

## Bases physiques du fonctionnement d'un laser

Pr J-Y Devaux  
Biophysique  
Université Paris 6

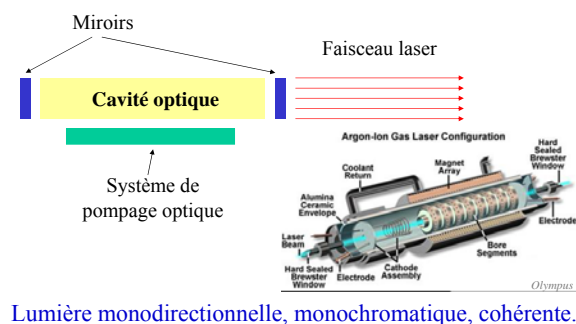
avril 2005

## L.A.S.E.R.

- Light
- Amplification
- by Stimulated
- Emission
- of Radiation
- Amplification
- Lumineuse
- par une Emission
- de Rayonnement
- Stimulée

Transformation d'une énergie d'origine quelconque en une énergie lumineuse

## Emission laser



## Plus de 40 ans d'histoire

- Pressenti en 1917 par Einstein
- Inventé en 1960 par Maiman (laser rubis)
- Qualifié alors de « solution à la recherche d'un problème »
- 1966 : Prix Nobel pour A. Kastler (pompage optique)

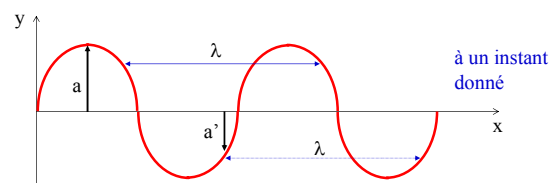


Omniprésent dans la vie scientifique mais aussi dans la vie courante  
Simple dans son principe mais exemple-type d'application de la physique quantique

## La Lumière

- La lumière est constituée de photons
- A la fois **onde** et **corpuscule**
- **Onde électro-magnétique**
- « **Grain** » d'énergie

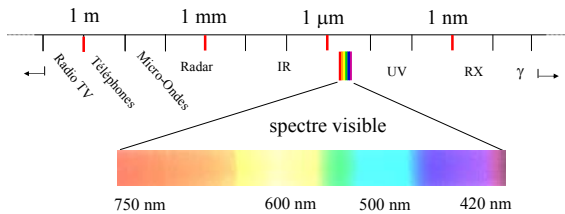
## Onde électro-magnétique



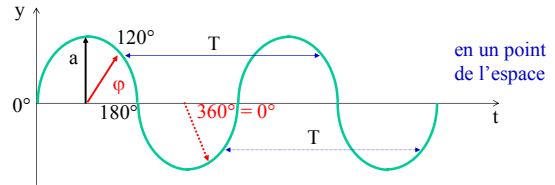
- Longueur d'onde  $\lambda$  (en mètre) = constante
- Amplitude  $a$  = variable selon  $x$

## Le spectre électro-magnétique

La longueur d'onde définit la position dans le spectre et détermine certaines propriétés



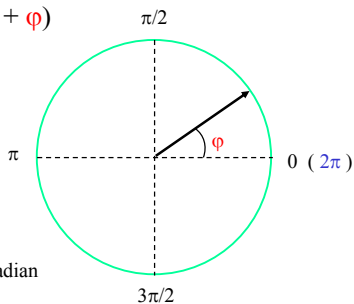
## La fréquence et la phase de l'onde



- Période  $T$  (en seconde) = constante
- Fréquence  $\nu$  (en Hertz) = constante =  $1 / T$
- Phase  $\phi$  = (en degré) variable selon l'instant  $t$

## Représentation de la phase

$$S = a \cos(\omega t + \phi)$$



$\phi$  est exprimée en radian

## Onde et énergie

- Une onde électro-magnétique s'accompagne d'une certaine quantité d'énergie
- L'unité internationale d'énergie est le Joule (J)
- Pour les rayonnements, on utilise aussi l'électron-Volt (eV)

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joules}$$

- La puissance  $P$  est l'énergie par unité de temps, l'unité est le Watt (W)  $1 \text{ W} = 1 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$


## Relations entre ces grandeurs

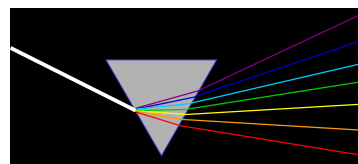
$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda} \quad E = h \nu$$

Annotations:  $c$  (célérité) :  $3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $h$  (Cte de Planck) :  $6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

$\lambda$	1 m	1 mm	1 μm	1 nm				
	Radio TV	Téléphones	Micro-Ondes	Radar	IR	UV	RX	γ
$\nu$	$10^{10}$	$10^{11}$	$10^{12}$	$10^{13}$	$10^{14}$	$10^{15}$	$10^{16}$	$10^{17}$ Hz
$E$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	0,01	0,1	1	10	100	$10^3$ eV

## Le photon, grain d'énergie

- Forme « individualisable » 
- Energie pure - Absence de masse
- Propagation dans le vide ( $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
- Vitesse de propagation dans la matière  $v = c / n$



## Le faisceau de lumière

- Un faisceau est constitué d'un grand nombre de photons
- L'énergie transportée  $E_T$  par le faisceau est la somme des énergies  $E_{ph}$  de chaque photon

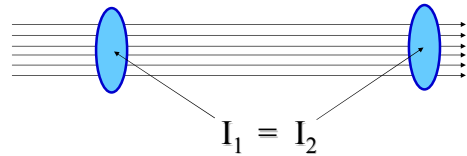
$$E_T = \sum E_{ph}$$

- La **fluence I** est la quantité d'énergie par unité de surface :  $I = E_T / S$

- Le débit de fluence :  $\dot{I} = I / t$

## Faisceau parallèle

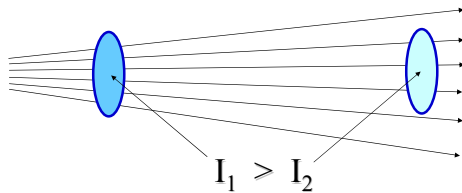
- Les fluences sont constantes



Anneaux de surface unitaire S

## Faisceau divergent

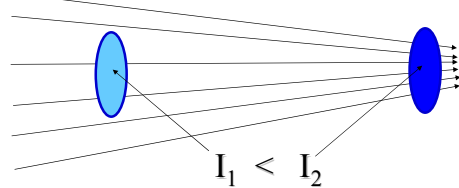
- La fluence diminue



Anneaux de surface unitaire S

## Faisceau convergent

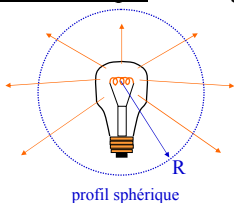
- La fluence augmente



Anneaux de surface unitaire S

## Directivité du faisceau

Source classique : Divergent



Sphère :  $S = 4 \pi R^2$

Cercle :  $S = \pi r^2$

profil sphérique

Laser : Monodirectionnel et *presque* parallèle



profil circulaire

## Comparaison de débit de fluence

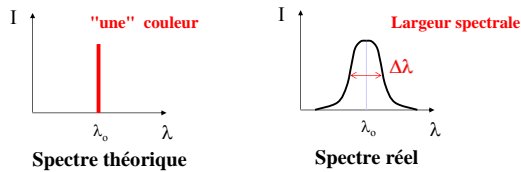
- Puissance reçue à **2 mètres** = 200 cm
- Une lampe de **100 W** (sphère  $r = 200$  cm)  
 $\dot{I} = 100 / 4 \pi \times 4.10^4 = 0,2 \text{ mW cm}^{-2}$
- Un laser He-Ne de **1 mW** (cylindre  $r = 2$  mm)  
 $\dot{I} = 10^{-3} / \pi \times 0,04 = 8 \text{ mW cm}^{-2}$



**Protection visuelle nécessaire lors de l'utilisation de lasers**

## Monochromaticité

- Rayonnement de même longueur d'onde
- Étymologiquement : de même couleur
- S'emploie même en dehors du spectre visible



## Largeur spectrale $\Delta\lambda$

1<sup>ère</sup> relation d'incertitude d'Heisenberg :

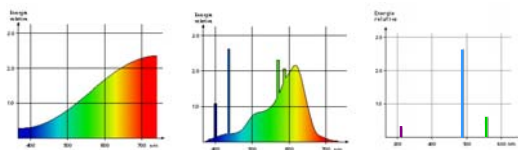
« Il n'est pas possible de connaître l'énergie exacte d'une particule à un instant précis. »

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \quad \text{avec} \quad \hbar = h / 2\pi$$

$$\Delta\lambda \approx 2\pi \cdot c \cdot \Delta t$$

Remarque : Il s'agit d'une limite physique fondamentale, non d'une insuffisance de qualité des instruments de mesure.

## Comparaison de spectres



Lampe à incandescence

Tube fluorescent  
'tube néon'

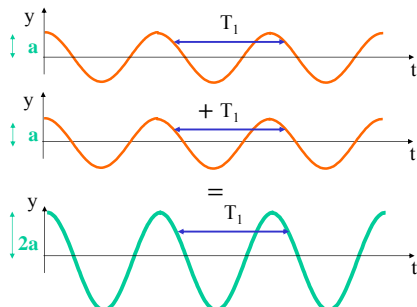
Différents types  
de laser

L'émission laser se caractérise par une faible largeur spectrale

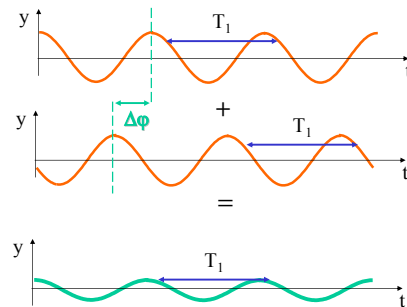
## Relations de phase

- Les lampes classiques émettent des rayonnements de longueur d'onde différentes et dont les phases sont toutes indépendantes les unes des autres
- Les lasers émettent des rayonnements de longueur d'onde identique, tous en phase et qui le demeurent sur toute leur trajectoire.

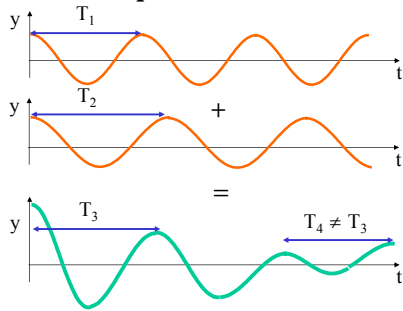
## Addition de signaux : phases et fréquences identiques



## Addition de signaux : fréquences identiques, phases différentes



### Addition de signaux : fréquences différentes



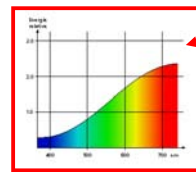
### Propriétés du laser



- Monodirectionnel, de faible divergence et de phase identique  
Cohérence spatiale
- Monochromatique avec une largeur spectrale faible  
Cohérence temporelle
- ➡ Densité de puissance élevée

D'où vient cette puissance ?

### Mécanisme d'émission lumineuse



Lampe à incandescence

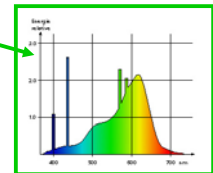
Spectre continu  
Isotropisme spatial

**Non**

**Pas vraiment**

Tube fluorescent

Spectre continu  
+  
Spectre de raies



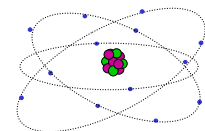
D'où vient le spectre de raies ?

La solution est dans l'atome

### Quelques notions simples

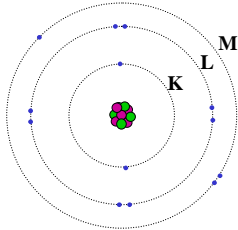
- L'atome est constitué :

- d'un noyau, formé
  - de protons (positifs)
  - de neutrons (neutres)



- d'une couronne (cortège) d'électrons porteurs de charge électrique négative

## Modèle atomique de Bohr



$n$  : nombre **quantique**  
principal : 1, 2, 3...  
organisation en plusieurs  
orbites : K, L, M...

Modèle purement théorique

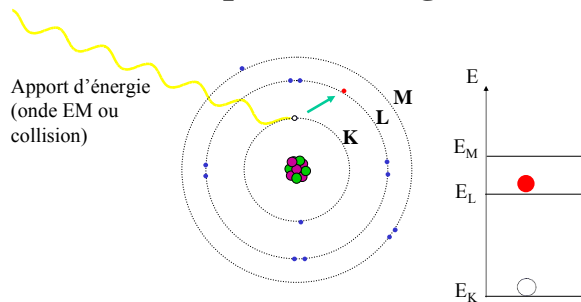
## Cortège électronique

- le rayon de chaque orbite est quantifié
- Les positions intermédiaires sont **INTERDITES**
- Niveaux d'énergie des orbites :

$$E_n = -\frac{Z^2 m e^4}{n^2 2 \hbar^2}$$

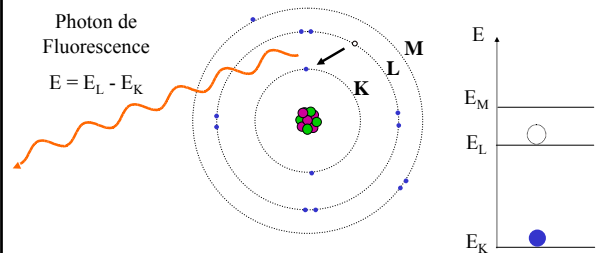
- Etat énergétique minimal : état le plus **STABLE**

## Absorption d'énergie



**Etat EXCITE**

## Emission spontanée



**Etat STABLE**

Délai variable

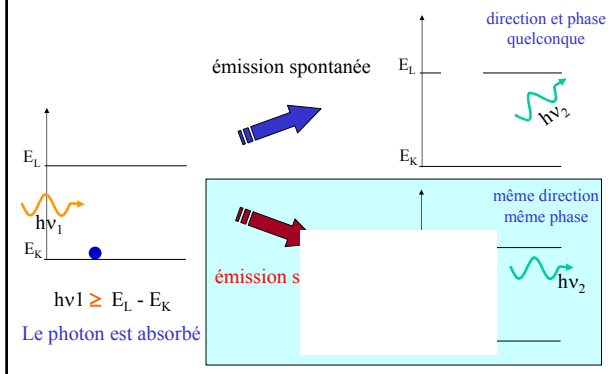
## Probabilités de survenue

- L'absorption d'un photon incident par un système atomique, a une certaine probabilité (fonction de  $\mu$ ) de se produire.
- L'émission spontanée d'un photon survient d'autant plus facilement que l'absorption est aisée.

## Les retours à l'état de base

- Fluorescence :
  - Émission d'un photon, quantum d'énergie
  - Délai généralement court (qq nanosecondes)
- Phosphorescence :
  - Emission d'un photon
  - Délai retardé (qq secondes à plusieurs heures)
- Transition non radiative :
  - Pas de photon, mais énergie de vibration
  - Délai très bref (inférieur à la picoseconde)
- Emission stimulée :
  - Emission d'un photon
  - Circonstance particulière de survenue (*non spontanée*)

## Emission spontanée ou stimulée



## Généralisation +++

- Ce qui est vrai pour les électrons, est vrai aussi pour tout autre système organisé en niveaux d'énergie.
- Puisque tout système atomique absorbe et restitue de l'énergie, il évolue entre plusieurs états énergétiques et la notion d'atome se substitue à celle d'électrons.

## Conditions de survenue

- L'émission stimulée ne survient que si un photon d'énergie *strictement* égale à celle de la transition passe à proximité.
- Il faut que le nombre d'atomes en attente au niveau supérieur soit *plus grand* que celui du niveau inférieur.
- Il ne faut pas que les atomes retombent *spontanément* au niveau inférieur avant que la stimulation n'intervienne.

## Statistique de Boltzmann

- L'équation de Boltzmann permet de connaître le nombre d'atomes à un niveau d'énergie donnée :

$$N_i = A \cdot e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

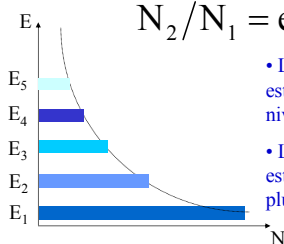
A est une constante de proportionnalité  
 k est la constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{23} \text{ J / } ^\circ\text{K}$   
 T est la température (en degré Kelvin)

- La population d'atomes :
  - Augmente en proportion de la température
  - Diminue avec l'énergie  $E_i$  du niveau considéré

## Ratio de population

- La proportion entre deux populations est :

$$N_2/N_1 = e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$$



- La population à un niveau donné est toujours plus faible que celle des niveaux inférieurs.
- La population la plus nombreuse est celle du niveau énergétique le plus bas donc le plus stable.

## Exemple concret

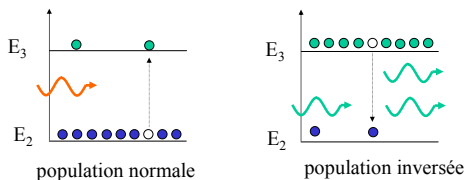
- Pour un écart entre  $N_1$  et  $N_2$  de 0,5 eV (environ le tiers de la largeur du spectre visible), à la température ambiante ( $27^\circ \text{C} = 300^\circ \text{K}$ )

Niveau  $N_1$  (le + bas) =  $10^9$  (un milliard)

Niveau  $N_2$  (le + haut) = 4

## Inversion de population

- Dans une population normale, un photon qui interagit disparaît par **absorption**
- Dans une population « inversée », un photon d'énergie adaptée provoque une **émission stimulée**



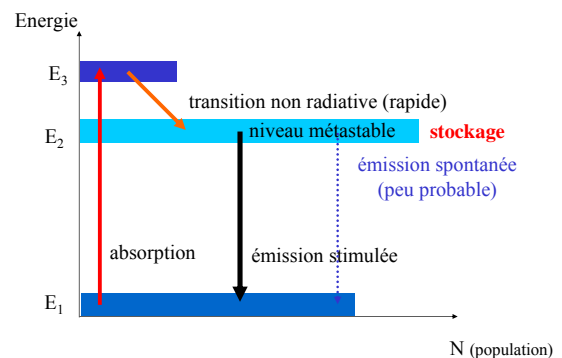
## Remarques

- L'émission spontanée est indépendante des rapports de population.
- L'émission stimulée est donc en compétition avec l'émission spontanée qui dépeuple le niveau le plus élevé.
- Quelques éléments possèdent des états « métastables » pour lesquels l'émission spontanée est peu fréquente.
- L'effet laser (**émission stimulée prédominante**) se produira si on peut « stocker » des atomes dans un état métastable non accessible directement par absorption.

## Les procédés d'inversion

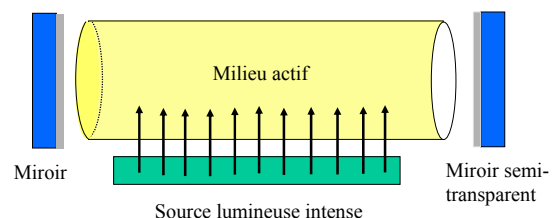
- Tri par gradient de champ électrique (maser)
- Tri par gradient de champ magnétique (maser)
- Pompage par collisions
- Pompage par décharges électriques
- Pompage par photodissociation
- Pompage par réaction chimique
- **Pompage optique**
- Passage de courant dans une diode
- ...

## Modèle à 3 niveaux



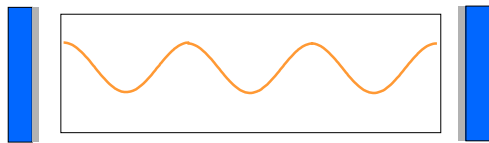
Comment cela fonctionne-t-il ?

## Le pompage optique



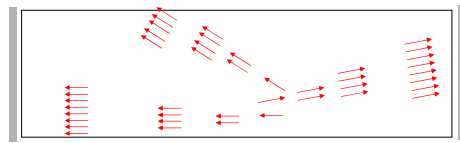
- Les photons issus de la source lumineuse sont absorbés par le milieu actif et peuplent son niveau d'énergie supérieur.

## La cavité optique



- Idéalement la cavité optique doit avoir une longueur multiple de la longueur d'onde ([principe des ondes stationnaires](#))
- Quelques photons sont émis spontanément et amorcent le processus.

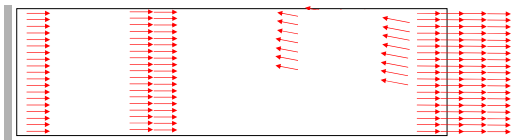
## L'amplification lumineuse



- Chaque photon « stimule » l'émission de nouveaux photons, tous en phase.
- En plusieurs allers-retours entre les deux miroirs, une sélection de direction s'opère.

[Seuls les photons alignés selon l'axe vont rester dans la cavité.](#)

## L'amplification lumineuse



- Chaque photon « stimule » l'émission de nouveaux photons, tous en phase.
- En plusieurs allers-retours entre les deux miroirs, une sélection de direction s'opère.

[Quand le signal est suffisamment intense, le miroir de sortie laisse passer le faisceau.](#)

## La durée d'impulsion

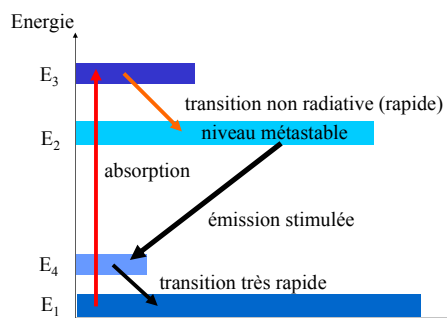
- Typiquement l'émission de lumière cesse quand le niveau intermédiaire est dépeuplé.
- Selon les modèles, la durée de l'impulsion peut varier de  $10^{-3}$  à  $10^{-15}$  s

<b>milli</b> $10^{-3}$	<b>pico</b> $10^{-12}$
<b>micro</b> $10^{-6}$	<b>femto</b> $10^{-15}$
<b>nano</b> $10^{-9}$	<b>atto</b> $10^{-18}$

- Pour une même énergie délivrée, plus l'impulsion est brève, plus la puissance est considérable : intérêt des lasers femtoseconde.

L'énergie totale reçue peut rester faible même pour des lasers de puissance :  $W(\text{mJ}) = \int P(\text{GW}) dt(\text{ps})$ .

## Modèle à 4 niveaux



## L'effet laser

- Laser à impulsion : à 3 niveaux
- Laser continu : à 4 niveaux
- La divergence du faisceau et le coefficient d'amplification dépendent du nombre d'allers-retour dans la cavité optique avant l'ouverture du miroir de sortie
- Plusieurs types géométriques de cavité optique sont proposés pour améliorer les performances.

## Les lasers à gaz

- Gaz atomique :
  - Laser Helium-Neon (He-Ne)  $\lambda = 632 \text{ nm}$  rouge
  - Laser à vapeur métallique (Cuivre, Or).
  - Laser Helium Cadmium (He-Cd)  $\lambda = 440 \text{ nm}$  violet et UV
- Gaz ionisé :
  - Laser Argon Ion ( $\text{Ar}^+$ )  $\lambda = 500 \text{ nm}$  bleu - vert
  - Laser Krypton ( $\text{Kr}^+$ )  $\lambda = 650 - 570 \text{ nm}$  rouge - jaune
- Gaz moléculaire :
  - Laser Gaz Carbonique ( $\text{CO}_2$ )  $\lambda = 10600 \text{ nm}$  infrarouge
  - Laser Azote ( $\text{N}_2$ ).
  - Laser à excimères (Excited Dimer) Ar-F ou Kr-F UV

## Les autres lasers

- Les lasers solides
  - Laser Rubis, rayonnement rouge  $\lambda = 694 \text{ nm}$ , pompage par flash de xénon
  - Laser YAG Néodyme et Verre Nd infrarouge  $\lambda = 1064$  et  $1320 \text{ nm}$ , pompage par lampe
  - Laser Alexandrite
  - Laser Rubis Titane
- Les lasers à colorants liquides
- Les lasers à électrons libres (plasma)
- Les diodes lasers et lasers à semi-conducteurs

## Les effets biologiques

Dépendent de :

- la longueur d'onde  $\lambda$
- la durée d'exposition  $t$
- l'énergie délivrée  $E$
- la nature du tissu exposé
- l'absorption du rayonnement (eau et chromophores)

## Les effets photochimiques

- Pour très courtes longueurs d'onde : destruction de certains acides aminés, du cytochrome C
- Observable seulement pour de faibles puissances appliquées pendant un temps assez long.

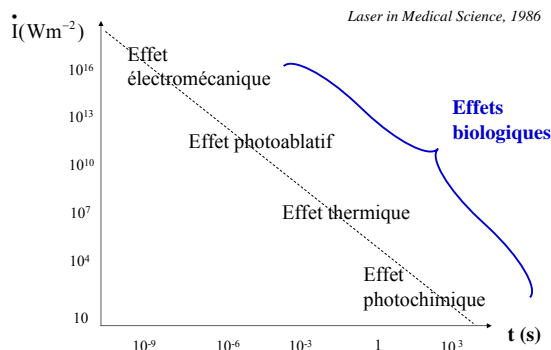
## Les effets thermiques

- Photons  $\rightarrow$  chaleur (agitation).  
Pour  $\lambda$  plus grand ( $h\nu$  plus faible), le volume d'interaction est plus réduit
- Echauffement progressif :
  - $45^\circ\text{C}$  : hyperthermie tissulaire
  - $50^\circ\text{C}$  : dénaturation protéique
  - $60^\circ\text{C}$  : coagulation (hémostase) : Argon et YAG
  - $80^\circ\text{C}$  : dessiccation
  - $100^\circ\text{C}$  : volatilisation

## Les effets mécaniques

- D'autant plus nets que la puissance est forte (appliquée pendant un temps très bref ns voire ps).
- Onde de choc de rupture par claquage optique et gaz ionisé.
- Rompt mais ne brûle pas ( $\Delta\theta \leq 2 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Utilisable dans les milieux transparents (membranes, brides du vitré ...).
- S'observe en particulier avec le laser YAG

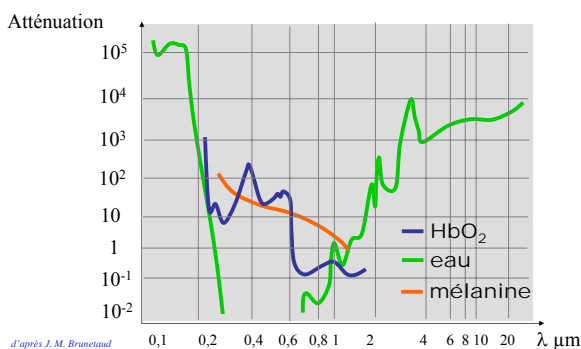
## Les effets sur les tissus



## Les chromophores

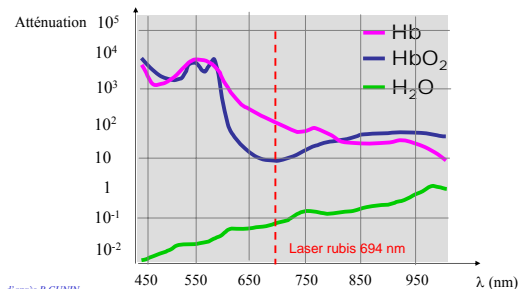
- En fonction de son coefficient d'atténuation, une substance absorbe plus ou moins de photons lumineux.
- Le choix de la longueur d'onde du laser dépend donc de la substance à atteindre et de celles des autres composants à éviter.
- Dans l'organisme, les plus importants sont l'eau, la mélanine et l'hémoglobine.

## Courbes d'atténuation



## Courbes de l'hémoglobine

Les courbes d'atténuation varient aussi selon le degré d'oxygénation de la molécule



## Applications médicales

- Dermatologie et cosmétique
- Odontologie
- Ophtalmologie
- Chirurgie
  - Gastro-entérologie et endoscopie
  - Neurochirurgie
  - Cardiologie

## Ophtalmologie

- $\lambda$  entre 400 et 900 nm : pas d'absorption dans les milieux transparents, en particulier ceux de l'œil, importante absorption par la mélanine et Hb → chirurgie rétinienne si pas hémorragie du vitré ou opacités cristalliniennes
- Kératoplastie et chirurgie de la myopie
- Traitement des décollements de rétine
- On peut associer deux types de laser :
  - Laser He-Ne (rouge) qui sert pour la visée
  - Laser YAG-Nd (infrarouge) qui détruit les tissus

## Chirurgie

- *Hémostase* : Argon ou YAG
- *Destruction tissulaire* : CO<sub>2</sub> (vaporisation).
- *Découpe chirurgicale* : CO<sub>2</sub>
- *Destruction par augmentation thermique diffuse* : YAG.
- *Effets mécaniques* : YAG

## Conclusion

Les applications médicales des lasers découlent de la cohérence de la lumière et de la densité de puissance.

Ne pas négliger leurs dangers (surtout si non visible) :

- Protection de la vue (porter des lunettes, se méfier de toute surface réfléchissante)
- Effets thermiques (brûlures cutanées, atteinte cornée)
- Ionisation par addition des énergies photoniques

Site (*en anglais*) : Rami Arieli: "The Laser Adventure"

<http://www.phys.ksu.edu/perg/vqm/laserweb/Preface/Toc.htm>