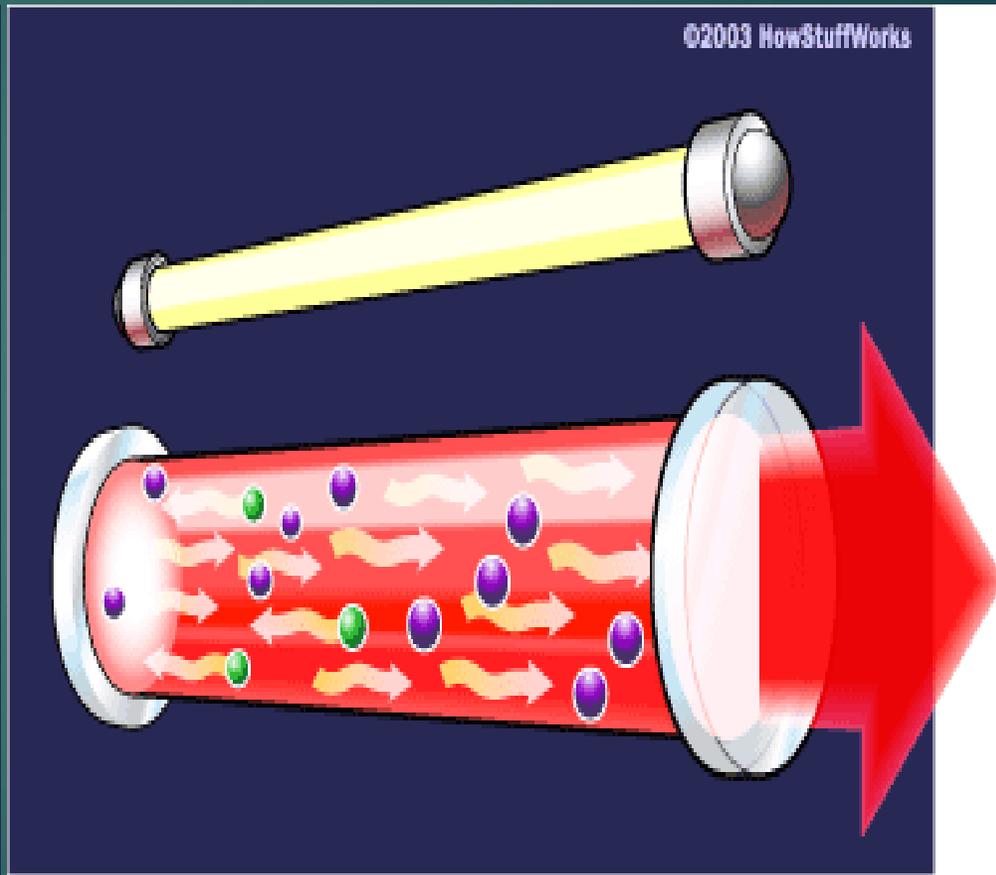
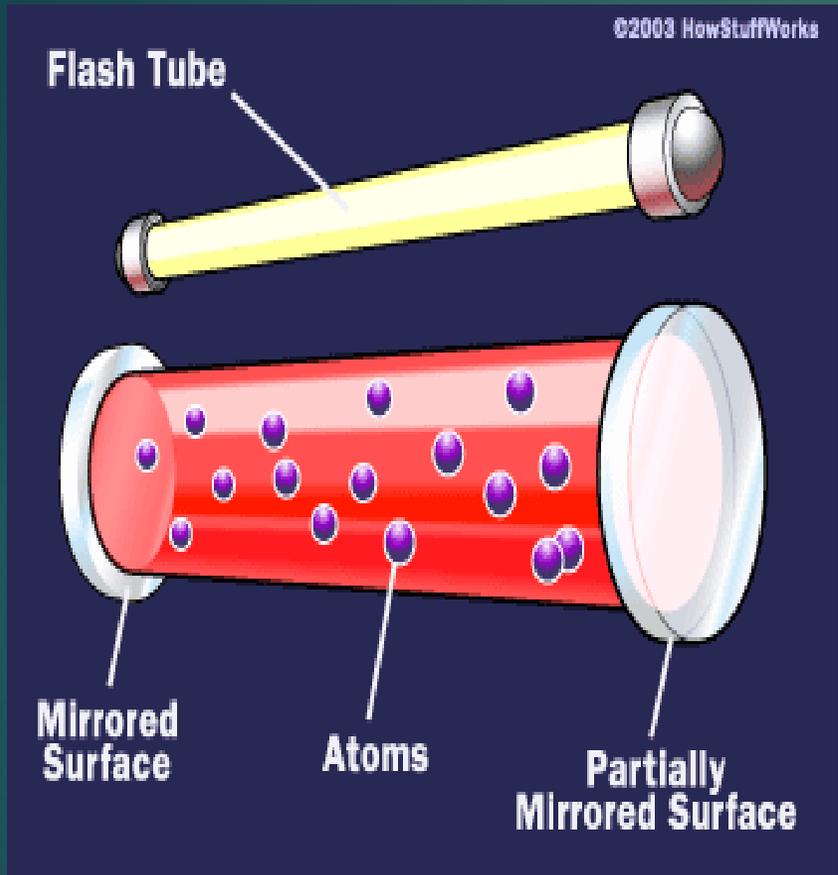


Chapitre 4 : Les rayonnements visibles et infrarouges (laser et ses applications)





Différents types de laser :

▶ On classe les lasers selon six familles, en fonction de la nature du milieu excité:

▶ **Cristallins (à solide ou ioniques) :**

Ces lasers utilisent des milieux solides, tels que des cristaux ou des verres comme milieu d'émission des photons.

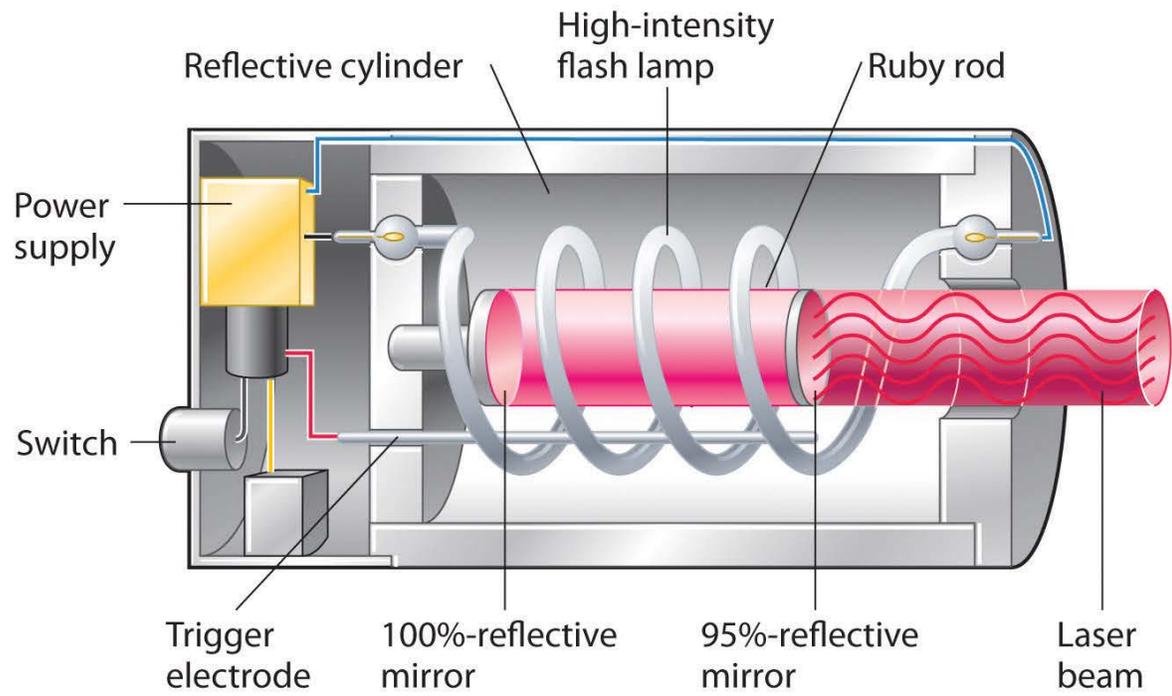
Le cristal ou le verre sont dopés par des ions qui créent le milieu laser

Le plus ancien est le **laser à rubis** dont l'émission provient de l'ion Cr^{3+} .

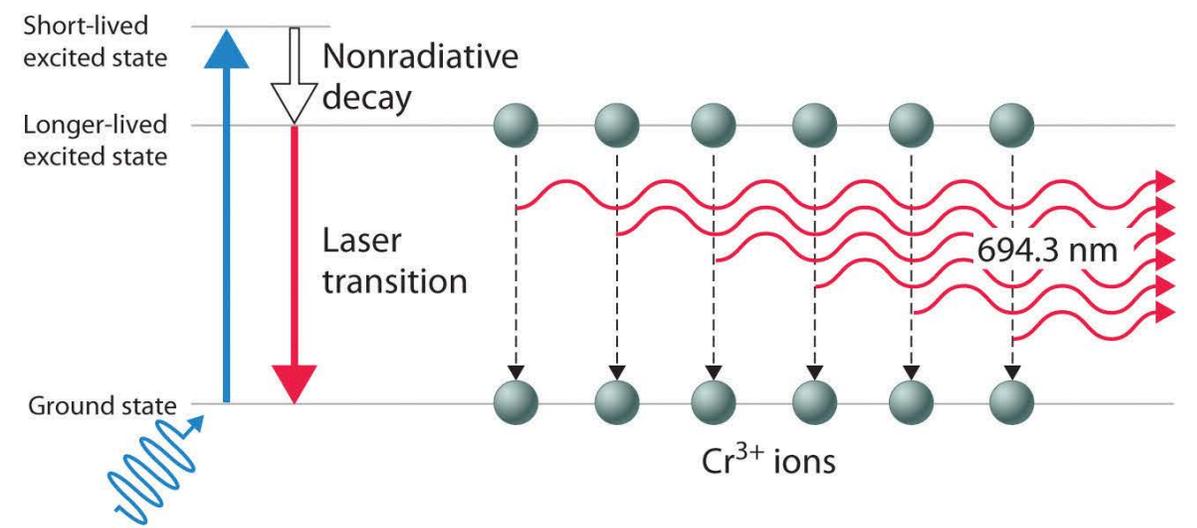
- ▶ D'autres ions sont très utilisés (la plupart des terres rares : Nd, Yb, Er, Tm..., ou bien le titane et le chrome, entre autres)
- ▶ La longueur d'onde d'émission du laser dépend essentiellement de l'ion dopant, mais la matrice influe aussi.
- ▶ Ainsi, **le verre dopé au néodyme** n'émet pas à la même longueur d'onde (**1053 nm**) que le **YAG** (**grenat d'aluminium et d'yttrium**), dopé au néodyme (**1064nm**).

Ils fonctionnent en continu ou de manière impulsionnelle

- ▶ **Ils sont capables d'émettre aussi bien dans le visible, le proche infrarouge que l'ultraviolet**
- ▶ Le milieu amplificateur peut être un barreau dans le cas d'un laser Nd-YAG (donc dopé au Nd et la matrice est du YAG).
- ▶ mais il peut aussi se présenter sous la forme d'une fibre dans le cas des lasers à fibre (donc dopé au Yb et la matrice est en silice).



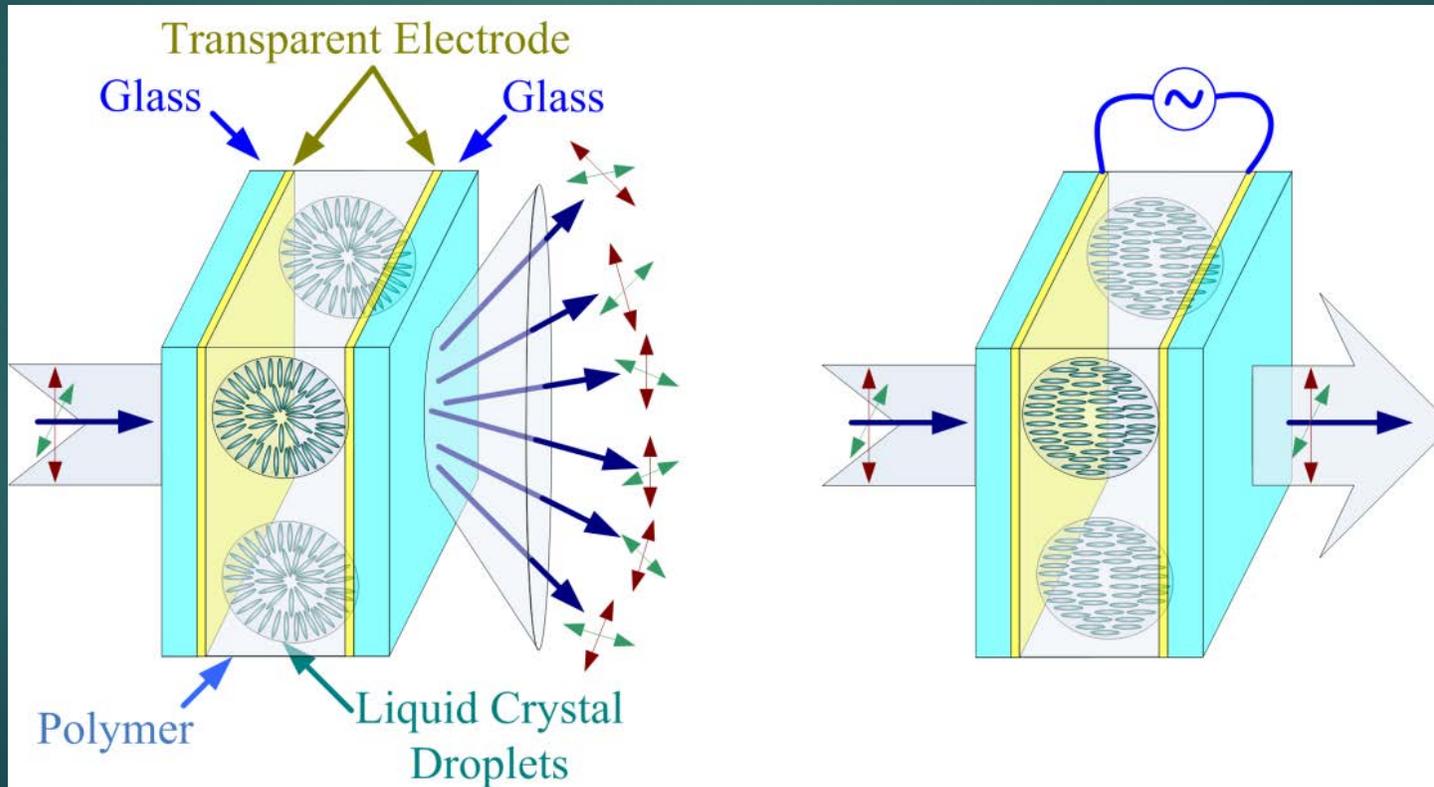
(a)



(b)

Les lasers à colorants (moléculaires) liquides :

- ▶ Dans les lasers à liquide, le milieu d'émission est un colorant organique (rhodamine 6G par exemple) en solution liquide enfermé dans une fiole de verre.



- ▶ Le rayonnement émis peut aussi bien être continu que discontinu suivant le mode de pompage.
- ▶ Les fréquences émises peuvent être réglées à l'aide d'un prisme régulateur, ce qui rend ce type d'appareil très précis.
- ▶ Le choix du colorant détermine essentiellement la couleur du rayon qu'il émettra.

Les lasers à gaz (atomiques ou moléculaires) :

- ▶ Le milieu générateur de photons est ici un gaz contenu dans un tube en verre ou en quartz.
- ▶ Le faisceau émis est particulièrement étroit et la fréquence d'émission est très pure.
- ▶ Il existe aussi une sous-famille des lasers à gaz: **les lasers « excimer »**
- ▶ Ils émettent dans l'ultra-violet.
- ▶ Dans la majorité des cas, ils sont composés d'au moins un gaz halogène et aussi parfois d'un gaz rare.

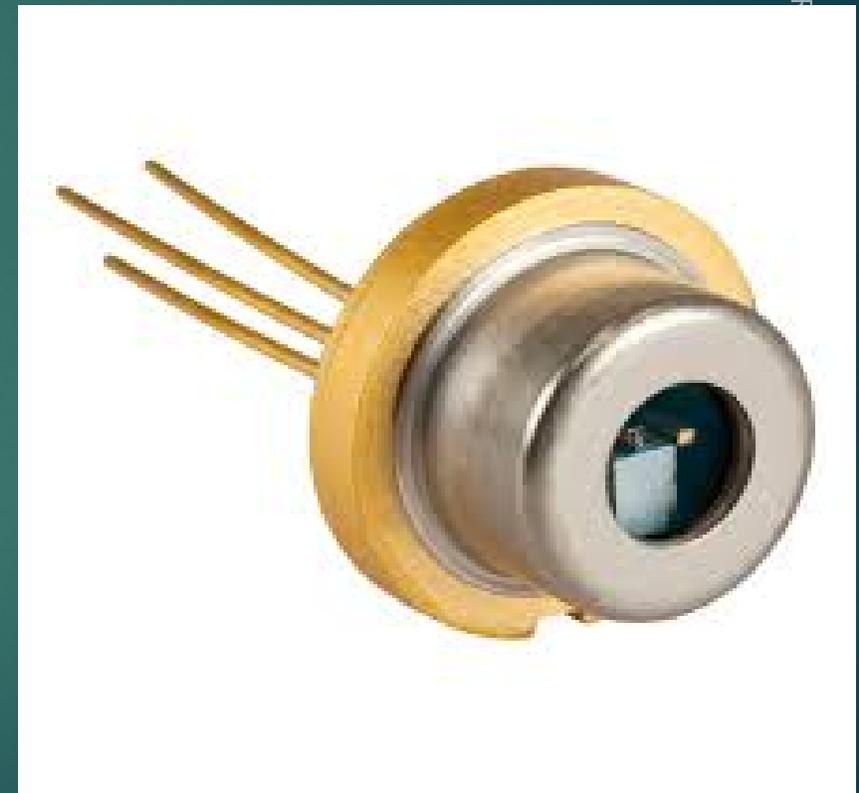
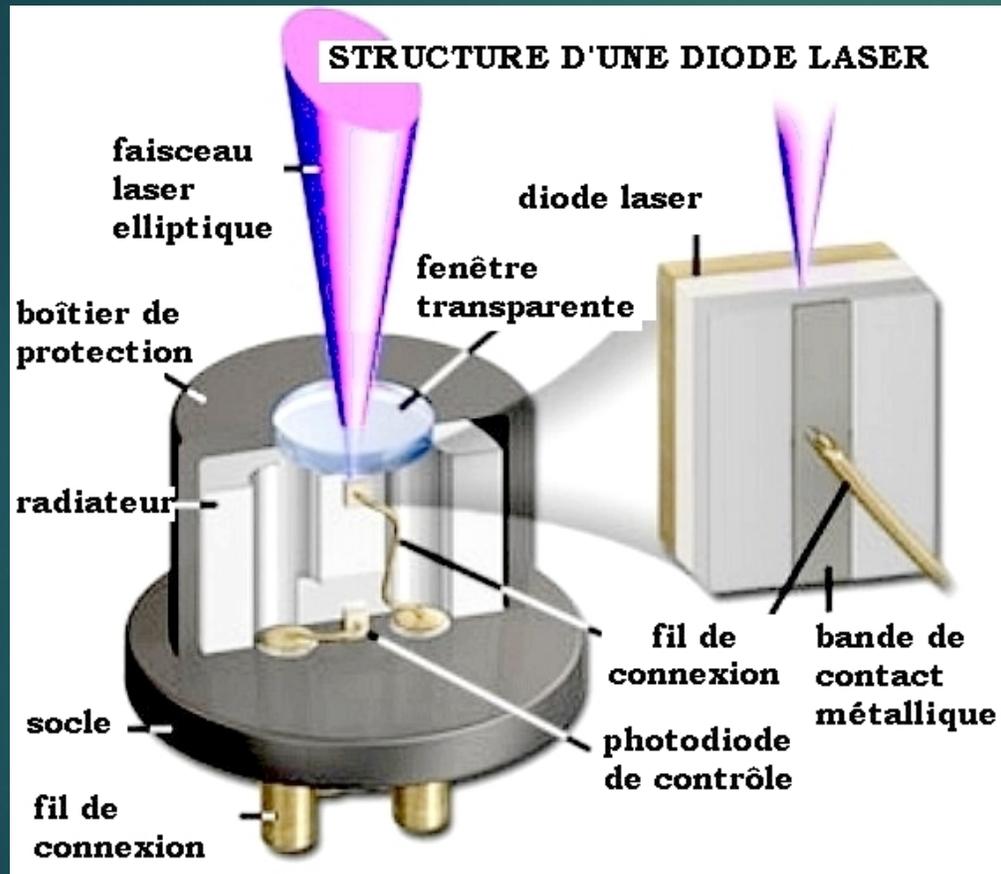
- ▶ Le terme "excimer" vient du mot anglais "dimer" qui signifie que les molécules sont composées de deux atomes identiques (ex: F_2).
- ▶ Or les lasers « excimer » utilisent des molécules composées de deux atomes différents (gaz rare et halogène ex: ArF) qui ne restent ensemble qu'à l'état excité.

- ▶ L'excitation électrique du mélange d'halogène et de gaz rare produit ces molécules excimers.
- ▶ Après émission du photon l'excimer disparaît car ses atomes se séparent.
- ▶ Le photon ne peut être réabsorbé par l'excimer ce qui permet un bon rendement au laser.

Laser A semi-conducteurs (ioniques) - diodes laser

- ▶ Ces lasers sont principalement constitués d'une diode à semi-conducteur afin de produire un faisceau lumineux.
- ▶ Le pompage se fait à l'aide d'un courant électrique qui enrichit le milieu générateur en trous d'un côté et en électrons de l'autre.
- ▶ La lumière est produite au niveau de la jonction par la recombinaison des trous et des électrons.
- ▶ Ce type de laser ne présente pas de miroirs de cavité : le simple fait de cliver le semi-conducteur, de fort indice optique, permet d'obtenir un coefficient de réflexion suffisant pour déclencher l'effet laser.

Laser à semi-conducteur



- ▶ C'est ce type de laser qui représente l'immense majorité (en nombre et en chiffre d'affaire) des lasers utilisés dans l'industrie.
- ▶ En effet, ses avantages sont nombreux : tout d'abord, il permet un couplage direct entre l'énergie électrique et la lumière, d'où les applications en télécommunications (à l'entrée des réseaux de fibres optiques).
- ▶ De plus, cette conversion d'énergie se fait avec un bon rendement (de l'ordre de 30 à 40 %).
- ▶ Ces lasers sont peu coûteux, très compacts (la zone active est micrométrique, voire moins, et l'ensemble du dispositif a une taille de l'ordre du millimètre).

HOT

808nm Diode Laser



multi spot size



ISO 13485 TÜVRheinland® CE FDA RoHS

Pr. M.REMAM-UMC

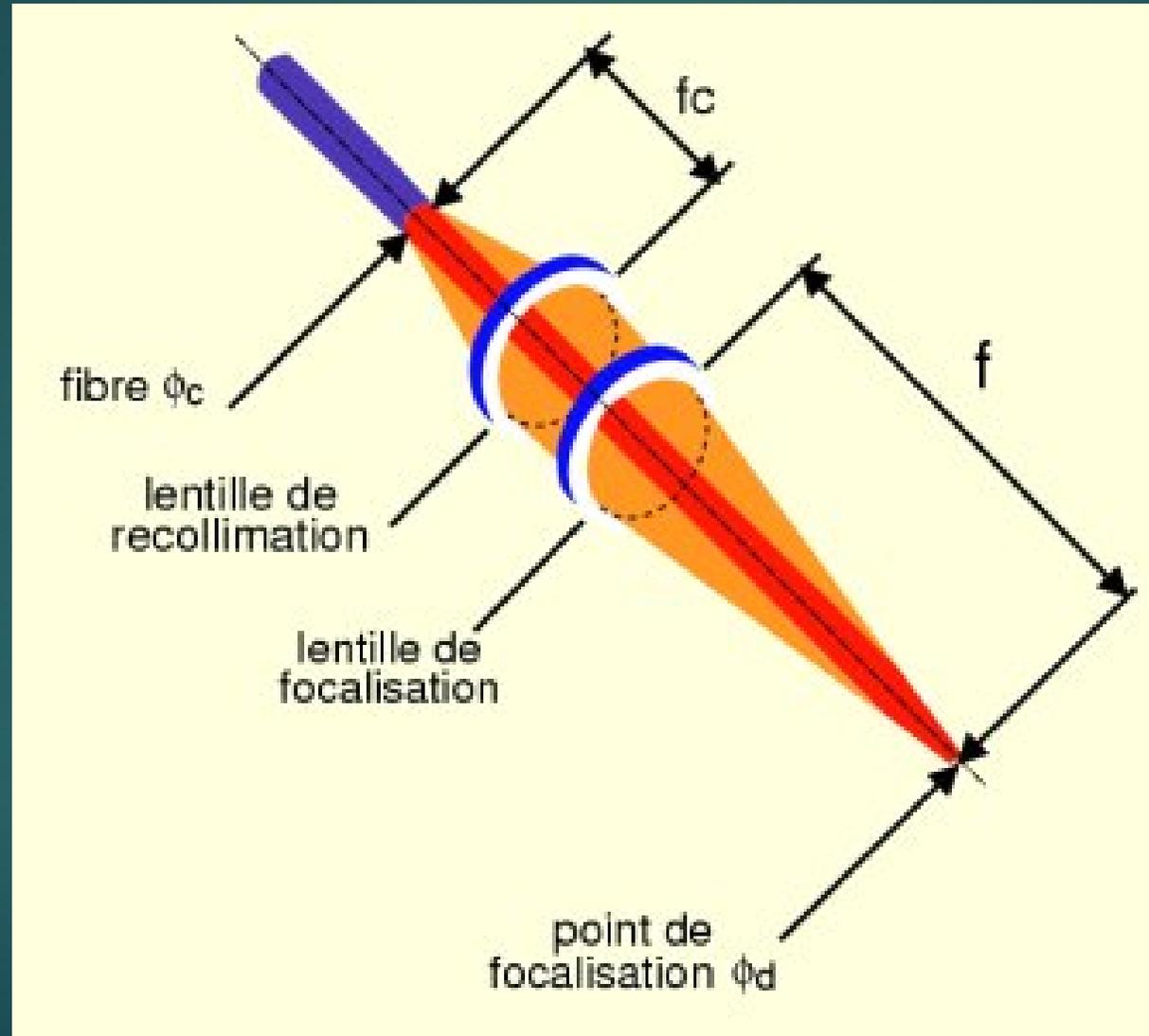
- ▶ La diode laser fonctionne à une longueur d'onde de 755nm, 810nm et 1064nm, 3 longueurs d'onde différentes sortent en même temps pour travailler dans les différentes profondeurs du tissu biologique (derme)
- ▶ On sait maintenant fabriquer de tels lasers pour obtenir de la lumière sur quasiment tout le domaine visible,
- ▶ mais les lasers délivrant du rouge ou du proche infrarouge restent les plus utilisés et les moins coûteux.

Les lasers à fibre

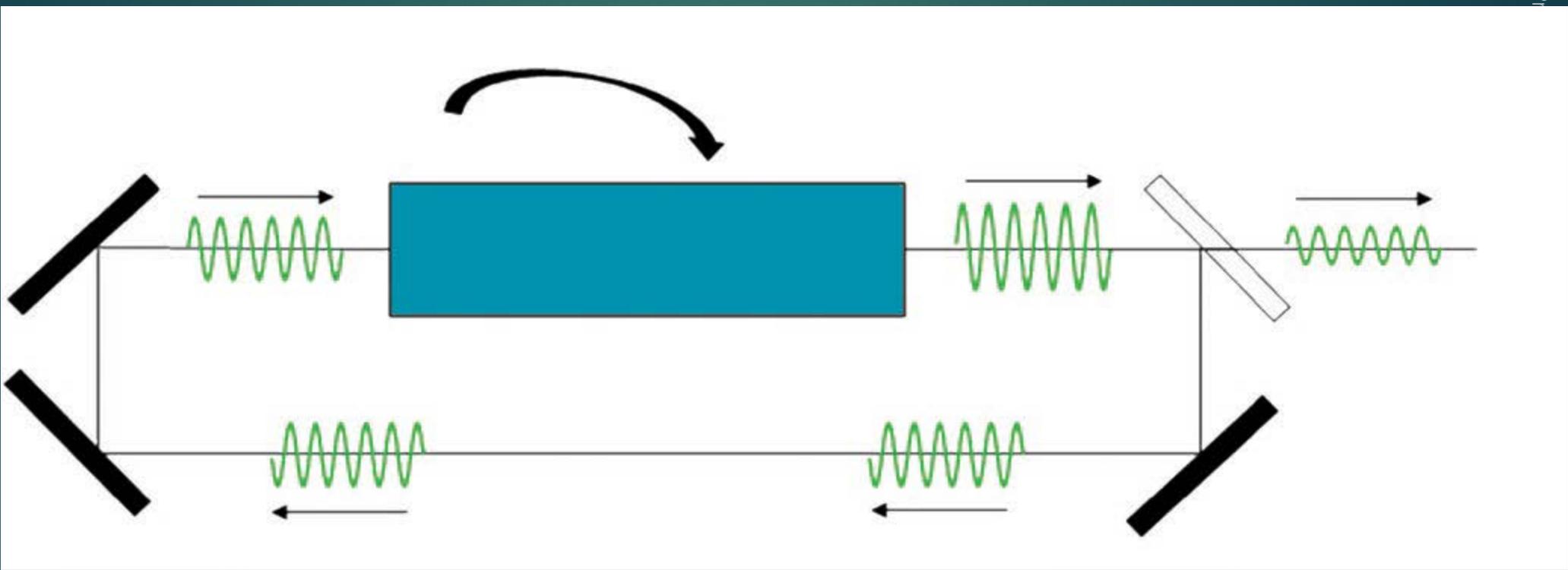
- ▶ Le laser à fibre est le dernier né de la technologie laser.
- ▶ Sa conception est assez révolutionnaire, car le milieu actif est une fibre optique dopée avec un ion de terre rare qui est principalement l'ytterbium.
- ▶ Ce laser possède sensiblement les mêmes longueurs d'onde que le laser YAG.

- ▶ Cependant, il est plus compact, plus stable et n'a pas besoin de mode de refroidissement.
- ▶ Il a également une meilleure qualité de faisceau, le diamètre de ce dernier étant plus faible, il a donc une meilleure résolution pour des applications de marquage

Laser à fibre



Crystalline media	Wavelength	Pulse or CW	Application
Ruby	694 nm	Pulsed	Dermatology, tattoo removal
Nd:YAG	1064 nm	Pulsed or CW	Wide applications
Ho:YAG	2130 nm	Pulsed	Surgery, root canal, kidney stone
Er:YAG	2940 nm	Pulsed	Surgery, dental drill
KTP/532	532 nm	Pulsed or CW	Dermatology
Alexandrite	720-800 nm	Pulsed	Bone cutting
Diode lasers			
GaAs	904 nm	Pulsed	LLLT
GaAlAs	780-820-870 nm	CW	LLLT, surgery
InGaAlP	630-685 nm	CW	LLLT, PDT
Gas lasers			
HeNe	633 nm	CW	LLLT, PDT
Argon	350-514 nm	CW	Surgery, PDT, ophthalmology, dermatology
CO2	10 600 nm	Pulsed or CW	Surgery
ArF Excimer	193 nm	Pulsed	Corneal surgery
XeCl Excimer	308 nm	Pulsed	Dermatology
Nitrogen	337 nm	Pulsed	Dermatology
Copper vapor	578 nm	Pulsed or CW	Dermatology
Gold Vapor	628 nm	Pulsed	PDT
Liquid lasers			
Argon-pumped dye	630-690 nm	CW	PDT
KTP pumped dye	630-635 nm	CW	PDT
Flash lamp pumped dye	580-600 nm	Pulsed	Dermatology



▶ Théorie des lasers

Théorie des lasers

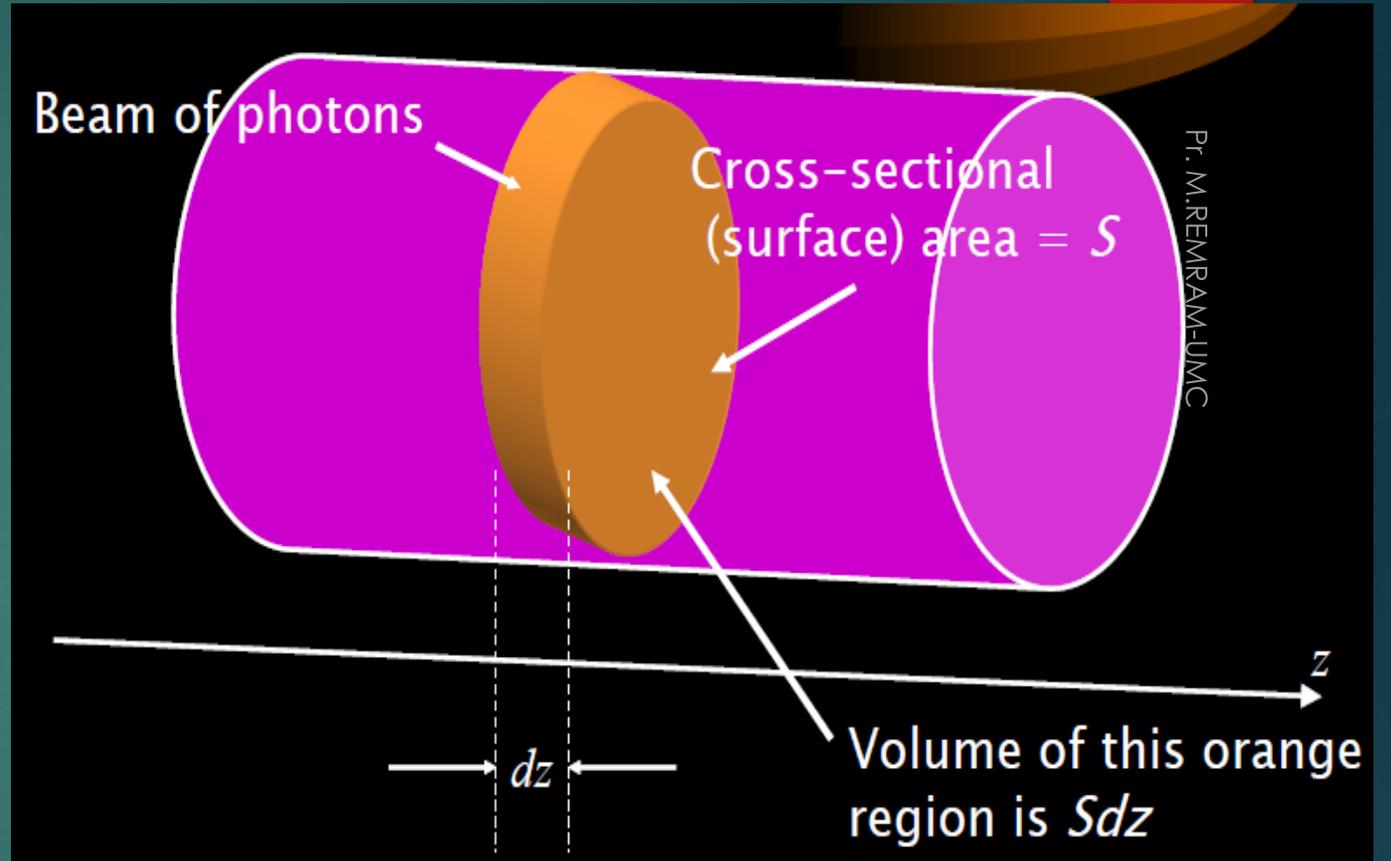
- N_i définit la population des électrons du niveau i .
- $N_i(t)$ = nombre d'électrons, par unité de volume, qui occupent le niveau d'énergie i au temps t .

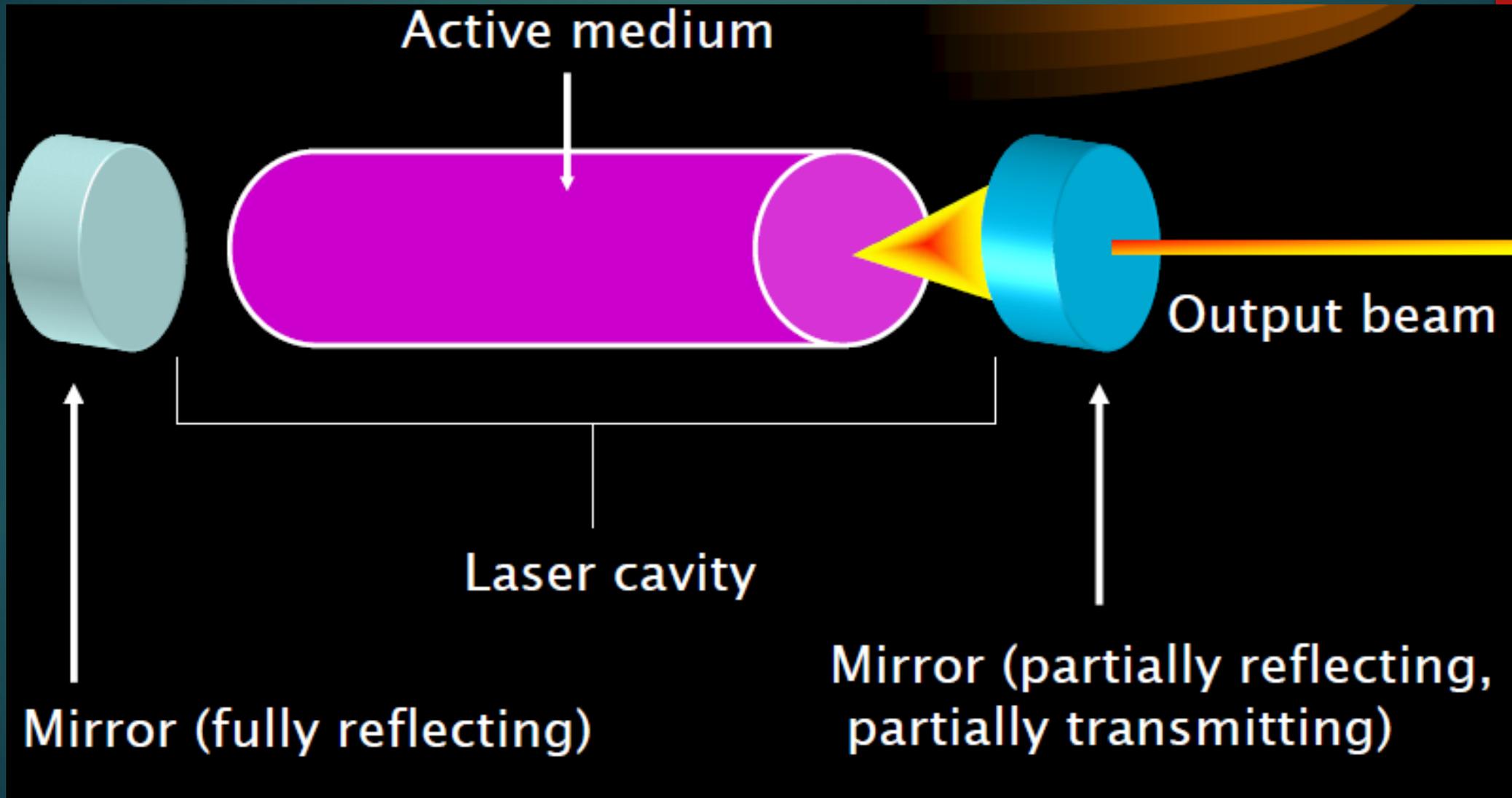
W_{ij} la probabilité de transition du niveau i au niveau j .

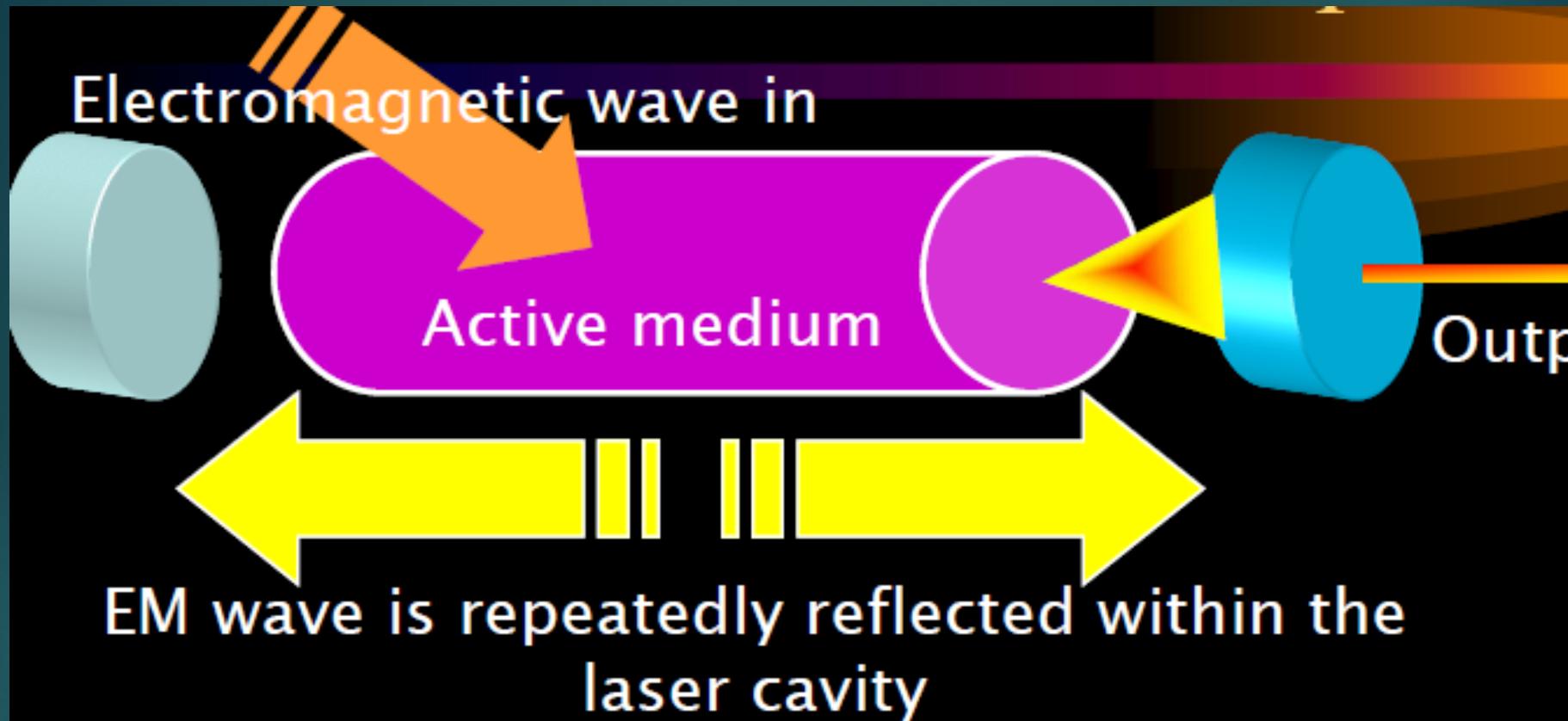
σ_{ij} section efficace.

Φ Flux de photons

$$Sd\Phi = \left(\left| \frac{dN_2}{dt} \right|_{\text{stim. emiss.}} - \left| \frac{dN_2}{dt} \right|_{\text{stim. absorp.}} \right) Sdz$$

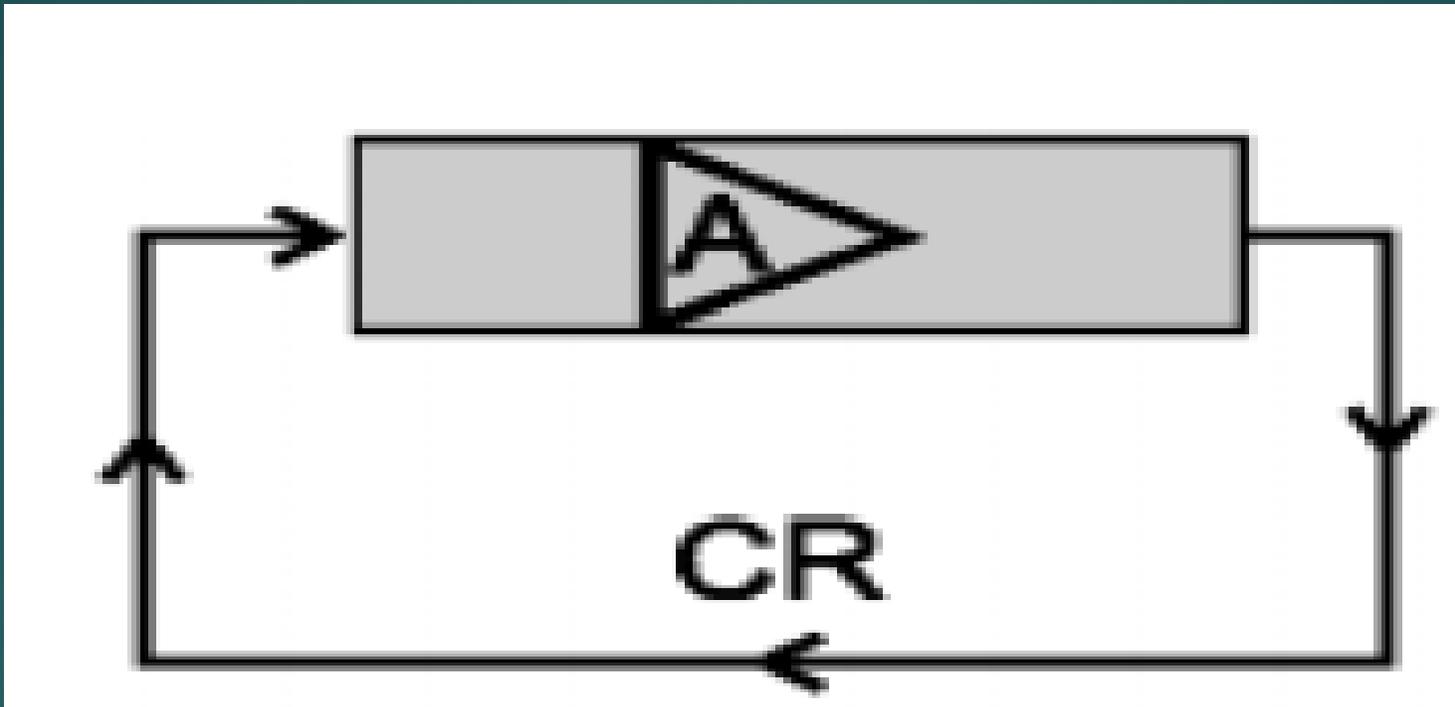






If the frequency (f) of the output beam is . . .
microwave region (1 GHz – 30 THz) . . . MASER
optical region (430 THz – 750 THz) . . . LASER

Le laser



- ▶ Un laser est une source de lumière cohérente, c'est à dire une onde électromagnétique sinusoïdale dans le temps.
- ▶ Un laser peut donc être vu comme un oscillateur.
- ▶ Tout oscillateur peut être présenté selon la sémantique propre à l'automatique comme un circuit bouclé composé d'un amplificateur et d'un filtre sélectif (figure précédente).

- ▶ Les conditions d'oscillation, c'est à dire les conditions d'émission du laser, sont de deux natures:
- ▶ la condition de gain nécessite que le gain total de la boucle soit supérieur ou égal à 1.
- ▶ la condition de phase qui met en jeu la propagation des photons émis à travers la cavité, implique que seules certaines fréquences (longueurs d'ondes) pourront être émises.

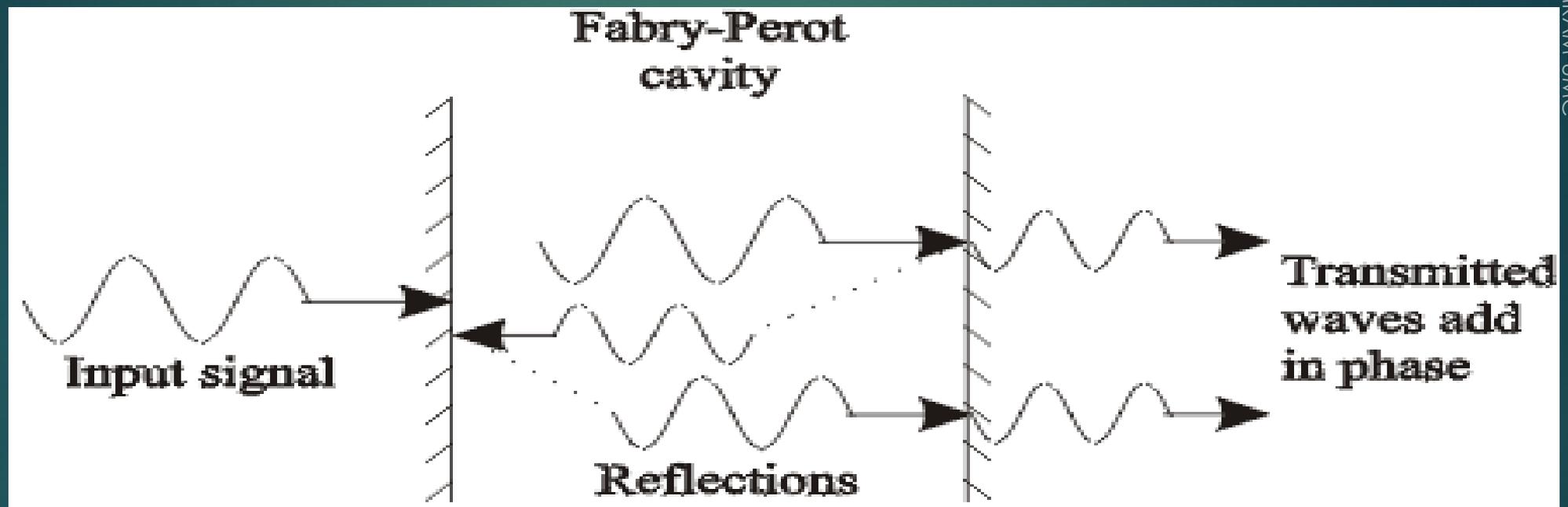
Le résonateur Pérot-Fabry

Ce type de résonateur est constitué, dans le cas le plus simple, par deux miroirs plans, parallèles et réfléchissants entre lesquels les ondes lumineuses font de multiples allers-retours.

Dans le cas d'un semi-conducteur, les parois clivées du cristal sont utilisées pour constituer la cavité.

Une forte valeur de l'indice (de l'ordre de 3,5) du semi-conducteur permet d'obtenir, avec les faces clivées en contact avec l'air, un coefficient de réflexion suffisant pour provoquer ces allers-retours de l'onde dans la cavité.

C'est ce que nous avons appelé la boucle de contre réaction.



- ▶ Ainsi, en imposant un coefficient de réflexion élevé (environ 30%), l'amplification dans le résonateur est d'autant plus accrue et peut compenser les pertes dues à l'absorption

Le seuil de l'effet laser

- ▶ Le seuil de l'effet laser est obtenu lorsque le gain maximal est assez élevé pour compenser toutes les pertes que l'onde rencontre au cours de ses allers-retours entre les deux miroirs du résonateur (pertes provoquées par le milieu diffusant, par le phénomène d'absorption et par la transmission du signal vers l'extérieur).
- ▶ Lorsque le courant augmente au-dessus du seuil, l'émission stimulée apparaît : tous les porteurs injectés en supplément se recombinent par recombinaison stimulée.
- ▶ Cela se traduit par une certaine directivité du rayonnement dans la direction perpendiculaire aux faces de la cavité et par une augmentation brutale de la puissance lumineuse émise par la diode laser.

- ▶ Nous pouvons mesurer ce courant de seuil au niveau du fort coude de la caractéristique puissance-courant du laser présentée sur la figure:

- ▶ Le courant de seuil marque la séparation entre un fonctionnement dominé par l'émission spontanée et un fonctionnement dominé par l'émission stimulée.
- ▶ La puissance émise par le laser se calcule alors de la façon suivante :

+++++

où I = courant injecté au laser ; I_s = courant de seuil du laser ;
et η = rendement du laser

Conditions de fonctionnement

- ▶ Le rapport entre l'énergie de l'onde lumineuse après et avant le passage dans le milieu amplificateur, appelé gain de l'amplification:

+++++

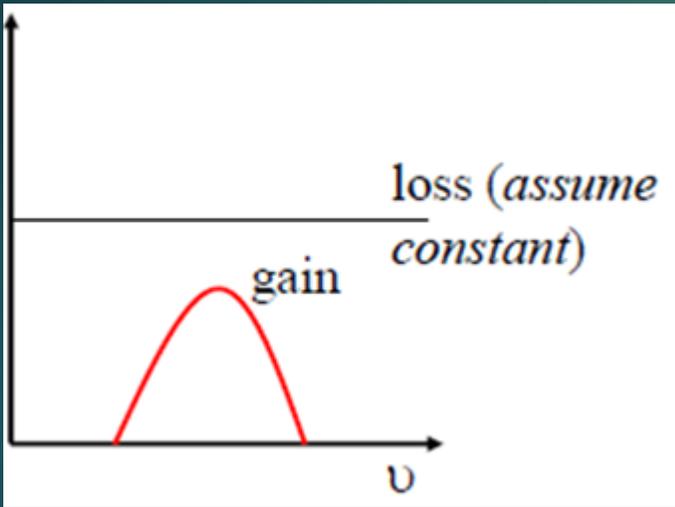
où α est donné par $\alpha = \sigma(\nu) (n_2 - n_1)$.

- ▶ La quantité $\sigma(\nu)$ est la section efficace d'interaction entre les atomes et l'onde ; elle dépend de la fréquence ν .

- ▶ Pour que l'oscillation laser démarre,
- ▶ il faut que, pour chaque passage dans le milieu amplificateur, ce gain soit supérieur aux pertes de la cavité : c'est ce que l'on appelle **la condition d'oscillation**.
- ▶ La principale cause de pertes est la transmission du miroir de sortie. D'autres pertes, que l'on cherche à minimiser, peuvent également exister dans la cavité : absorption, diffusion, réflexion aux interfaces ou diffraction.

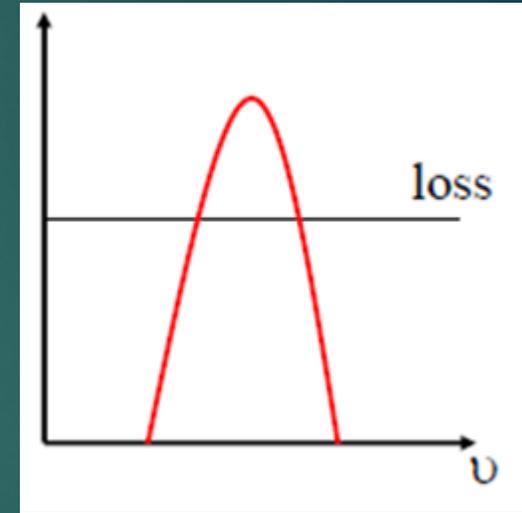
- ▶ Le gain global sur un tour complet dans la cavité est le produit du gain G et du coefficient de réflexion R de ce miroir.
- ▶ Pour que l'oscillation démarre, il faut que

$$\text{▶ } G \times R \geq 1$$



$G < R$

$G = R$



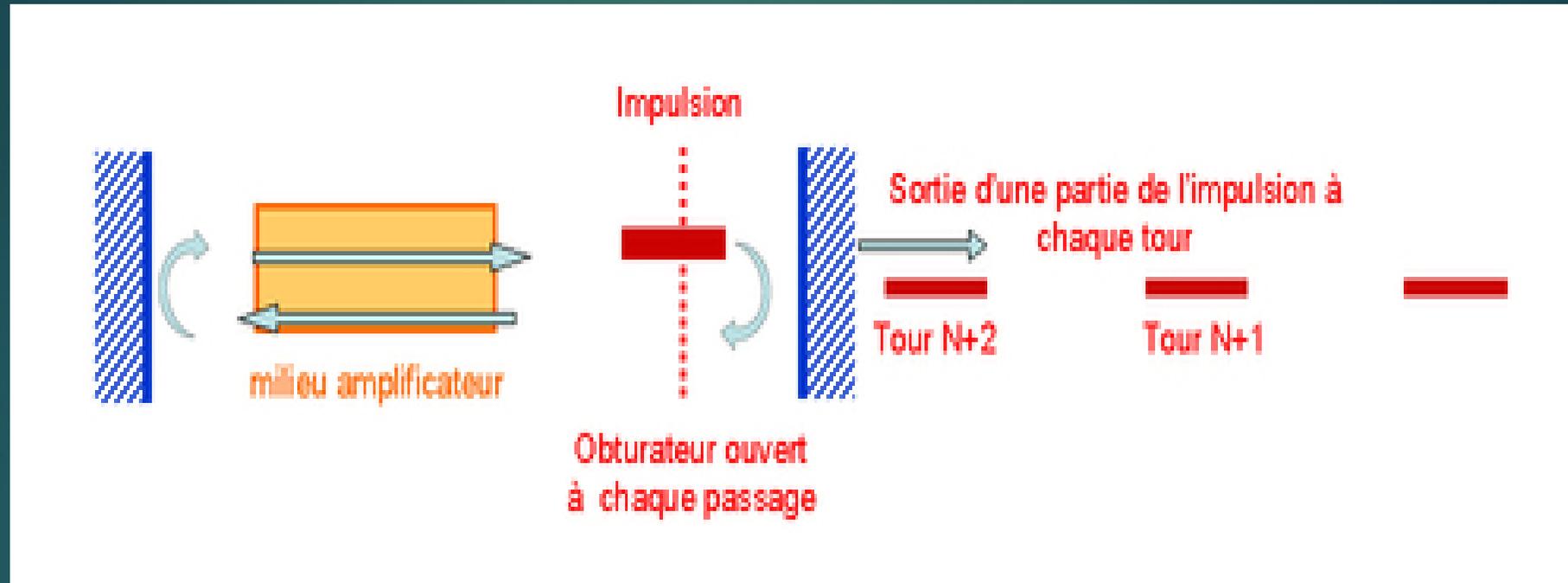
$G > R$

La condition d'oscillation dépend

- ▶ (i) de la longueur d'onde par l'intermédiaire du gain du milieu amplificateur, l'amplification par émission stimulée n'étant possible que dans la gamme de fréquences caractéristique du milieu,
- ▶ (ii) des coefficients de réflexion des miroirs.

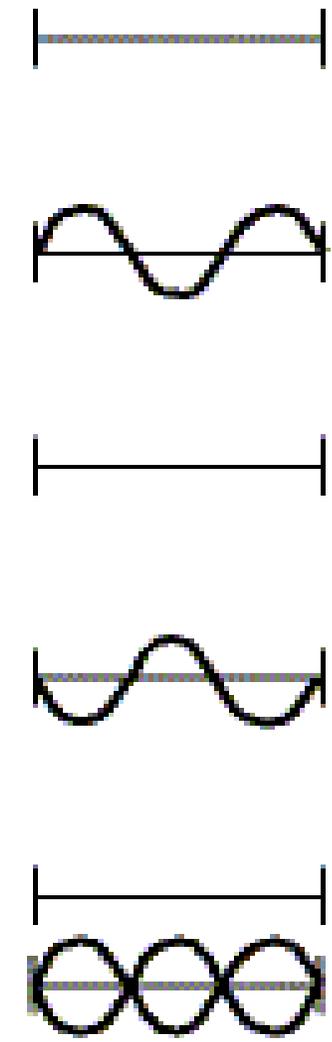
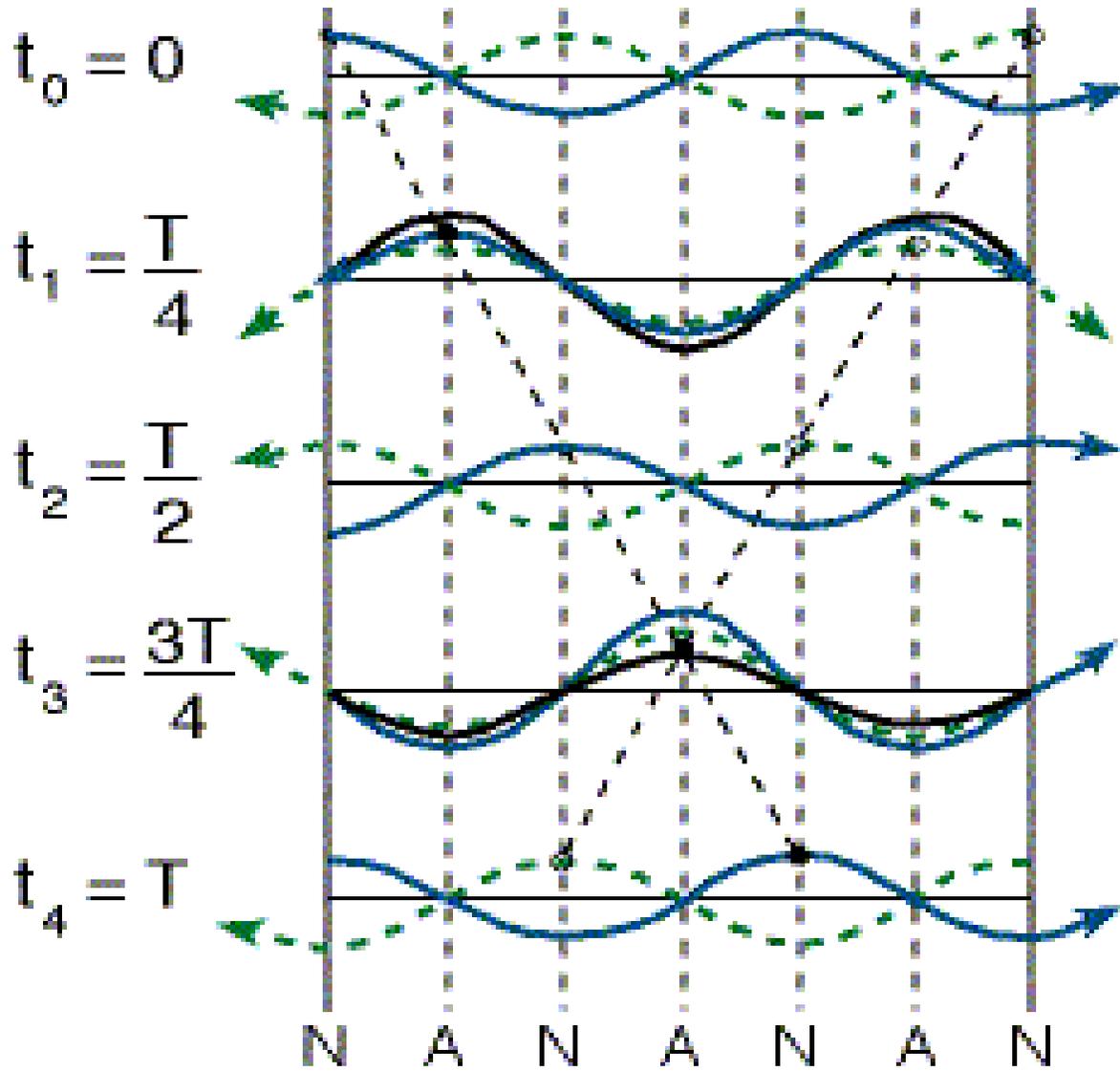
De plus, la cavité optique n'est résonante que pour certaines longueurs d'onde bien particulières, associées aux modes longitudinaux de la cavité

Modes d'un laser



Interference

Superposition



- ▶ La distance entre les nœuds adjacentes représentent la moitié de la longueur d'onde de chacune des ondes interférentes

Le trajet optique d'un miroir à l'autre et inversement doit être une multiplication entière de la longueur d'onde

- ▶ L'onde doit commencer avec la même phase au niveau du miroir
- ▶ La longueur entre les miroirs est constante (L), les longueurs d'onde appropriées, qui créent des ondes stationnaires, doivent remplir la condition:

▶ ++++++

- ▶ L = longueur de la cavité optique.
- ▶ m = Numéro du mode, qui est égal au nombre de demi-longueurs d'onde dans la cavité optique
- ▶ λ_m = Longueur d'onde du mode m à l'intérieur de la cavité laser.
- ▶ Longueur d'onde dans la matière (λ_m) est égale à:

$$\lambda_m = \lambda_0 / n ,$$

- ▶ λ_0 = vide.
- ▶ n = Indice de réfraction du milieu actif.
- ▶ c = Vitesse de la lumière dans le vide.

Or

▶ $c = \lambda_0 n = n \lambda_m v_m$

La fréquence du mode longitudinal est:

▶ ++++++

▶ Remplaçant λ_m par sa valeur

▶ ++++++

- ▶ Le premier mode d'oscillation :

Ce mode est appelé mode longitudinal de base, et il a la fréquence de base de la cavité optique.

- ▶ **Fréquence des modes longitudinaux:**

L'oscillation laser peut se produire uniquement aux fréquences pour lesquels le coefficient de gain du petit signal dépasse le coefficient de perte. Seulement un fini nombre de fréquences d'oscillation ($\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_m$) sont possibles

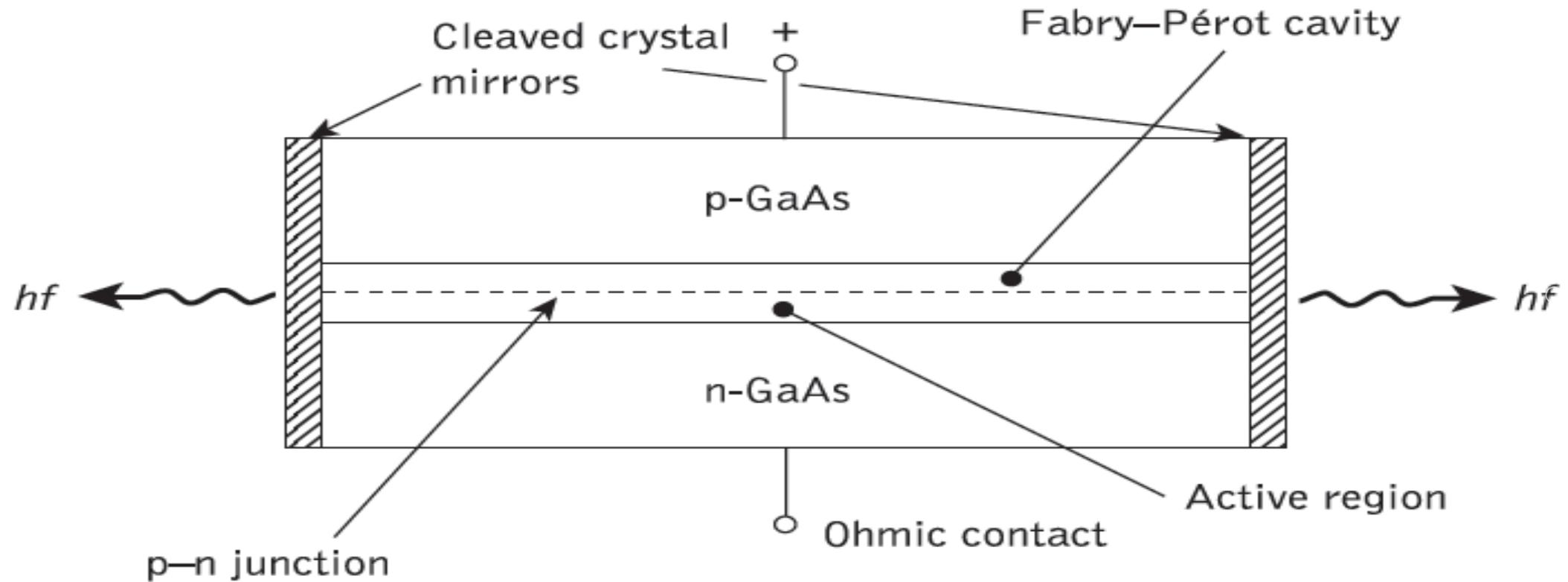


Schéma de principe d'un laser à injection GaAs homojonction avec une cavité Fabry-Pérot

Aspect mathématique

- ▶ Considérons une cavité Fabry Pérot, dont les deux miroirs sont identiques (ayant le même coefficient de réflexion).
- ▶ Au seuil du laser, l'onde lumineuse se retrouve identique à elle même, c'est à dire que son changement d'amplitude est égal à 1, d'où la relation :

(1)

- ▶ R est le coefficient de réflexion de l'onde sur les miroirs de la cavité.
- ▶ L est la longueur de la cavité.
- ▶ β est la constante de propagation de l'onde égale à $2\pi n_r / \lambda$.
- ▶ g est le coefficient de gain (= gain en intensité / unité de longueur)
- ▶ α_i est le coefficient d'absorption des photons à l'intérieur de la cavité.

La séparation des parties réelles et imaginaires de la relation (1), mène aux deux relations (2) et (3) :

(2)

$$g = \alpha_i + \frac{1}{L} \ln \left(\frac{1}{R} \right) = \alpha_i + \alpha_m$$

où α_m désigne les pertes résonantes (pertes par les facettes).

Et

(3)

- λ est la longueur d'onde d'émission laser.
- n_r est l'indice de réfraction réel du matériau.
- m est un entier naturel non nul (modes longitudinaux).

La relation (2), montre qu'au seuil, le gain compense les pertes.

La relation (3), traduit ce qu'on appelle la condition de phase dans un laser :

Les seules longueurs d'ondes susceptibles d'osciller dans la cavité sont celles qui satisfont cette relation.

Comme il a été précisé précédemment, le laser doit remplir simultanément les conditions de gain et de phase afin de pouvoir fonctionner

- λ est la longueur d'onde d'émission laser.
- n_r est l'indice de réfraction réel du matériau.
- m est un entier naturel non nul.

La relation (2), montre qu'au seuil, le gain compense les pertes.

La relation (3), traduit ce qu'on appelle la condition de phase dans un laser :

Les seules longueurs d'ondes susceptibles d'osciller dans la cavité sont celles qui satisfont cette relation.

Comme il a été précisé précédemment, le laser doit remplir simultanément les conditions de gain et de phase afin de pouvoir fonctionner

- ▶ Le spectre optique sera donc la condition de gain (figure a), modulée par le peigne Fabry-Perot (figure b), l'ensemble étant inégalement amplifié par le phénomène d'émission stimulée. Ce qui donne le spectre d'émission de la figure .

D'après la figure on peut dire que la cavité joue le rôle d'un filtre en longueur d'onde, ce qui veut dire que l'onde n'est amplifiée qu'à certaines valeurs de fréquences précises:

$$\text{(avec } \nu = \frac{c}{\lambda} \text{)}$$

Les classes des lasers

- ▶ Les lasers sont classés selon le danger;
- ▶ **Les lasers de classe 1 et 1M (loupe)** sont considérés comme des lasers sûrs
- ▶ **Classe 2 et 2M (loupe):**
 - émettent de la lumière visible à des niveaux supérieurs à ceux de la classe 1,
 - protection des yeux
 - peuvent être dangereux si le faisceau est vu directement avec des instruments optiques;

▶ Laser de classe 3R (restreint)



- Emettent de lumiere à des longueurs visibles et invisibles qui sont dangereux dans des conditions de vision directe;

▶ Lasers de classe 3B



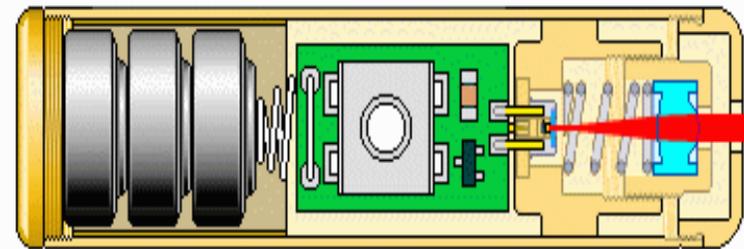
- Emettent de la lumière visible ou invisible qui est dangereuse dans des conditions de vision directe

- ils sont assez puissants pour causer des dommages aux yeux dans un temps plus court

- ▶ - Les dispositifs lasers dont la puissance est proche de la limite supérieure de la classe 3B peuvent également causer des brûlures de la peau;

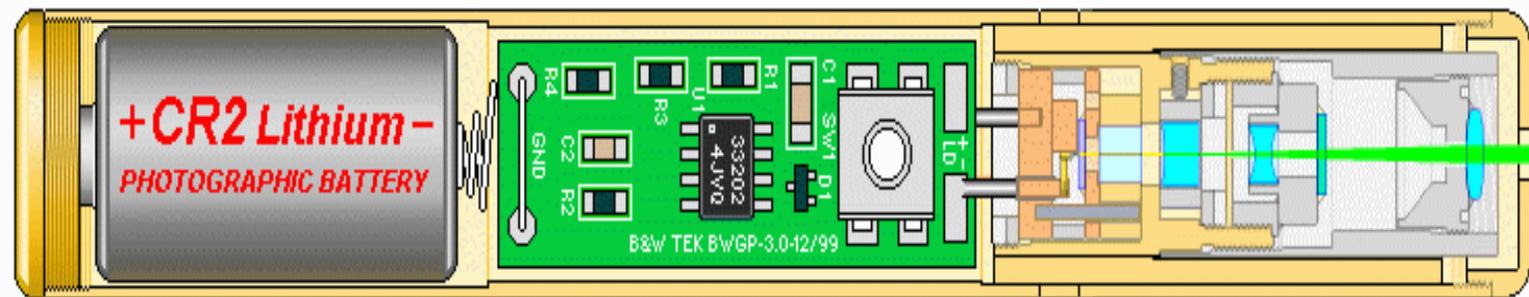
▶ Lasers de classe 4

- Dispositifs de forte puissance capables de causer à la fois des brûlures oculaires et cutanées,
- Ses réflexions diffuses peuvent également être dangereuses
- Le faisceau peut constituer un risque d'incendie;



Battery LD Driver LD Module

Typical Red Laser Pointer



Battery Pump LD Driver DPSS Laser Module

Typical Green Laser Pointer

Comparison of Red and Green Laser Pointer Complexity

▶ Interaction Laser Tissu

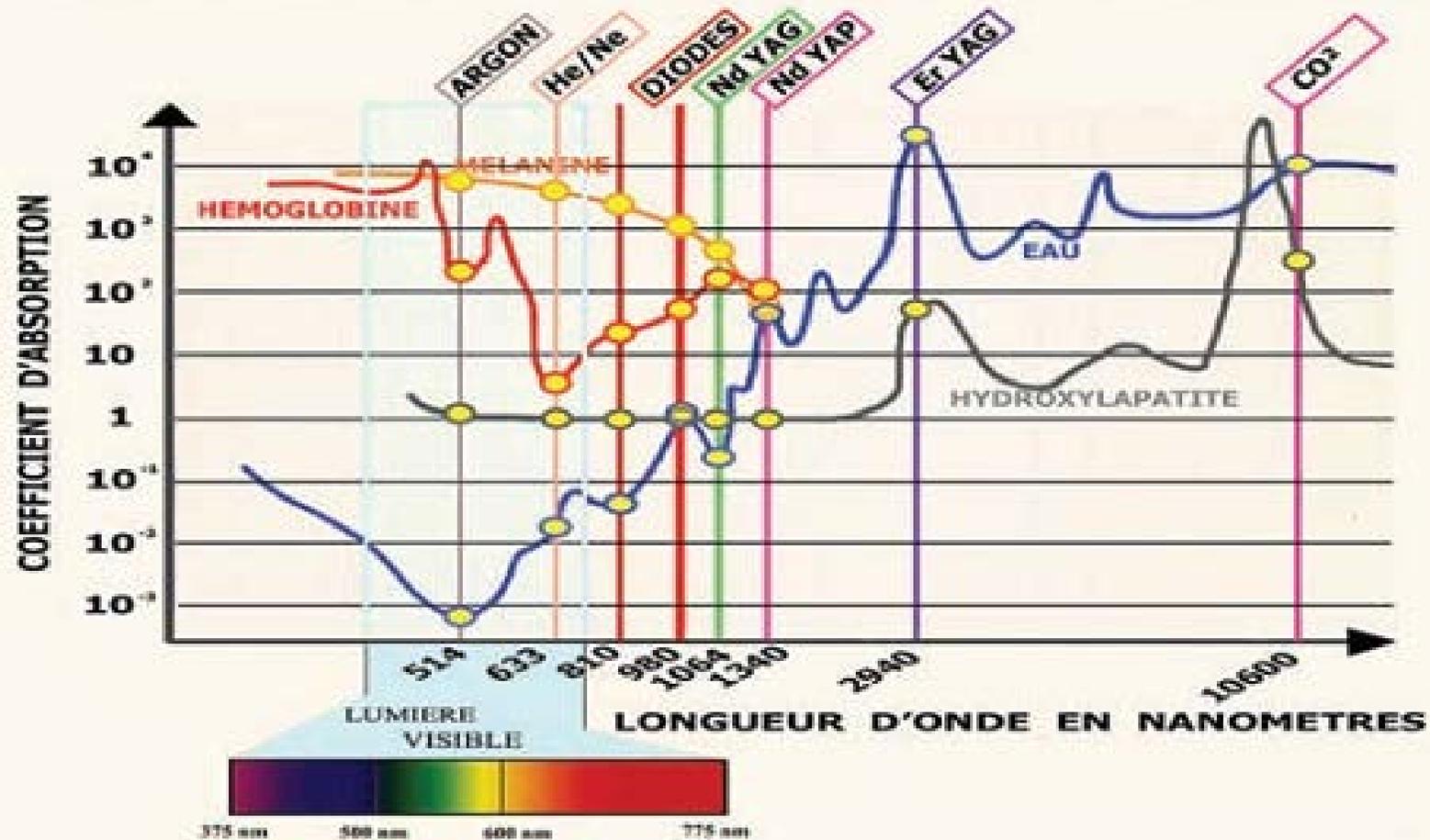
Différents types de lasers réagissent différemment avec les tissus.

L'interaction dépend de :

- ❑ La longueur d'onde du laser
- ❑ Puissance et temps d'exposition
- ❑ Propriété optique et thermique du tissu irradié
- ❑ Intensité du faisceau laser sur le tissu

Si l'exposition est CW (continu) ou rayonnement d'onde pulsée

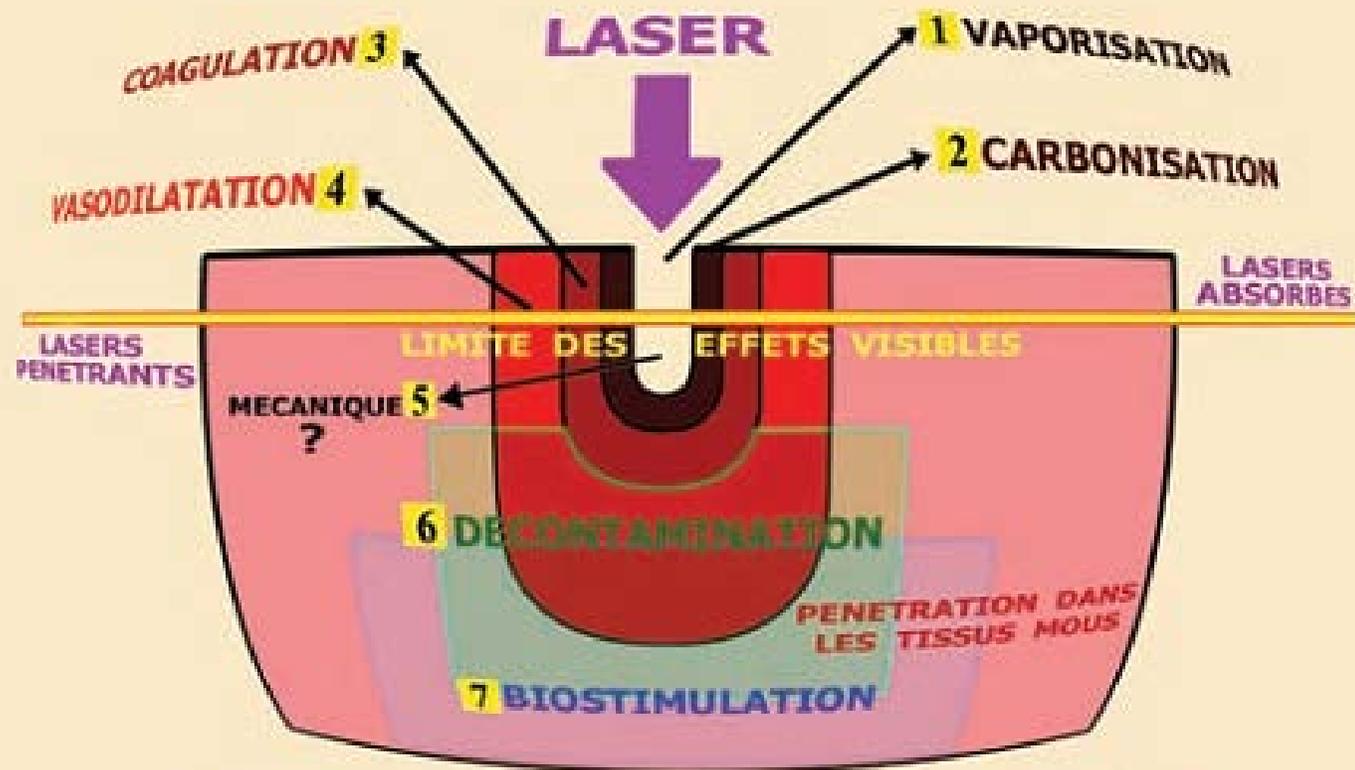
ABSORPTION DES RAYONNEMENTS LASERS DANS LES TISSUS CIBLES



G. REY

Interaction laser /tissu en fonction de la puissance et du temps d'exposition

LES PRINCIPAUX EFFETS DES LASERS



L'EFFET OBTENU DEPEND DE LA QUANTITE D'ENERGIE ABSORBEE PAR UN VOLUME DE TISSUS EN UN TEMPS DONNE

G. REY

▶ Électromécanique

Induit la rupture diélectrique dans les tissus causée par le plasma des ondes de choc
Induit une rupture mécanique localisée.

Photoablatif

Induit une photo dissociation ou une rupture des liaisons moléculaires dans les tissus.

▶ **Photothermique**



Convertit l'énergie lumineuse en énergie thermique. Cela provoque le réchauffement du tissu, et vaporisation

▶ **Photochimique**



L'irradiation à très faible puissance rend la fonction cellulaire inactive au moyen de processus chimiques toxiques
Permet à des cellules cibles de déclencher des réactions chimiques induites par la lumière

Interaction laser-tissu

Effets thermiques du rayonnement laser (température élevée dans les tissus)

Notez que les protéines et le collagène se dénaturent à environ 60 ° C
Le tissu de chauffage à 60 ° C peut entraîner une nécrose cellulaire - peut être utilisé pour tuer les cellules cancéreuses

Interaction laser-tissu - Ablation au laser

- Avec suffisamment d'énergie photonique, le laser peut être utilisée pour ioniser des molécules dans les tissus biologiques.
Encore mieux, les tissus peuvent être enlevés très précisément sans aucune apparence
- Des dommages thermiques peuvent être causés en utilisant des impulsions courtes de laser
- L'absorption de l'énergie laser dans les tissus suit la loi de Beer-Lambert

Il existe un seuil auquel l'énergie absorbée est assez élevée pour provoquer la décomposition des tissus

▶ Applications:

- ▶ Des impulsions laser ultra courtes peuvent être utilisées pour couper le tissu biologique en fines tranches, sans préparation préalable du tissu.
- ▶ Mise au point d'impulsions laser ultra-courtes sur les tissus biologiques,

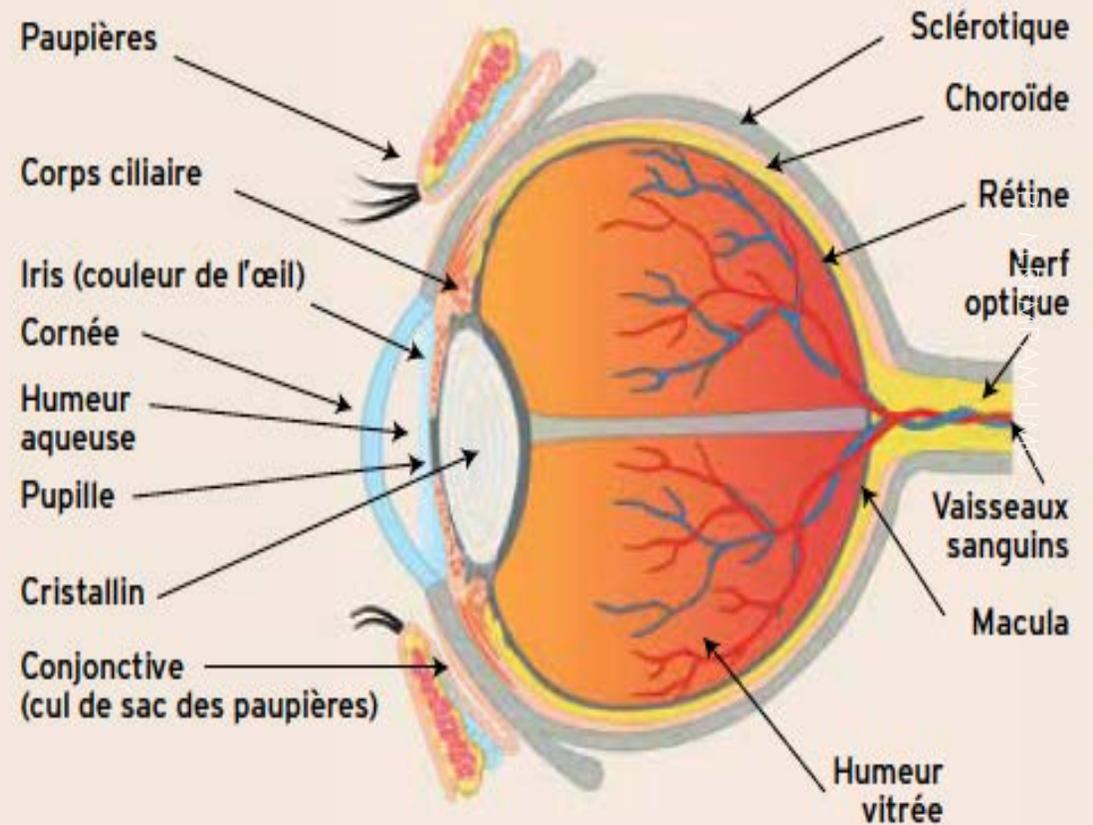
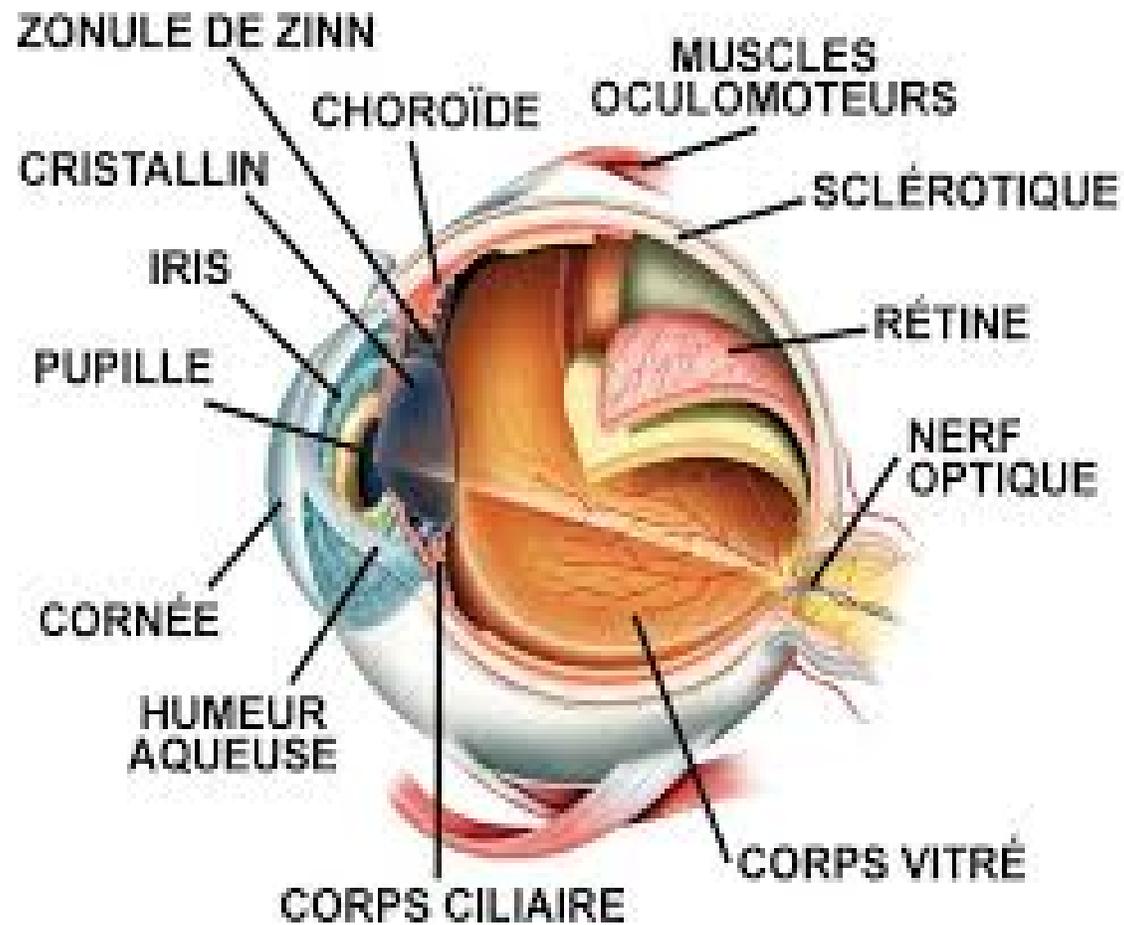
Exemples

Chirurgie des yeux au laser –

- ▶ L'ablation du tissu cornéen est atteinte, en utilisant un laser ArF pulsé ($\lambda = 193\text{nm}$)
- ▶ Enlèvement des rides (resurfaçage de la peau) et élimination du pigment de la peau

▶ Application médicales du laser:

- ▶ En ophtalmologie
- ▶ Parodontologie



Pour les longueurs d'onde qui se concentrent sur la rétine, le gain optique de l'œil est $\sim 100\,000$ fois:
 si l'illumination de la cornée est de $1\text{ mW} / \text{cm}^2$, alors l'illumination de la rétine sera de $100\text{ W} / \text{cm}^2$



Pr. M.REMAM-UMC

- ▶ Les longueurs d'onde de rayonnement de 400 à 1400 nm peuvent pénétrer dans l'œil et atteindre la rétine.

Effets de l'énergie laser sur les tissus oculaires dépendent:

Pr. M. REMRAN-UN

- 1 ---- la longueur d'onde et la durée d'impulsion de la lumière laser
 - 2 ---- les caractéristiques d'absorption du tissu (déterminées en grande partie par les pigments contenus).
 - 3 ---- la durée de l'exposition.
- Lorsque l'énergie laser dépasse le seuil, il provoque des dommages aux tissus.

Les effets peuvent être ionisants, thermiques ou photochimiques.

► La lumière laser peut être livrée :

1-le long d'un câble à fibre optique à une lampe à fente

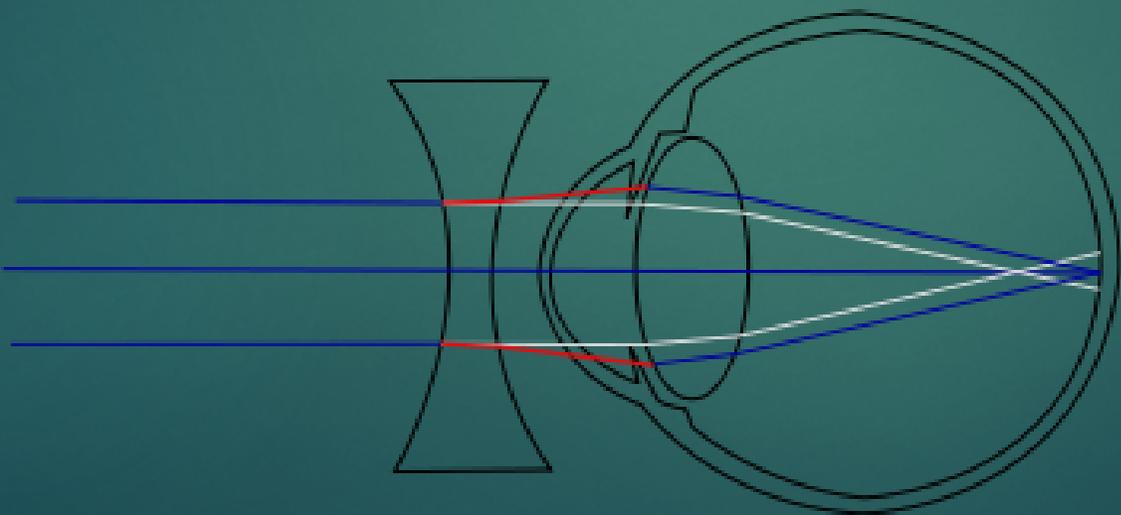
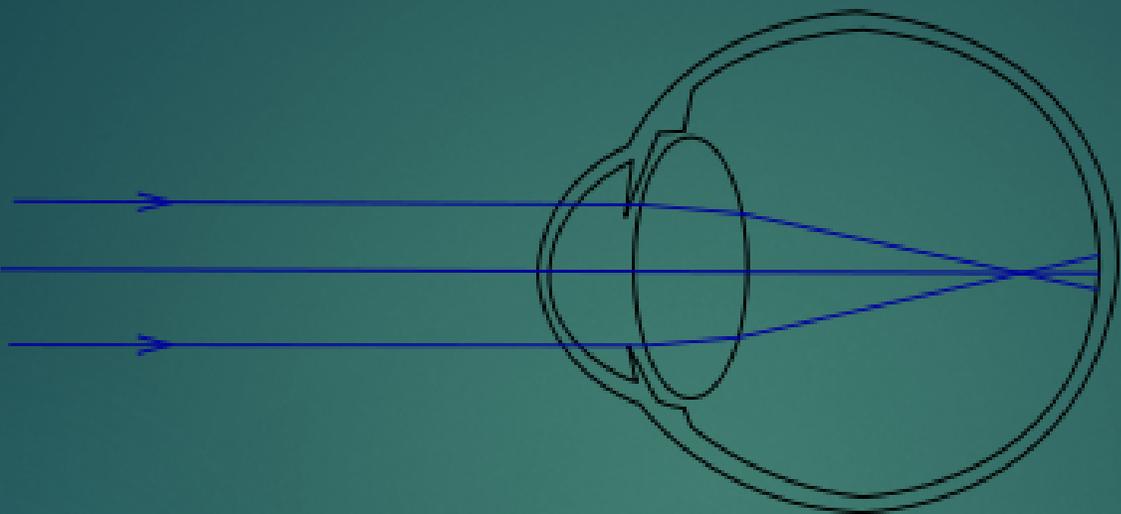
2-un ophtalmoscope indirect,

3-une sonde intraoculaire endolaser.



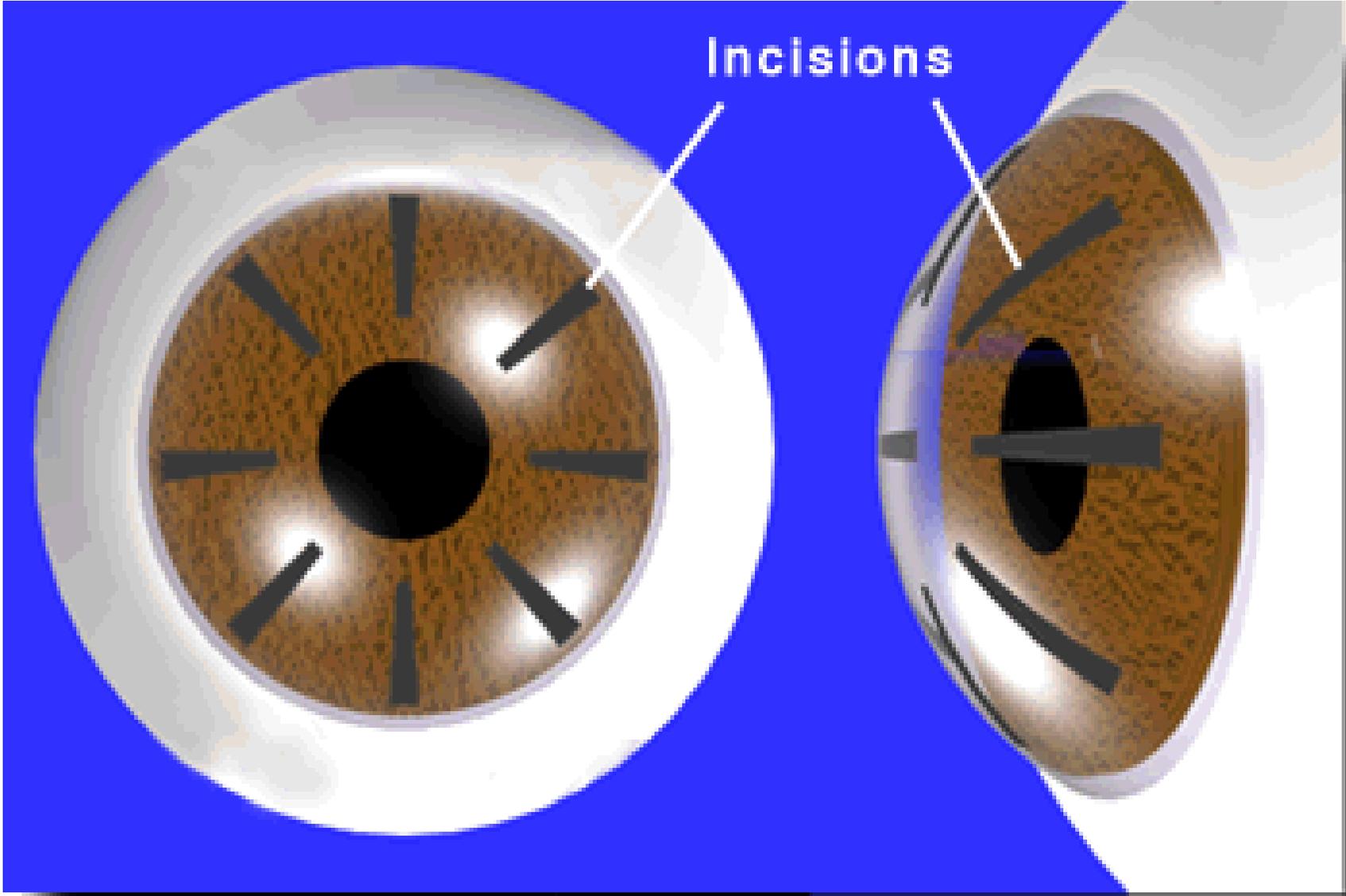
Myopie correction de la vision

- ▶ Photoprotection Keratectomy (PRK) utilise un type de laser appelé un laser excimer pour diminuer la myopie.
- ▶ Cette forme de correction de la vision au laser enlève une quantité précise de tissu en utilisant un laser ultraviolet "froid".
- ▶ Le laser utilise un programme informatique sophistiqué qui calcule et supprime une quantité précise de tissu du centre de la cornée pour diminuer sa courbure.
- ▶ Ce changement de la cornée rapproche le point focal de l'œil de la rétine et améliore la vision à distance.



▶ La kératotomie radiale (RK):

- ▶ La kératotomie radiale (RK) est une procédure chirurgicale utilisée pour diminuer la myopie.
- ▶ Au cours de la procédure, des incisions radiales sont réalisées dans la cornée de l'œil avec une lame diamantée très précise réglée à une profondeur particulière.
- ▶ Le nombre d'incisions et leur emplacement est déterminé par le degré de myopie.
- ▶ Ces incisions permettent aux côtés de la cornée d'aplatir la partie centrale de cette dernière.
- ▶ Cela rapproche le point focal de l'œil de la rétine et améliore la vision à distance.

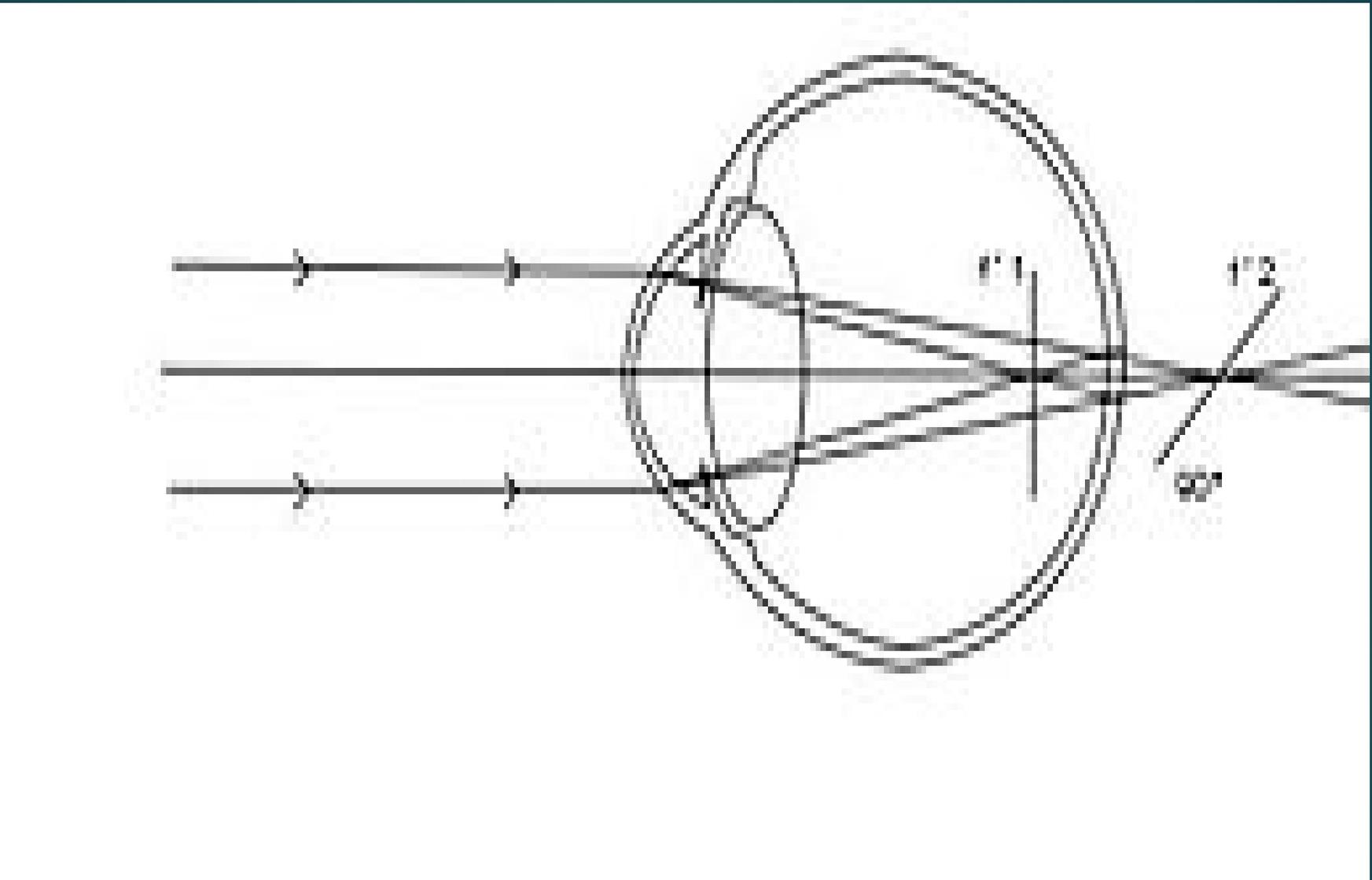


Incisions

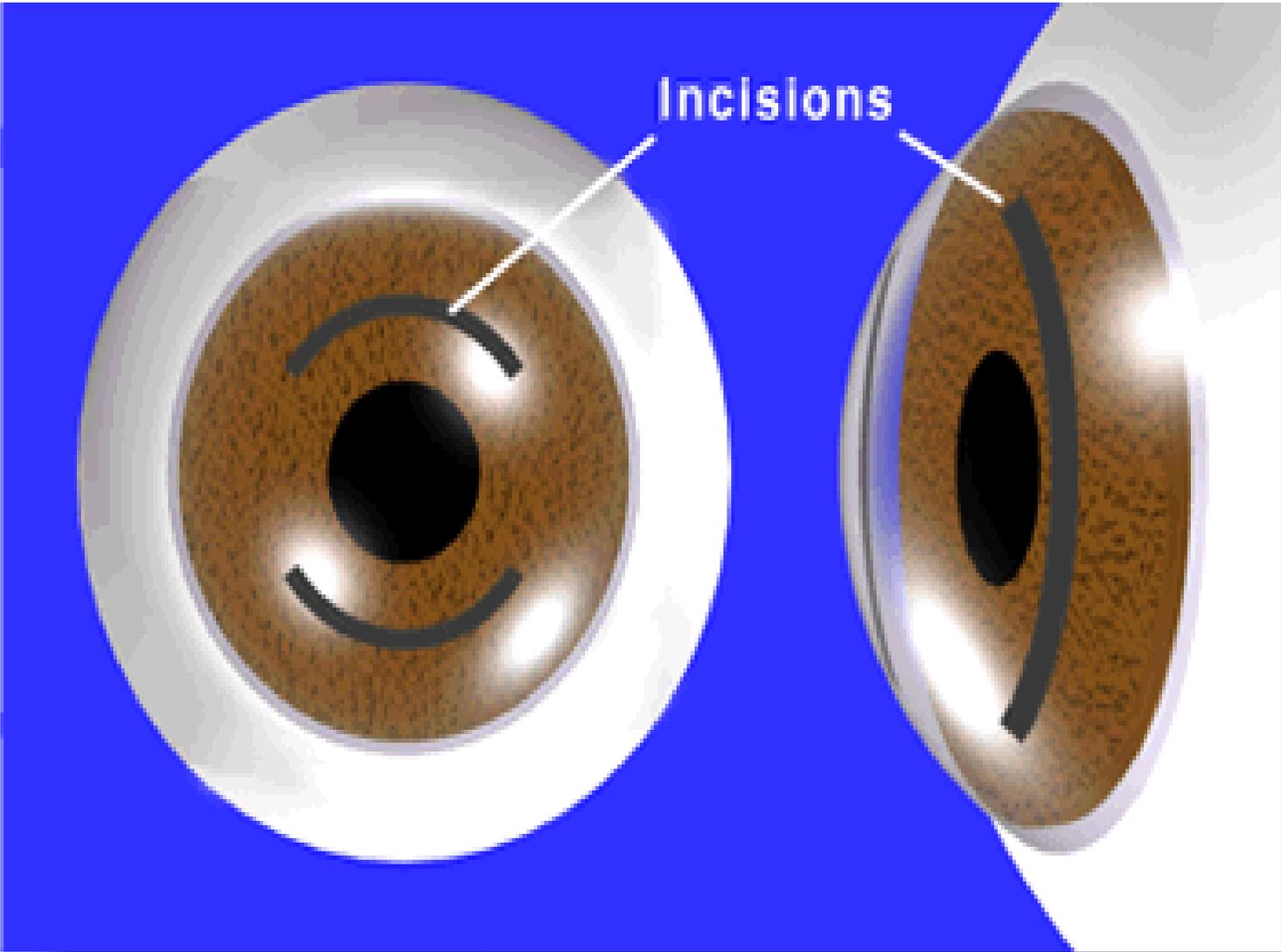
Correction de l'astigmatisme

- ▶ Le laser excimer peut être utilisé pour réduire l'astigmatisme lors de la chirurgie LASIK ou PRK.
- ▶ Le degré d'astigmatisme actuellement approuvé pour la correction est de 0,75 D à 4,0 D.
- ▶ Les mesures d'astigmatisme décrivent dans quelle mesure la cornée est «non sphérique».
- ▶ A titre d'exemple, la surface d'un ballon de basket est sphérique et n'aurait pas d'astigmatisme.

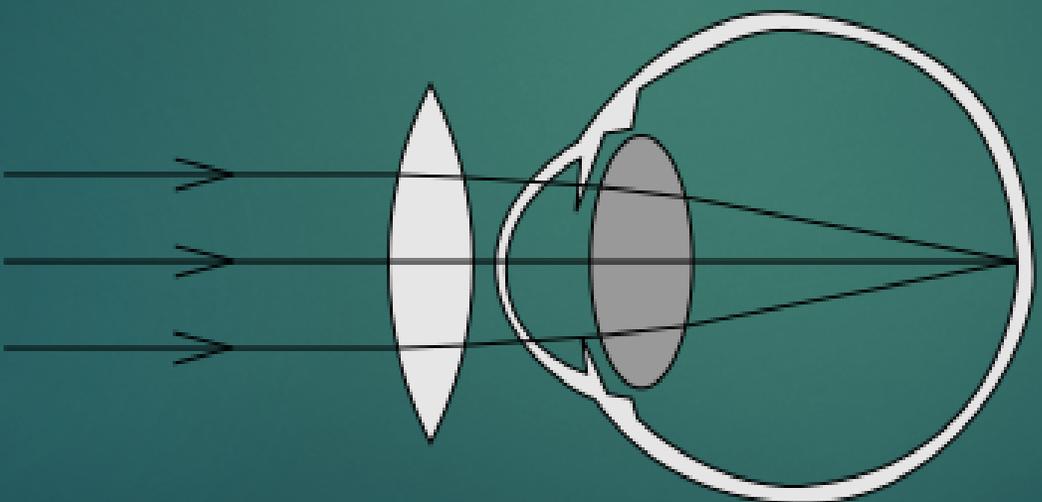
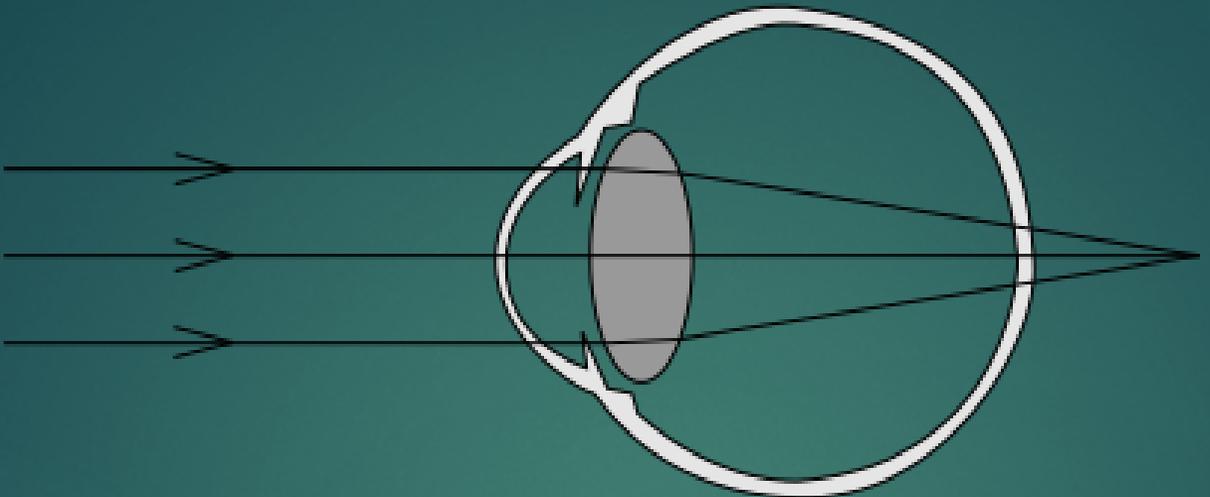
- ▶ La surface d'un ballon de rugby, d'autre part, serait très non sphérique et aurait un astigmatisme élevé.
- ▶ Le laser excimer réduit le degré d'astigmatisme en éliminant le tissu cornéen de manière asymétrique. Ceci est réalisé en utilisant un faisceau laser de forme ovale



- ▶ La kératotomie astigmatique (AK) est une procédure chirurgicale utilisée pour diminuer l'astigmatisme.
- ▶ Cette procédure peut être utilisée en combinaison avec la kératotomie radiale et la correction de la vision au laser par excimère.
- ▶ Lors d'une kératotomie astigmatique, une lame de diamant réglée à une profondeur précise fait une incision circonférentielle dans la cornée. L'incision fait que la cornée assume une forme plus sphérique et diminue le degré d'astigmatisme.



▶ Correction Hypermetropie



- ▶ Le laser excimère peut être utilisé pour remodeler la cornée et corriger l'hypermétropie.
- ▶ Si l'œil est hypermétrope (hypermétropie), la cornée est plus plate que ce qui est requis compte tenu de la longueur de l'œil.
- ▶ La chirurgie au laser excimère hyper-optique peut améliorer la vision sans lunettes en remodelant la face avant de l'œil et en la rendant plus incurvée.