

3. Définitions relatives à l'émission laser

La lumière, qu'elle soit naturelle (soleil) ou artificielle (bougie, phare de voiture...), est le résultat d'une émission spontanée: la source émet des photons d'énergie différente, sans direction privilégiée, et sans relation de phase. L'œil, qui est sensible à l'énergie lumineuse, perçoit un effet lumineux moyen.

Le principe du laser (acronyme de « light amplification by stimulated emission of radiation ») repose sur l'émission stimulée de photons: un photon incident dans la matière entraîne l'émission d'un photon identique (un clone) qui possède les mêmes propriétés en termes d'énergie, de direction, et de phase. L'émission stimulée donne à la lumière laser ses caractéristiques les plus marquantes: monochromatisme, directivité, cohérence.

L'oscillateur laser, ou source laser, est un système à rétroaction composé de :

- un milieu amplificateur (le milieu à gain) ;
- une source d'énergie (le pompage) ;
- une boucle de rétroaction (la cavité optique).

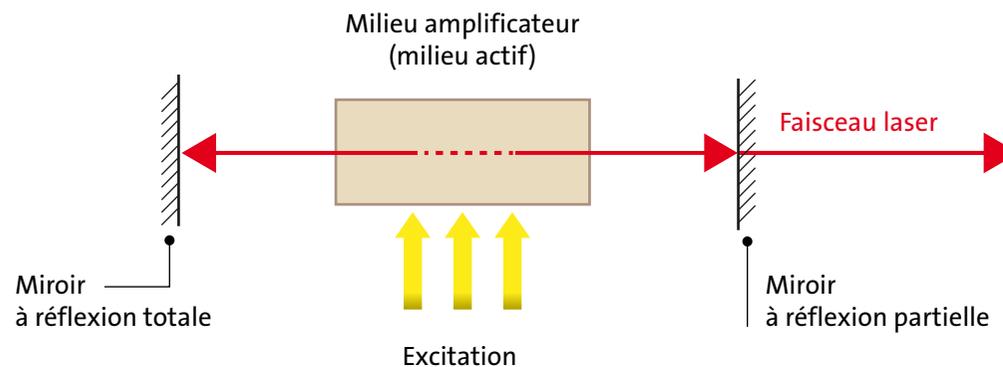
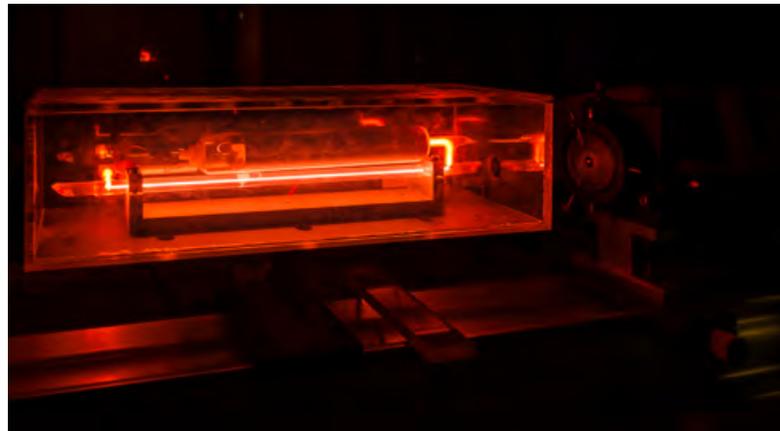


Figure 1 Schéma de principe d'une cavité laser



© Cyril Frésillon/LPL/FIRST-TF/CMRS Photographique

Laser hélium-néon à cœur ouvert. Cette expérience est utilisée pour montrer les différentes briques d'un laser (milieu amplificateur, pompage, cavité) et expliquer le fonctionnement de ce type de source lumineuse.

Le pompage consiste à fournir de l'énergie au milieu à gain afin de permettre le mécanisme d'émission stimulée. Le système le plus répandu utilise 4 niveaux d'énergie.

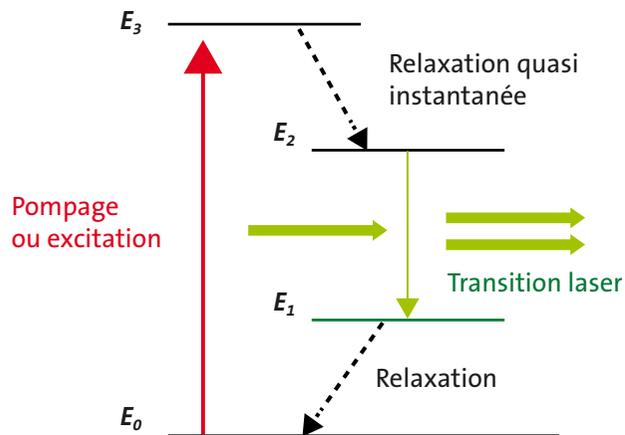


Figure 2 Système laser à 4 niveaux d'énergie

Dans un milieu au repos, les atomes sont à l'état fondamental qui est celui le plus peuplé.

Sous l'effet d'une excitation externe (pompage), des atomes vont absorber de l'énergie pour se retrouver sur un niveau énergétique supérieur E_3 qui constitue un réservoir d'énergie. L'ensemble des atomes se trouvant dans cet état va revenir vers l'état fondamental en occupant différents niveaux intermédiaires E_2 et E_1 . Chaque niveau énergétique est caractérisé par un temps de résidence (ou durée de vie) des atomes sur ces niveaux. Dans l'exemple présenté en figure 2, le niveau E_3 se vide rapidement par relaxation vers

le niveau E_2 de durée de vie longue. Le niveau E_1 , quant à lui, se caractérise par une durée de vie courte, et se vide rapidement vers le niveau fondamental.

La transition laser a lieu entre les niveaux E_2 et E_1 , et la configuration décrite favorise la population du niveau E_2 par rapport à E_1 : il y a plus d'atomes occupant le niveau E_2 que le niveau E_1 . On parle alors d'inversion de population.

L'énergie libérée lors du retour d'un atome à un niveau inférieur détermine la longueur d'onde de la lumière créée.

Le pompage et la cavité sont adaptés à la longueur d'onde recherchée.

3.1. Longueurs d'onde (λ)

Les lasers couvrent le domaine spectral compris entre les UV extrêmes et les micro-ondes (de 100 nm à 1 mm de longueur d'onde).

La longueur d'onde est principalement liée aux caractéristiques spectroscopiques du milieu à gain. Elle est éventuellement mise en forme par les éléments de la cavité, qui agissent comme un filtre.

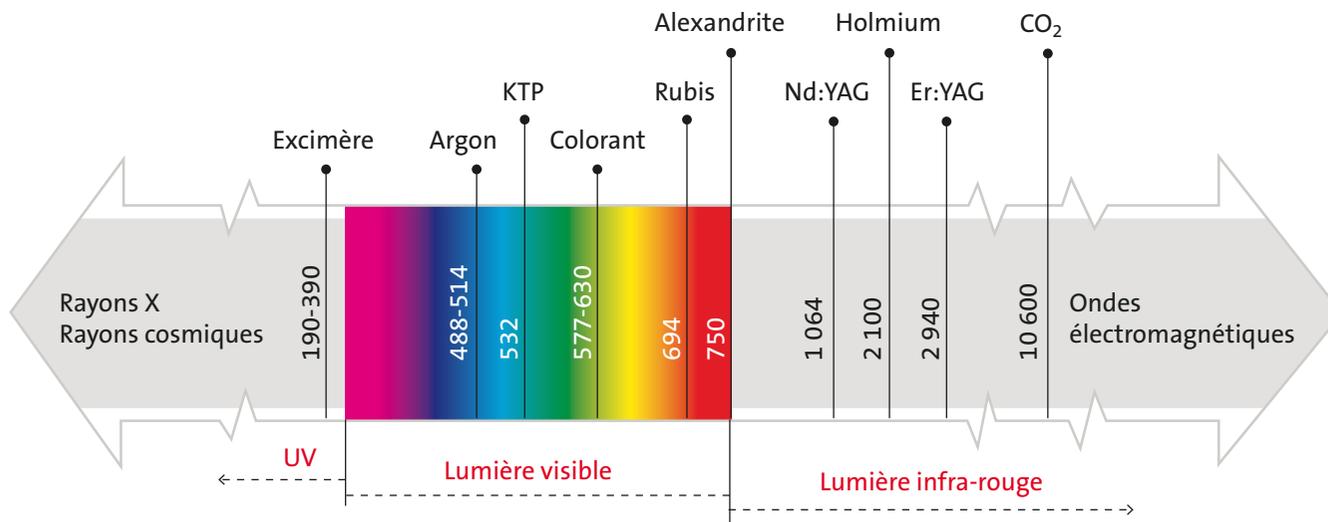


Figure 3 Domaine spectral couvert par les principaux lasers

Les longueurs d'onde rencontrées le plus fréquemment sont :

- 633 nm : He-Ne
- 800 nm : Ti:Sa
- 1 064 nm : Nd:YAG
- 10,6 μm : CO_2

En considérant les valeurs réglementaires et normatives, la plage du «visible» se situe entre 380 et 780 nm. Toutefois, on parle couramment de la plage 400 - 700nm.

3.2. Types de laser

Ils dépendent de la nature du milieu à gain et du type de pompage associé.

3.2.1. Lasers à gaz

Le milieu à gain est constitué d'un gaz ou d'un mélange de gaz à basse ou haute pression, en tube scellé ou à circulation. Ces gaz peuvent être inertes, corrosifs ou toxiques. Ils induisent des risques autres que ceux directement liés au faisceau (**Chapitre 8**).

Le pompage est généralement effectué par décharge haute tension (1 à 10 kV).

► Exemples

- He-Ne : 633 nm
- Ar⁺, Kr⁺ : 364 nm, 488 nm, 514 nm
- vapeur de cuivre : 510 nm, 578 nm
- CO_2 : 10,6 μm
- excimères (ArF, KrF, XeCl) : 193 nm, 248 nm, 308 nm

3.2.2. Lasers à liquide

Leur milieu actif est une molécule organique dissoute dans un solvant (éthylène glycol, méthanol...).

Ils sont souvent pompés par un autre laser, plus rarement par lampe flash (lampe émettant une lumière pulsée intense, pouvant couvrir tout le spectre UV, visible et proche infrarouge).

À partir d'un même équipement, en faisant varier la nature du colorant (ou sa concentration) et celle du solvant, il est possible d'atteindre des gammes de longueurs d'onde différentes.

Les colorants utilisés couvrent tout le domaine visible.

Tous les colorants et solvants utilisés présentent des risques chimiques qui sont abordés au **sous-chapitre 8.3**.

3.2.3. Lasers à solide

Dans cette catégorie, les milieux à gain se composent de verres ou de cristaux dopés avec un élément actif.

Le pompage des verres est réalisé par lampe flash. Les cristaux peuvent être pompés par flash ou par un autre laser de longueur d'onde adaptée.

► Exemples

- Ti :Sa : 800 nm
- Yb :CaF₂ : 1 030 nm
- Nd :YAG : 1 064 nm
- Nd :YLF : 1 053 nm

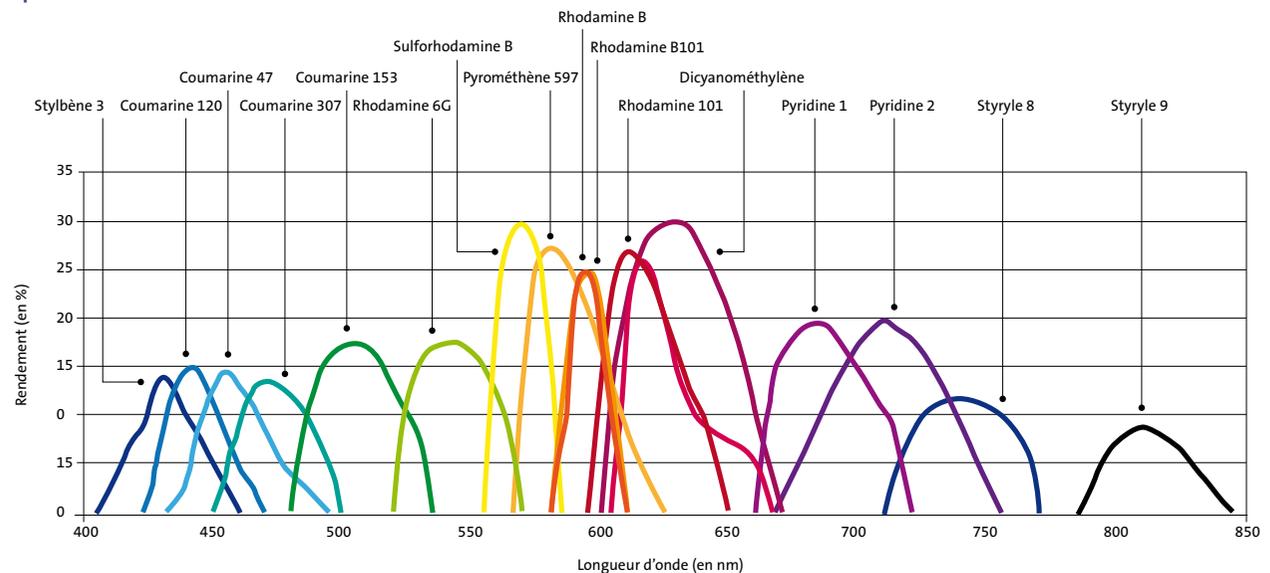


Figure 4 Courbe d'efficacité spectrale des principaux colorants lasers

(Source : d'après <http://radiant-dyes.com/index.php/products/laser-dyes/list-of-laser-dyes>)

Cette catégorie inclut également les diodes laser. Ces équipements permettent d'atteindre une large gamme de longueurs d'onde et remplacent progressivement d'autres technologies (laser à gaz par exemple).

► Exemples

- AlGaAs : 808 nm
- InGaAs : 940 nm, 980 nm

3.2.4. Lasers accordables

Lorsque les niveaux responsables de la transition laser sont larges, la transition laser est mal définie et conduit à élargir le spectre d'émission possible. C'est le cas par exemple des lasers à colorants et des lasers à solides (verres et certains cristaux tels que Ti:Sa, Yb³⁺, CaF₂), mais également des lasers de type oscillateur paramétrique optique.

En conséquence la longueur d'onde d'émission peut varier, éventuellement sur une large gamme, raison pour laquelle ces équipements nécessitent une attention particulière en matière de prévention des risques.

3.2.5. Lasers blancs

L'injection d'une impulsion courte dans une fibre optique adaptée peut produire un continuum de lumière blanche couvrant l'ensemble du spectre visible ainsi qu'une partie du proche infrarouge. La puissance émise peut atteindre plusieurs watts.

La large distribution spectrale (notamment dans le visible) du rayonnement émis rend insuffisante voire inappropriée l'utilisation des protecteurs oculaires habituellement utilisés pour le risque laser. Il est d'autant plus important, pour ce type d'équipement, de mettre en place et de respecter les mesures de prévention collectives et organisationnelles.

3.2.6. Lasers multi-raies

Certains milieux à gain permettent l'émission simultanée et superposée de plusieurs longueurs d'onde. La sélection de la longueur d'onde recherchée doit alors être réalisée par un élément filtrant dans la cavité.

Sans la mise en place de cet élément filtrant, le rayonnement émis peut comporter plusieurs longueurs d'onde avec des éclaircissements différents.

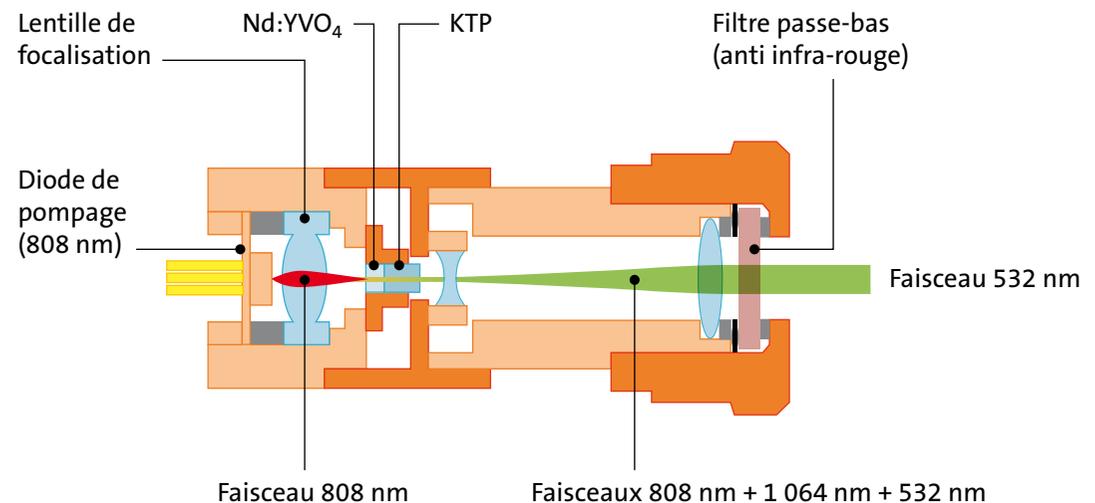


Figure 5 Configuration interne d'un pointeur laser vert

Il est également possible, dans un même appareil, de rencontrer plusieurs longueurs d'onde : laser de pompe, milieu actif, conversion de fréquence. Il convient alors de se protéger de toutes les longueurs d'onde émises, et de s'assurer des caractéristiques du (des) faisceau(x) réellement accessible(s).

Par exemple, le faisceau délivré par le pointeur laser de la **figure 5** peut posséder des composantes

à 532 nm (conversion par le cristal KTP) avec des rayonnements résiduels à 1064 nm (cristal Nd:YVO₄) et 808 nm (diode de pompe).

Par précaution, il est nécessaire de vérifier l'absence de rayonnement résiduel infrarouge, par exemple, à l'aide d'un filtre anti-infrarouge ou en s'assurant que la puissance délivrée n'est pas supérieure à la puissance nominale.

Milieu actif	Longueur d'onde	Régime continu et pulsé	Cadence	Puissance et énergie
GAZ				
Azote	337 nm	100 ns	1 à 10 Hz	1 mJ à 100 mJ
Excimères	157 à 350 nm	10 à 60 ns	1 Hz à 10 kHz	1 mJ à 1 J
Gaz ionisés (Ar, Kr)	350 à 800 nm	Continu		0,1 à 40 W
CO ₂	10 600 nm	Continu 10 à 100 ns	10 kHz	1 W à 50 kW
SOLIDE				
Rubis	694 nm			
Nd:YAG	1064 nm + harmoniques	30 ps à 30 ns	1 à 80 kHz	1 mJ à 50 J
Titane-saphir	370 à 3 000 nm	< 80 fs	1 à 50 kHz	0 à 0,2 J
Diodes lasers	Grande variété 400 à 3 000 nm	Continu ou modulable		1 à 200 mW
LIQUIDE				
Colorants	Accordable 350 à 1 000 nm	Continu ou impulsionnel		

Tableau 1 Exemples de lasers et leurs principales caractéristiques

3.3. Géométrie du faisceau

Les faisceaux laser sont généralement circulaires, et leur diamètre en est naturellement mesuré :

- à mi-hauteur
- à $1/e^2$
- pied à pied

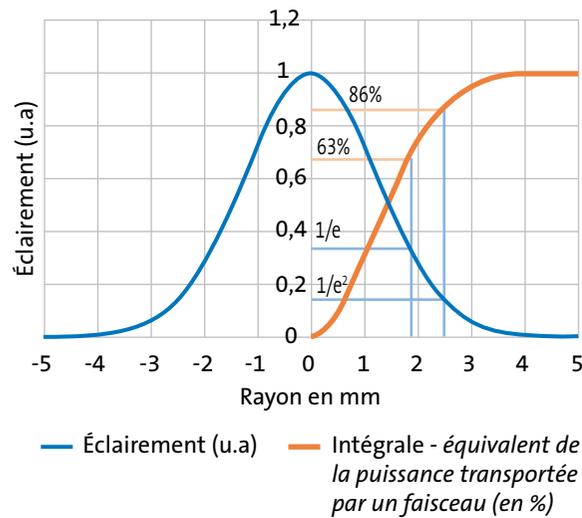


Figure 6 Exemple d'un profil gaussien

Le profil spatial est souvent gaussien, on parle alors de faisceau monomode transverse. Si plusieurs modes transverse peuvent coexister dans la cavité, le profil est composé d'une figure symétrique avec autant de zones énergétiques.

La cavité peut également intégrer des systèmes qui modifient le profil du faisceau pour le rendre plus homogène, jusqu'à obtenir un profil spatial plat.

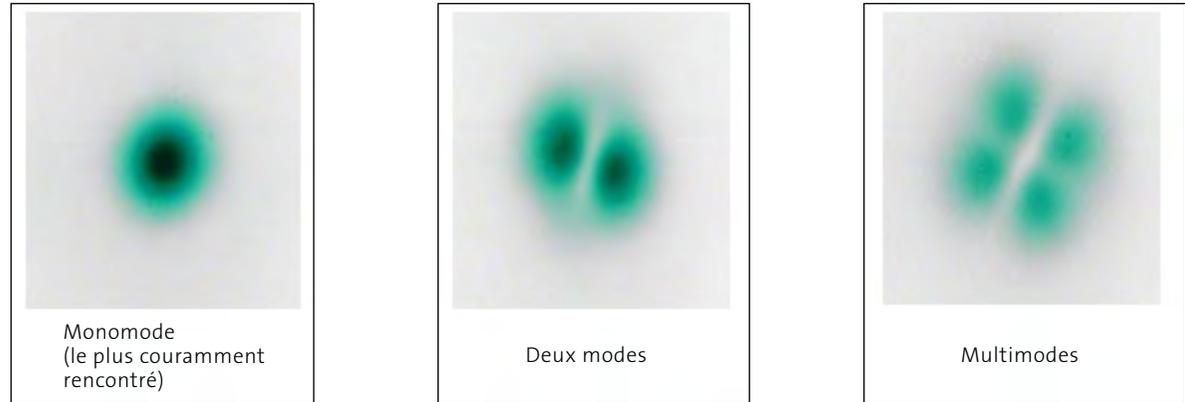


Figure 7 Profils spatiaux des faisceaux lasers

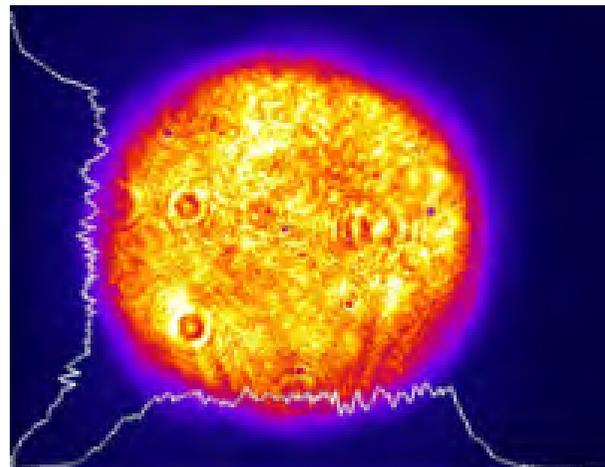


Figure 8 Exemple de profil de faisceau laser mesuré au moyen d'un analyseur de faisceau

3.4. Divergence du faisceau

Même si elle est généralement faible, la divergence affecte tous les faisceaux laser. Elle peut commodément s'exprimer par une approximation aux petits angles, en milliradians (mrad). Un milliradian correspond à l'angle aigu d'un triangle isocèle de 1 m de hauteur et 1 mm de longueur de côté. Plus le diamètre du faisceau augmente, plus la divergence diminue. On dit d'un faisceau qu'il est collimaté lorsque sa divergence est quasiment nulle, c'est-à-dire de l'ordre 1 mrad (faisceau parallèle).

L'utilisation d'une source de diamètre important permet de propager le faisceau sur une longue distance.

Pour les sources fibrées, c'est la géométrie de la fibre qui définit la divergence (α) du faisceau en sortie. Elle est souvent élevée, de l'ordre de 10° soit 175 mrad.

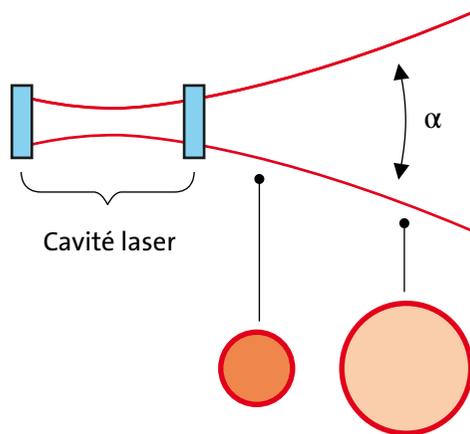


Figure 9 Effet de la divergence

La divergence α a pour effet de diluer l'éclairement laser, mesuré en W/m^2 , sur une plus grande surface, c'est-à-dire diminuer l'énergie déposée par unité de surface.

Attention aux conventions retenues : on parle souvent de demi-angle, alors que les normes en matière de sécurité utilisent l'angle total.

3.5. Type d'émission laser

3.5.1. Émission continue

L'oscillateur laser émet un faisceau continu lorsque le mode de pompage est continu dans un milieu à gain adapté. On parle de mode D (vient de l'allemand « Dauerstrich » qui signifie « onde continue »). La puissance lumineuse est exprimée en Watt.

3.5.2. Émission impulsionnelle

Une source laser est dite impulsionnelle lorsque l'émission est découpée dans le temps en impulsions uniques ou répétitives, dans le but d'en augmenter l'intensité lumineuse, ou de favoriser l'effet laser.

Il est par exemple possible d'obtenir un train continu d'impulsions.

Il existe trois gammes de durées d'impulsion :

- RÉGIME RELAXÉ (mode I, vient de l'allemand « Impuls »).

Le pompage n'est plus continu, mais impulsionnel. Dès que le pompage s'établit, l'émission laser s'installe. Quand le pompage cesse, l'émission laser disparaît. On obtient ainsi des impulsions d'une durée comprise entre une milliseconde (ms) et une microseconde (μs).

- RÉGIME DÉCLENCHÉ (mode R, vient de l'allemand « Riesenimpuls » qui signifie « impulsion géante »).

Un dispositif placé dans la cavité empêche temporairement l'émission du rayonnement. L'ouverture ultrarapide de ce dispositif au moment où l'inversion de population atteint son maximum génère une impulsion laser géante. Il est ainsi possible d'obtenir des impulsions d'une durée comprise entre une microseconde (μs) et une nanoseconde (ns).

- RÉGIME À MODES BLOQUÉS (mode M, vient de l'allemand « Modenkopplung » qui signifie « couplage de mode »).

Un modulateur ultrarapide périodique est inséré dans la cavité laser. Ce dispositif permet la génération d'impulsions d'une durée inférieure à la nanoseconde.

Dans ces trois cas, l'énergie lumineuse de chaque impulsion est exprimée en Joules. On peut également mesurer la puissance moyenne de toutes les impulsions exprimée en Watts, en prenant en compte la cadence de répétition.

3.6. Énergie et puissance

La puissance lumineuse est exprimée en Watt et l'énergie en Joule. La relation entre les deux grandeurs fait intervenir le temps :

$$E_{imp} = \int P(t).dt$$

La puissance moyenne d'un laser impulsionnel est donnée par l'énergie cumulée pendant une seconde. Inversement, la puissance de crête ($P_{crête}$) d'une impulsion brève est donnée par l'énergie de l'impulsion (E_{imp}) divisée par la durée (Δt) de l'impulsion.

$$P_{crête} = \frac{E_{imp}}{\Delta t}$$

L'effet sur les tissus est lié à l'éclairement exprimé en intensité par unité de surface (W/m^2 ou J/m^2). À intensité égale, plus la surface diminue, plus l'éclairement augmente.