallin ainsi qu'un point noir sur la fovéa (caractéristique d'une destruction des cellules nerveuses).

L'étudiant aurait dû recevoir une formation laser avant le début des expériences pour être sensibilisé aux dangers du laser. Cette formation, lui aurait permis d'éviter plusieurs grosses erreurs. La première, en connaissance de causes, il n'aurait pas pris la première paire de lunettes qui lui est tombée entre les mains, il aurait choisi une paire de lunettes parfaitement adaptée au rayonnement proche infrarouge du laser Ti : Sa et au rayonnement impulsionnel. La seconde et la plus grosse erreur que l'étudiant a commise est de placer l'axe de son œil dans l'axe de propagation du faisceau. Avec une formation sécurité laser, il aurait, plutôt que de placer son œil dans l'axe du faisceau, utilisé une carte de visualisation ou une caméra qui transforme le rayonnement proche infrarouge invisible en un rayonnement visible. Mais l'erreur vient surtout de l'encadrant qui aurait dû faire dès l'arrivée du stagiaire non-spécialiste une formation sécurité laser ce qui aurait pu éviter l'accident.

## 6. Cas 6

Dans un laboratoire français, un thésard français était en train d'aligner une expérience dans laquelle une partie du faisceau se propageait à la perpendiculaire de la table d'expérience grâce à un miroir placé à 45°. Au cours de son expérience le manipulateur devait aligner la partie de la manip qui devait envoyer le faisceau laser vers le haut, pour obtenir un faisceau parfaitement vertical afin que ce dernier se propage au centre d'une enceinte à vide. Pour faire cet alignement, il a fermé l'opercule placé à la sortie du laser pour travailler dans des conditions de sécurité complètes. Se croyant en sécurité, il a retiré ses lunettes de protection et placé son œil juste à la verticale de l'enceinte sous vide parfaitement sur l'axe de propagation du faisceau. Suite à un problème technique, l'obturateur à la sortie du laser s'est ouvert brièvement pour laisser échapper une seule impulsion laser, qui s'est propagée et qui arriva dans l'œil du manipulateur. Il a alors subi une destruction de la macula. Suite à cet accident, il a immédiatement subi un examen ophtalmologique. Le résultat de cet examen a été une perte de 30% de son acuité visuelle et la présence d'une zone sans vision au centre de la vision. Les dommages subis sont alors irréversibles, cependant avec le temps le cerveau arrive à corriger cette zone sans vision.

Cet accident, bien qu'il soit dû à un problème technique dans le laser et non à une erreur du manipulateur, montre bien qu'il faut toujours faire attention même si on se croit en complète sécurité. L'étudiant n'aurait jamais dû retirer ses lunettes de protection même en l'absence de faisceau.

## 7. Guide du parfait manipulateur laser

Lorsque l'on travaille sur un laser de classe supérieure à 1, il faut obligatoirement :

Avoir la maîtrise du faisceau laser, de la source au détecteur. C'est à dire :

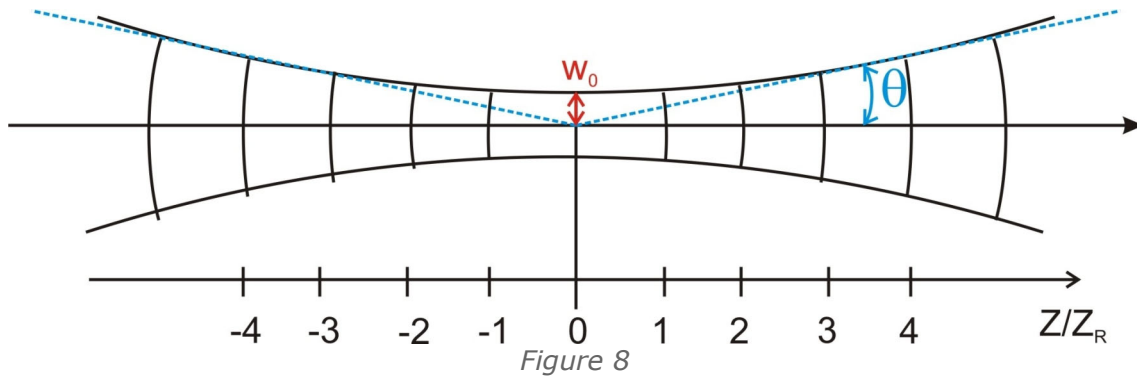
- Que tout objet réfléchissant et partiellement réfléchissant doit être solidement fixé,
- De connaître parfaitement son expérience et ainsi localiser parfaitement le trajet du faisceau laser lors de sa propagation. Cette connaissance permet en même temps de repérer les réflexions parasites et de les bloquer (En utilisant des bloqueurs absorbants et non réfléchissants),
- De bloquer le faisceau, il faut au maximum éviter les réflexions diffuses en utilisant par exemple un morceau de carton pour bloquer le faisceau laser puissant. Il vaut mieux utiliser un outil adapté tel qu'un piège à lumière ou une mousse diffusante placée au fond d'un tube opaque.

Que l'expérimentateur prennent ses précautions. C'est à dire :

- Qu'il doit régler son expérience à faible puissance.
- Qu'il ne doit jamais mettre ses yeux dans l'axe de propagation des faisceaux laser.
- De toujours travailler nu de tout objet réfléchissant tel qu'une montre, un bracelet, une alliance...
- De toujours travailler dans une pièce éclairée au minimum pour ne jamais avoir sa pupille totalement ouverte.
- Et bien sûr de toujours porter ses lunettes de protection adaptées dès que le risque existe.

# IV.Exercice

## 1. Rappels sur les faisceaux Gaussiens



Le rayonnement issu d'un laser peut être considéré comme gaussien. Pourquoi considérer des ondes gaussiennes plutôt que sphériques ou planes? Car ces ondes simples obligent à considérer le phénomène de diffraction en raison de leur extension infinie dans les directions transverses à la propagation. Ce phénomène est alors incompatible avec l'effet laser d'où le faisceau gaussien.

Cette onde comme l'onde sphérique et l'onde plane est solution de l'équation d'onde. Elle a pour expression la formule suivante :

$$E(r, z) = A(z) \times \exp\left(-i \frac{k \times r^2}{2 \times R(z)}\right) \times \exp\left(\frac{-r^2}{2w^2(z)}\right)$$

$A(z)$  représente l'amplitude complexe du champ suivant  $z$ . Dans cette expression, les variations du champ  $E$  suivant la coordonnées radiale  $r$  sont contenues dans les termes en exponentiel.

- Le terme en  $\exp\left(\frac{-r^2}{2w^2(z)}\right)$  justifie le caractère gaussien du faisceau. Pour une distance fixée  $z$ , l'amplitude du champ diminue d'un facteur  $\frac{1}{e^2}$  à une distance  $r = w(z)$  de l'axe optique. Le rayon  $w(z)$  est donc une mesure de l'extension radiale du faisceau.
- De manière identique à l'onde sphérique paraxiale, le faisceau gaussien est ici caractérisé par des fronts d'ondes de rayon  $R(z)$ .

Sur la figure précédente, pour  $z = 0$ , on peut définir un rayon de ceinture ou col du faisceau  $w_0$  qui représente la valeur minimale du rayon  $w(z)$ . Ce paramètre est primordial, puisqu'il permet d'exprimer les grandeurs caractéristiques suivantes :

$$R(z) = z \times \left[ 1 + \left( \frac{\pi \times w_0^2}{\lambda \times z} \right)^2 \right]$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{\lambda \times z}{\pi \times w_0^2} \right)^2}$$

$$z_R = \frac{\pi \times w_0^2}{\lambda}$$

La longueur de Rayleigh  $z_R$  représente donc une mesure de la divergence du faisceau. En effet, plus cette grandeur sera petite, plus le faisceau sera divergent. Cette divergence, comme il est montré sur la figure précédente peut aussi se mesurer par le comportement asymptotique du rayon  $w(z)$ . Lorsque  $z \gg z_R$  devient :

$$w(z) = w_0 \times \frac{z}{z_R}$$

et la pente associée s'écrit par

$$\tan \theta \ll \theta = \frac{w_0}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi \times w_0}$$

## 2. SECTION A : Calcul d'EMP dans le cas de lasers à impulsion unique

Répondre aux trois questions suivantes

### Question 1

[Solution n°1 p 35]

Exercice 1.1 : La source est un laser hélium-cadmium émettant un faisceau dont la longueur d'onde centrale  $\lambda = 325 \text{ nm}$  a une durée d'émission de  $0,1 \text{ s}$ . A partir du tableau fourni en annexe 1, donnez la valeur de l'EMP pour la vision.

### Question 2

[Solution n°2 p 35]

Exercice 1.2 : La source est un laser rubis impulsif émettant à  $694 \text{ nm}$ . Sachant que la durée d'exposition est de  $10^{-3} \text{ s}$ , donnez la valeur de l'EMP pour la vision et la peau.

### Question 3

[Solution n°3 p 35]

Exercice 1.3 : Soit un laser émettant des impulsions de durée  $100 \text{ ns}$  pour un faisceau dont la longueur d'onde centrale est de  $905 \text{ nm}$ . Donnez l'EMP pour la vision.

## 3. SECTION B : Calcul d'EMP dans le cas de lasers à impulsions répétitives

Rappels : Pour un laser impulsif, il est beaucoup plus difficile d'évaluer l'EMP du fait du nombre limité de données existantes sur les critères d'exposition aux impulsions multiples, il faut donc être circonspect dans l'évaluation de l'exposition au rayonnement à impulsions répétitives. Pour déterminer l'EMP applicable aux expositions répétitives, il convient d'utiliser les méthodes suivantes :

Les EMP pour les longueurs d'onde de  $400$  à  $1400 \text{ nm}$  sont déterminées en utilisant la plus restrictive des prescriptions suivantes dépendantes du cas :

L'exposition à une seule impulsion du train ne doit pas dépasser l'EMP.

L'éclairement moyen pour un train d'impulsions de durée  $T$  ne doit pas dépasser l'EMP données dans le tableau pour une impulsion unique de durée  $T$ .

L'exposition à une impulsion quelconque comprise dans un train d'impulsions ne doit pas excéder l'EMP pour une impulsion unique multipliée par le nombre total d'impulsions prévues durant le temps d'expositions  $N$ , élevé à la puissance  $-1/4$  :

$$EMP_{\text{train}} = EMP_{\text{unique}} \times N^{-1/4} \text{ (formule annexe)}$$

Pour les autres longueurs d'onde, les EMP oculaires et pour la peau sont déterminées en utilisant les prescriptions les plus restrictives.

### Question

[Solution n°4 p 35]

A partir du tableau fourni en annexe 3 (à la fin des exercices) et de vos connaissances, déterminer l'EMP pour la vision dans le cas où l'oeil serait soumis à un rayonnement issu d'un laser argon ( $\lambda = 488 \text{ nm}$ ) fonctionnant à une fréquence de répétition de  $1 \text{ MHz}$  et délivrant des impulsions de durée  $10 \text{ ns}$ . Le calcul de cet EMP peut être calculé à partir de deux méthodes différentes. L'une sera peu restrictive et l'autre plus rigoureuse donnera la valeur exacte de l'EMP;

## 4. SECTION C : Distance nominale de risque oculaire (DNRO)

Rappels : La *DNRO* représente la distance à laquelle l'éclairement énergétique ou l'exposition énergétique tombe en dessous des *EMP* appropriées.

L'éclairement énergétique à une distance  $z$  d'une source laser est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{4 \times P_0 \times \exp(-z \cdot \mu)}{\pi \times (2 \times w + z \cdot \theta)^2} \text{ en } W/m^2$$

En supposant que le profil du faisceau laser est gaussien, la lettre  $w$  représentant le rayon du faisceau mesuré en  $1/e^2$  en champ du faisceau et  $\theta$  est la divergence du faisceau.  $\exp(-\mu \cdot z)$  est un facteur d'atténuation atmosphérique qui est souvent négligé. Cette formule est valable quelque-soit la position de l'observateur par rapport à la sortie du laser.

Pour évaluer la *DNRO*, on pose  $z = DNRO$  et  $E = EMP$ .

Dans ce cas, si on néglige l'influence de l'absorption de l'atmosphère, on obtient l'expression suivante :

$$DNRO = \frac{\sqrt{\frac{4 \times P_0}{\pi \times EMP}} - 2 \times w}{\theta}$$

Cette dernière expression est vraie si et seulement si le faisceau se propage librement dans l'espace. Si un instrument optique est utilisé pour observer une source de rayonnement laser, il faut majorer la *DNRO* pour tenir compte d'un niveau d'énergie beaucoup plus important dans l'œil. Du fait de la collimation du rayonnement issu de la source par l'outil optique.

Cet accroissement du niveau de flux peut être pris en compte grâce au paramètre de majoration suivant :

$$K = \frac{\text{diamètre de la pupille d'entrée}}{\text{diamètre théorique de la pupille de l'oeil}} = \frac{D_0}{0,007}$$

### Question 1

[Solution n°5 p 36]

Exercice 3.1 : Soit un laser délivrant un rayonnement lumineux continu de longueur d'onde centrale  $400 \text{ nm}$ . La puissance moyenne délivrée par ce laser est de  $4 \text{ W}$  et la divergence naturelle du faisceau est de  $0,7 \text{ mrad}$  et le diamètre du faisceau en sortie de laser est de  $1 \text{ mm}$ .

1. Dans un premier temps, donnez l'*EMP* appropriée en supposant que le temps d'exposition est de  $2 \text{ h}$ .
2. Calculer ensuite la *DNRO*, sachant que le faisceau se propage dans l'air. En d'autres termes l'atténuation atmosphérique peut être négligée.

### Question 2

[Solution n°6 p 36]

Exercice 3.2 : Pour limiter la divergence naturelle du faisceau, on place un système optique afocal grossisseur permettant ainsi de collimater le faisceau et de dilater le diamètre du faisceau. Après optimisation de ce système, la divergence du faisceau n'est plus que de  $0,1 \text{ mrad}$  et la taille du faisceau est de  $7 \text{ mm}$ . Calculez la nouvelle *DNRO*.

### Question 3

[Solution n°7 p 36]

Exercice 3.3 : Un laser de topographie He-Ne ( $632 \text{ nm}$ ) émet un rayonnement dont la puissance moyenne est de l'ordre de  $3 \text{ mW}$ . Le faisceau issu de la cavité possède un diamètre initial de  $13 \text{ mm}$  et s'élargit au fur et à mesure de la propagation dans l'air. A  $50 \text{ m}$  de la source le faisceau atteint un diamètre de  $18 \text{ mm}$ .

1. Pendant combien de temps peut on observer directement le faisceau issu de la source sans danger lorsque notre œil se situe à  $65 \text{ m}$  de la source?
2. Évaluez la distance minimale de vision directe sans danger de ce laser pour une durée d'exposition de l'ordre de  $3 \text{ min}$ ?

### Question 4

[Solution n°8 p 37]

Exercice 3.4 : Un télémètre à laser au verre dopé au néodyme déclenché émet un rayonnement impulsionnel de longueur d'onde  $1060 \text{ nm}$ . La puissance lumineuse est de  $1,5 \text{ MW}$  soit une énergie par impulsion égale à  $45 \text{ mJ}$ . La fréquence de répétition du laser est de 12 impulsions par minute. Le diamètre du faisceau à la sortie du laser est de  $10 \text{ mm}$  et la divergence naturelle du faisceau est de  $1 \text{ mrad}$ .

1. Calculez la *DNRO* lorsqu'un œil nu est sous exposition du rayonnement.
2. Calculez la *DNRO*, lorsque le faisceau est observé au travers d'une optique de  $60 \text{ mm}$  de diamètre.

## 5. SECTION D : Choix d'une paire de lunette de protection

Répondre aux questions suivantes

Question 1

[Solution n°9 p 38]

Exercice 4.1 : Un étudiant cherche à travailler sur un laser Ti:Saphire délivrant un rayonnement proche infrarouge autour de 800 nm. Cet oscillateur laser délivre des impulsions de durée 30 fs à une cadence de 10 Hz. L'énergie délivrée par ce laser est de 2 J et le diamètre du faisceau est de 55 mm. On suppose que le diamètre de ce faisceau évolue peu au cours de sa propagation. Quelles indications doivent porter les lunettes de protection adaptées au laser afin que l'étudiant puisse travailler en toute sécurité? Pour vous aider, utilisez le tableau fourni en annexe 4 (à la fin des exercices).

Question 2

[Solution n°10 p 38]

Exercice 4.2 : Soit un laser continu émettant un rayonnement de longueur d'onde 647 nm de puissance moyenne 10 W. Le diamètre du faisceau est de 1,6 mm. Donner les indications qui doivent apparaître sur la paire de lunettes de protection pour travailler en toute sécurité.

## 6. Annexes

Durée d'exposition t(s)	< 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-9</sup> à 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup> à 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup> à 1,8.10 <sup>-5</sup>	1,8.10 <sup>-5</sup> à 5.10 <sup>-5</sup>	5.10 <sup>-5</sup> à 10	10 à 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> à 10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> à 3.10 <sup>4</sup>
Longueur d'onde (nm)									
180 à 302,5	3.10 <sup>10</sup> W.m <sup>-2</sup>	30 J.m <sup>-2</sup>							
302,5 à 315		C1 J.m <sup>-2</sup> si t<T1		C2 J.m <sup>-2</sup> si t>T1		C2 J.m <sup>-2</sup>			
315 à 400		C1 J.m <sup>-2</sup>				10 <sup>4</sup> J.m <sup>-2</sup>		10 W.m <sup>-2</sup>	
400 à 550	10 <sup>11</sup> W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup>	5.10 <sup>-3</sup> J.m <sup>-2</sup>		18 t <sup>0,75</sup> J.m <sup>-2</sup>		100 J.m <sup>-2</sup>		10 <sup>-2</sup> W.m <sup>-2</sup>	
550 à 700		5.10 <sup>-3</sup> J.m <sup>-2</sup>		18 t <sup>0,75</sup> J.m <sup>-2</sup>		18 t <sup>0,75</sup> J.m <sup>-2</sup> si t<T2		C3.10 <sup>2</sup> J.m <sup>-2</sup> si t>T2	
700 à 1050	10 <sup>11</sup> .C4 W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup>	5.C4.10 <sup>-3</sup> J.m <sup>-2</sup>		18 t <sup>0,75</sup> .C4 J.m <sup>-2</sup>		3,2.C4 W.m <sup>-2</sup>			
1050 à 1400	5.10 <sup>11</sup> W.m <sup>-2</sup> .sr <sup>-1</sup>	5.10 <sup>-2</sup> J.m <sup>-2</sup>			90.t <sup>0,75</sup> J.m <sup>-2</sup>		16.W.m <sup>-2</sup>		
1400 à 1530	10 <sup>11</sup> W.m <sup>-2</sup>	100 J.m <sup>-2</sup>	5600.t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>				1000 W.m <sup>-2</sup>		
1530 à 1550		1.10 <sup>4</sup> J.m <sup>-2</sup>		5600.t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>					
1550 à 10 <sup>6</sup>		100 J.m <sup>-2</sup>	5600.t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>						
	C1=5,6.10 <sup>3</sup> .t <sup>0,25</sup>	C2=10 <sup>0,2(λ-295)}</sup>	C3=10 <sup>0,015.(λ-550)}</sup>	C4=10 <sup>(λ-700)/500}</sup>	T2=10.10 <sup>0,02.(λ-550)}</sup> s	T1=10 <sup>0,8.(λ-295)}</sup> .10 <sup>-15</sup> s			

Annexe 1

Durée d'exposition t(s)	< 10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-9</sup> à 10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup> à 10	10 à 10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> à 3.10 <sup>4</sup>
Longueur d'onde (nm)					
180 à 302,5	3.10 <sup>10</sup> W.m <sup>-2</sup>	30 J.m <sup>-2</sup>			
302,5 à 315		C1 J.m <sup>-2</sup> si t<T1		C2 J.m <sup>-2</sup> si t>T1	
315 à 400		C1 J.m <sup>-2</sup>		10 <sup>4</sup> J.m <sup>-2</sup>	
400 à 1400	2.10 <sup>11</sup> W.m <sup>-2</sup>	200 J.m <sup>-2</sup>	1,1.10 <sup>4</sup> t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>	2000 W.m <sup>-2</sup>	
1400 à 106	10 <sup>11</sup> W.m <sup>-2</sup>	100 J.m <sup>-2</sup>	5600 t <sup>0,25</sup> J.m <sup>-2</sup>	1000 W.m <sup>-2</sup>	
	C1=5,6.10 <sup>3</sup> .t <sup>0,25</sup>	T1=10 <sup>0,8.(λ-295)}</sup> .10 <sup>-15</sup> s			
	C2=10 <sup>0,2(λ-295)}</sup>	T2=10.10 <sup>0,02.(λ-550)}</sup> s			
	C3=10 <sup>0,015.(λ-550)}</sup>				
	C4=10 <sup>(λ-700)/500}</sup>				

Annexe 2

conditions de test pour les types de laser	type de laser	durée d'impulsions (s)	nombre d'impulsions
D	laser continu	>0,25	1
I	laser relaxé	$10^{-6}$ à 0,25	100
R	laser déclenché	$10^{-9}$ à $10^{-6}$	100
M	Laser à modes bloqué	$<10^{-9}$	100

Annexe 3

n° d'échelle	Transmission spectrale	Densité d'énergie pour tester l'effet de protection et la stabilité au rayonnement								
		de 180 nm à 315 nm			de 315 nm à 1400 nm			de 1400 nm à 1000µm		
		W/m <sup>2</sup> D	J/m <sup>2</sup> I,R	W/m <sup>2</sup> M	W/m <sup>2</sup> D	J/m <sup>2</sup> I,R	W/m <sup>2</sup> M	W/m <sup>2</sup> D	J/m <sup>2</sup> I,R	W/m <sup>2</sup> M
L1	1,00E-01	1,00E-02	3,00E+02	3,00E+11	100	5,00E-02	1,50E-03	1,00E+04	1,00E+03	1,00E+12
L2	1,00E-02	1,00E-01	3,00E+03	3,00E+12	1,00E+03	5,00E-01	1,50E-02	1,00E+05	1,00E+04	1,00E+13
L3	1,00E-03	1,00E+00	3,00E+04	3,00E+13	1,00E+04	5,00E+00	1,50E-01	1,00E+06	1,00E+05	1,00E+14
L4	1,00E-04	1,00E+01	3,00E+05	3,00E+14	1,00E+05	5,00E+01	1,50E+00	1,00E+07	1,00E+06	1,00E+15
L5	1,00E-05	100	3,00E+06	3,00E+15	1,00E+06	5,00E+02	1,50E+01	1,00E+08	1,00E+07	1,00E+16
L6	1,00E-06	1,00E+03	3,00E+07	3,00E+16	1,00E+07	5,00E+03	1,50E+02	1,00E+09	1,00E+08	1,00E+17
L7	1,00E-07	1,00E+04	3,00E+08	3,00E+17	1,00E+08	5,00E+04	1,50E+03	1,00E+10	1,00E+09	1,00E+18
L8	1,00E-08	1,00E+05	3,00E+09	3,00E+18	1,00E+09	5,00E+05	1,50E+04	1,00E+11	1,00E+10	1,00E+19
L9	1,00E-09	1,00E+06	3,00E+10	3,00E+19	1,00E+10	5,00E+06	1,50E+05	1,00E+12	1,00E+11	1,00E+20
L10	1,00E-10	1,00E+07	3,00E+11	3,00E+20	1,00E+11	5,00E+07	1,50E+06	1,00E+13	1,00E+12	1,00E+21

Annexe 4

# Solution des exercices

## >Solution n°1 (exercice p. 30)

D'après le tableau fourni en annexe 1 (à la fin des exercices), on obtient C1 ( $J.m^{-2}$ ). D'après la formule de C1, on obtient pour cet exemple une valeur d' $EMP = 3,15 \times 10^3 J.m^{-2}$ .

## >Solution n°2 (exercice p. 30)

A partir du tableau fourni en annexe 1 (à la fin des exercices), on obtient une EMP pour la vision égale à  $0,1 J.m^{-2}$ .

A partir du tableau fourni en annexe 2 (à la fin des exercices), on obtient une EMP pour la peau égale à  $1956 J.m^{-2}$ .

## >Solution n°3 (exercice p. 30)

On obtient dans ce cas une  $EMP = 12,5 \times 10^{-3} J.m^{-2}$ .

## >Solution n°4 (exercice p. 31)

### méthode 1 :

Comme le laser émet dans la partie visible du spectre, la durée d'exposition va dépendre du réflexe palpébral qui est égal à environ  $0,25 s$ . Grâce à ce réflexe, le nombre d'impulsions entrant dans l'œil est limitée. En effet, le laser émet une impulsion toutes les  $1/(1MHz) = 1/1 \times 10^6 = 1 s$ , ce qui fait un nombre  $N$  d'impulsions pénétrant dans l'œil de  $2,5 \times 10^5$  impulsions.

De ce qui précède, il faut tenir compte pour ce type de laser répétitif du facteur correctif  $N^{-1/4} = 0,0447$ . Pour connaître l' $EMP_{train}$ , il faut d'abord connaître l' $EMP$  pour une impulsion unique qui est donnée dans le tableau de l'annexe 1.

$$EMP_{unique} = 5.10^{-3} J.m^2$$

On en déduit alors d'après cette dernière information et de la formule annexe que :

$$EMP_{train} = 2,245.10^{-4} J.m^2$$

Ce calcul permet d'avoir un aperçu rapide de l' $EMP$  réduite pour la vision. Mais ce calcul n'est pas rigoureux et donne une valeur peu restrictive.

### méthode 2 :

Une manière plus rigoureuse de faire est de travailler sur une impulsion unique. Pour une exposition de  $0,25 s$ , l' $EMP$  de la vision est de  $18 \cdot t^{0,75} J.m^{-2}$ . On obtient alors une  $EMP$  de la vision après calcul de  $6,36 J.m^{-2}$  pour une impulsion unique.

L'éclairement énergétique moyen limite s'obtient en divisant l'énergie par unité de surface précédente par la durée de l'exposition.

$$E_{MOY} = 6,36/0,25 = 25,5 W.m^2$$

De cet éclairage peut être calculée l'énergie par impulsion  $E$ . Cette dernière est donnée par la formule suivante :

$$E = E_{\text{MOY}} / (\Delta \tau f_R) = 25,5 / (10^{-9} \cdot 10^6) = 2,55 \cdot 10^3 \text{ W.m}^2$$

De ce calcul se déduit alors la valeur de l' $EMP$  :

$$H = E \cdot \Delta f_R = 2,55 \cdot 10^3 \text{ W.m}^2$$

Comparer à la première valeur d' $EMP$  ( $EMP_{\text{train}} = 2,24 \times 10^{-4} \text{ J.m}^{-2}$ ) trouvée par la méthode rapide, on s'aperçoit que la valeur de l' $EMP$  pour la vision donnée par la méthode rigoureuse et qui est basée sur l'éclairage énergétique est beaucoup plus restrictive ( $EMP_{\text{train}} = 2,55 \times 10^{-5} \text{ J.m}^{-2}$  par impulsion).

### >Solution n°5 (exercice p. 32)

1. D'après le tableau en annexe 1, on trouve une  $EMP$  à ne pas dépasser égale à  $10 \text{ W.m}^{-2}$ .
2. A partir de la formule (C.2), on obtient :

$$DNRO = \frac{\sqrt{\frac{(4 \times 4)}{\pi \times 10}} - 0,001}{0,0007} = 1,02 \text{ km}$$

Il faut donc que le manipulateur soit approximativement à  $1 \text{ km}$  de la sortie de la source pour travailler dans des conditions de sécurité optimales.

### >Solution n°6 (exercice p. 32)

Il faut bien faire attention ici que le système optique ne permet pas d'observer le rayon lumineux, il ne va donc pas concentrer davantage de lumière dans l'œil. Dans ce cas la formule à utiliser reste identique à celle utilisée précédemment.

$$DNRO = \frac{\sqrt{\frac{(4 \times 4)}{\pi \times 10}} - 0,007}{0,0001} = 7,07 \text{ km}$$

On se rend compte de l'énorme importance de la divergence du faisceau laser. Puisqu'ici en diminuant la divergence ( $1 \text{ mrad}$ ) du faisceau il faut être 7 fois plus loin qu'avec une divergence de  $7 \text{ mrad}$ .

### >Solution n°7 (exercice p. 32)

*I*

La première chose à faire est d'évaluer la divergence naturelle du faisceau.

$$\theta = \frac{0,018 - 0,013}{50} = 0,1 \text{ mrad}$$

Le laser He-Ne est un laser dit continu, on souhaite avoir une *EMP* appropriée fournie par le tableau en annexe 1 égale à  $18 \cdot t^{0.75} \text{ J.m}^{-2}$ . A partir de l'expression (C.1), on peut alors en déduire la durée  $t$  d'exposition.

$$EMP = \frac{4 \times P_0}{\pi \times ((2 \times w) + z \cdot \theta)^2}$$

La précaution à prendre est de donner l'EMP en  $\text{W.m}^{-2}$ . Pour effectuer cette transformation, il suffit de diviser  $18 \cdot t^{0.75} \text{ J.m}^{-2}$  par  $t$ .

Dans ce cas, nous avons,  $18 \cdot t^{(-0.25)} = \frac{4 \times 0,003}{\pi \cdot (0,013 + 65 \times 0,0001)^2}$  après calcul, on obtient un temps d'exposition égal à  $10 \text{ s}$ . L'observateur placé à  $65 \text{ m}$  ne coure aucun danger s'il observe la faisceau directement pendant un temps inférieur à  $10 \text{ s}$ .

## II

Si maintenant l'observateur veut regarder directement le faisceau pendant  $180 \text{ s}$ , on utilise la même formule.

Après inversion de la formule (C1), on obtient la formule suivante :

$$z = \frac{1}{\theta} \times \left( \sqrt{\frac{4 \times P_0}{\pi \times EMP}} - (2 \times w) \right)$$

c'est à dire  $z = 149 \text{ m}$ ,

## > Solution n°8 (exercice p. 32)

### I

La durée des impulsions se déduit à partir de la connaissance de la puissance moyenne et de l'énergie par impulsion. En effet  $E = P_0 / \Delta\tau$ , après calcul, on obtient une durée d'impulsions de  $30 \text{ ns}$ .

Il faut aussi vérifier la valeur de  $N$  puisqu'ici le laser est un laser émettant des impulsions successives. Or dans cet exemple,  $N = 12/60 = 0,2$  impulsions par seconde.

D'après le tableau donné en annexe 1, on obtient une *EMP* égale à  $5 \times 10^{-2} \text{ J.m}^{-2}$ . Étant donné que  $N < 1 \text{ Hz}$ , il n'est pas nécessaire de calculer d'*EMP* réduite.

Pour calculer la *DNRO*, il suffit de faire comme dans l'exercice 3.3:

$$z = \frac{1}{\theta} \times \left( \sqrt{\frac{4 \times P_0}{\pi \times EMP}} - (2 \times w) \right)$$

$$DNRO = \frac{1}{0,001} \times \left( \sqrt{\frac{4 \times 1,5 \times 10^6 \times 30 \times 10^{-9}}{\pi \times 0,05}} - 0,01 \right) = 1060 \text{ m}$$

Il faut d'après cette valeur que le manipulateur soit à  $1 \text{ km}$  de la source pour travailler dans des conditions de sécurité optimales. Ceci est donc complètement impossible, l'utilisateur doit donc obligatoirement utiliser des lunettes de protection pour être sécurisé et diminuer cette distance.

## II

Si on utilise une optique de diamètre  $60\text{ mm}$  pour visualiser le faisceau de ce laser, la  $DNRO$  doit être majorée par un facteur  $K = 60/7$ . C'est à dire :

$$DNRO_{\text{avec système optique}} = DNRO_{\text{standard}} \times K = \frac{1060 \times 60}{7} = 9\text{ km}$$

### >Solution n°9 (exercice p. 33)

La première lettre qui doit apparaître sur le faisceau est la lettre M puisque le laser Ti:Sa est un laser fonctionnant à modes bloqués et la durée des impulsions est inférieure à  $1\text{ ns}$ .

Le nombre qui suit cette lettre est  $800\text{ nm}$  puisque le rayonnement laser possède une longueur d'onde de  $800\text{ nm}$ . Soit le nombre peut être inscrit, soit une gamme de longueur d'onde. Cette gamme doit bien entendu comprendre la longueur d'onde de  $800\text{ nm}$ .

Ensuite doit être indiqué le numéro d'échelle. Pour cela, il faut se référer au tableau fournit en annexe 4 (à la fin des exercices). On s'aperçoit alors qu'il faut connaître l'énergie par unité de surface.

$$H = \frac{E}{S} = \frac{E}{\frac{\pi \times (2 \times w)^2}{4}} = 8,42 \cdot 10^2\text{ J/m}^2$$

Dans le tableau, il faut se reporter aux colonnes relatives à la gamme de longueur d'onde  $315\text{nm} - 1400\text{nm}$  dans la colonne M. On cherche alors la valeur immédiatement supérieure à celle calculée ci-dessus, ici cette valeur est  $1,5 \times 10^3\text{ J/m}^2$ . Le facteur d'échelle qui est alors indiqué L7. Attention dans le calcul fait précédemment, on ne tient pas compte du taux de répétition du laser, pour tenir compte de ce dernier paramètre, il faut prendre un nombre d'impulsion égal à 100 pour être conforme à la norme NF-EN 207 (voir le paragraphe sur la protection individuelle).

Il faut alors multiplier le paramètre H précédemment calculé par un facteur de correction  $N^{1/4}$ .

Dans ce cas, on trouve une énergie par unité de surface  $H' = 3 \times 10^3\text{ J/m}^2$ . Dans ce cas, le facteur doit être L8.

### >Solution n°10 (exercice p. 33)

Il faut dans un premier temps calculer le temps d'exposition énergétique  $H_0$ . Cette valeur se calcule à partir de la surface circulaire représentant la plus faible section du faisceau et sur une base de temps de  $10\text{ s}$  pour être conforme à la norme NF-EN 207 dans le cas de lasers continus.

$$H = \frac{4 \times E}{\pi \times (2 \times w)^2} = 4,97 \cdot 10^6\text{ J/m}^2$$

D'après le tableau en annexe 4 (à la fin des exercices), il faut que les lunettes affichent les lettres suivantes : D 647 L6 ...

# Signification des abréviations

- DNRO Distance Nominale de Risque Oculaires
- EMP Exposition Maximale Permise
- LEA Limite d'Emission Accessible
- ZNRO Zone Nominale de Risques Oculaires

# Bibliographie

[Norme NF-EN 207] COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE -, *Norme NF-EN 207*, -, -, 2000.

[Norme NF-EN 208] COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE -, *Norme NF-EN 208*, -, -, 2000.

[Norme NF-EN 60825] COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE -, *Norme NF-EN 60825*, -, -, 2000.

# Crédit des ressources

## **Figure 1a** *p. 7*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure 1b** *p. 7*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure 2** *p. 9*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure 3** *p. 9*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure 4** *p. 10*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure 5** *p. 11*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure 6** *p. 12*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure 7** *p. 14*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure classe 1** *p. 20*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure classe 1b** *p. 21*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure classe 2** *p. 21*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure classe 2b** *p. 21*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure classe 3a** *p. 21*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

## **Figure classe 3b** *p. 22*

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

**Figure classe 4** p. 22

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

**Figure 8** p. 29

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

**Annexe 1** p. 33

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

**Annexe 2** p. 33

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

**Annexe 3** p. 34

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>

**Annexe 4** p. 34

<http://creativecommons.org/licenses/publicdomain/2.0/fr/>