

---

---

# OPTIQUE

---

---

CHARLES TUCHENDLER



MPSI 4 – LYCÉE SAINT-LOUIS

ANNÉE 2019/2020



# Table des matières

CHAPITRE XVII	GÉNÉRALITÉS SUR LA LUMIÈRE	1
<b>Introduction</b>		<b>2</b>
<b>I Nature de la lumière au fil de l'Histoire</b>		<b>2</b>
I.1 Les débuts de l'optique		2
I.2 La lumière comme faisceau de particules		3
I.3 La lumière comme onde électromagnétique		3
I.3.a L'optique ondulatoire		3
I.3.b Qu'est-ce qu'une onde ?		4
I.3.c Propriétés des ondes lumineuses		4
I.4 La lumière comme onde ET corpuscule		5
<b>II Propagation de la lumière</b>		<b>7</b>
II.1 Définitions		7
II.2 Indice de réfraction		7
II.3 Milieu dispersif		8
<b>III Sources de lumière</b>		<b>9</b>
III.1 Sources thermiques		9
III.2 Sources spectrales		10
III.3 Sources laser		11

## CHAPITRE XVII

## GÉNÉRALITÉS SUR LA LUMIÈRE

## Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>I Nature de la lumière au fil de l'Histoire</b>	<b>2</b>
I.1 Les débuts de l'optique	2
I.2 La lumière comme faisceau de particules	3
I.3 La lumière comme onde électromagnétique	3
I.3.a L'optique ondulatoire	3
I.3.b Qu'est-ce qu'une onde ?	4
I.3.c Propriétés des ondes lumineuses	4
I.4 La lumière comme onde ET corpuscule	5
<b>II Propagation de la lumière</b>	<b>7</b>
II.1 Définitions	7
II.2 Indice de réfraction	7
II.3 Milieu dispersif	8
<b>III Sources de lumière</b>	<b>9</b>
III.1 Sources thermiques	9
III.2 Sources spectrales	10
III.3 Sources laser	11

## Introduction

### Définition XVII.1 – Qu'est-ce que l'optique ?

L'optique est l'étude des phénomènes lumineux.

En général, on associe la lumière à ce qui est visible à l'oeil nu, mais on peut en réalité étendre cette notion aux autres domaines du spectre électromagnétique (UV, IR, RX, ondes radio, ...).

On peut explorer ces domaines à l'aide d'appareils spécifiques appelés **récepteurs photosensibles**, comme par exemple une pellicule photographique ou une photodiode à semiconducteurs.

L'explication de l'ensemble des phénomènes lumineux est complexe. Ces phénomènes sont interprétés tantôt comme provenant du **caractère ondulatoire** de la lumière, tantôt comme provenant de son **caractère corpusculaire**.

### Définition XVII.2 – Deux optiques différentes

On peut distinguer deux approches en optique :

- ★ L'optique géométrique que nous étudions en première année décrit le comportement de la lumière à l'aide de rayons lumineux et s'intéresse à la formation des images.
- ★ L'optique physique, étudiée en deuxième année, traite quant à elle de la nature ondulatoire de la lumière, des phénomènes d'interférences et de diffraction ainsi que de la dualité onde-corpuscule à la base de la mécanique quantique.

Remarque : comme nous allons le voir dans les chapitres suivants, l'optique géométrique est en général suffisante pour décrire le fonctionnement des instruments d'optique usuels : loupe, lunette astronomique, télescope, appareil photographique, rétroprojecteur...

## I Nature de la lumière au fil de l'Histoire

### I.1 Les débuts de l'optique

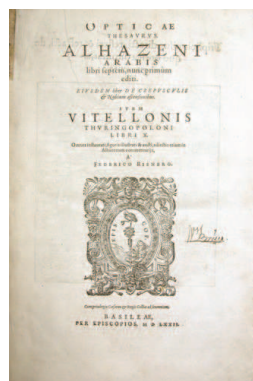
Aux débuts de l'optique, dans l'antiquité grecque, les savants (Euclide et Ptolémée) ne se posent pas vraiment la question de la nature de la lumière : **on la considère déjà comme étant un ensemble de rayons lumineux**.

On cherche surtout à cette époque une explication à la vision, et à cette époque, on postule que c'est l'oeil lui-même qui va "tâter" les objets ! C'est la théorie de l'émission, qui a toujours quelques adeptes de nos jours.

Dès l'antiquité, la loi de la réflexion est étudiée et comprise (symétrie).

Il faut attendre l'an 1000 environ et Ibn-Al-Haytham (dit Alhazen en Occident), premier scientifique au monde et père de l'optique moderne, pour que la lumière soit vue comme une source extérieure à l'oeil. Son ouvrage *Kitab al-Manazir* (ou *Traité d'optique*) est considéré comme l'un des ouvrages les plus importants de l'Histoire de la physique.

Au XIII<sup>ème</sup> siècle, on construit les premières lunettes de vue pour corriger myopie et hypermétropie.



## I.2 La lumière comme faisceau de particules

Au XVII<sup>ème</sup> siècle, avec le succès des modèles mécanistiques assimilant les corps à des objets ponctuels (Galilée, Kepler, Newton), c'est le modèle balistique de la lumière qui est privilégié : *on considère que la lumière, comme la matière, est constituée de particules.*

En 1609, Galilée élabore sa lunette dédiée aux observations astronomiques. C'est le premier instrument d'optique jamais conçu. Entre 1621 et 1637, Snell (néerlandais) et Descartes (français) formulent les lois de la réflexion et de la réfraction.

À la fin du XVII<sup>ème</sup>, entre 1665 et 1690, *Hooke puis Huygens penchent plutôt pour une approche ondulatoire de la lumière* mais n'en ont pas de preuves. C'est en faisant l'analogie avec les ondes sonores qu'ils fondent leur théorie optique. Malheureusement, Newton publie en 1704 son traité d'optique, *Optiks*, dans lequel il expose une théorie corpusculaire de la lumière. Bénéficiant à l'époque d'une reconnaissance immense dans la communauté scientifique, c'est sa théorie qui fut privilégiée et il fallut attendre près d'un siècle pour que la théorie ondulatoire revienne sur les devants de la scène.

## I.3 La lumière comme onde électromagnétique

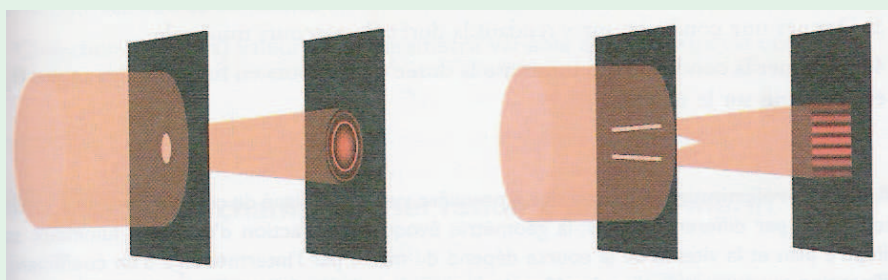
### I.3.a L'optique ondulatoire

Au début du XIX<sup>ème</sup> siècle, entre 1800 et 1825, Young et Fresnel (deux génies de l'optique) interprètent pour la première fois des expériences d'interférences et de diffraction en optique grâce à un modèle ondulatoire de la lumière.

Avec les travaux retentissants de Maxwell à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, *la lumière est introduite sous forme d'une onde électromagnétique transverse qui se propage dans le vide à la vitesse :*

Ces travaux permettent l'unification des deux domaines autrefois séparés que sont l'optique et l'électromagnétisme.

#### Expérience XVII.1 – Caractère ondulatoire de la lumière



Phénomène de diffraction

Phénomène de d'interférence

FIGURE XVII.1 – *Limites de validité de l'optique géométrique. La lumière traverse une ouverture petite devant la longueur d'onde (diffraction), ou deux fines fentes (interférences).*

Remarque : on retrouve les résultats obtenus dans le cours sur les ondes.

## I.3.b Qu'est-ce qu'une onde ?

**Définition XVII.3 – Onde monochromatique**

Lorsque les modulations spatiales et temporelles se font à une seule fréquence, on parle d'onde **monochromatique** (*mono* : une seule, *chromatique* : couleur).

Une onde monochromatique peut être décrite par une expression de la forme :

où  $s_0$  est l'amplitude de l'onde,  $T$  est la **période temporelle** de l'onde et  $\lambda$  la période spatiale appelée **longueur d'onde**.

Ces grandeurs sont reliées par la relation :

où  $c$  est la **vitesse de propagation** de l'onde ou **célérité**.

## I.3.c Propriétés des ondes lumineuses

**Propriété XVII.1 – Ondes lumineuses**

La lumière peut-être modélisée par une **onde électromagnétique**, c'est-à-dire la modulation conjointe, à la fois dans l'espace et dans le temps, d'un champ électrique  $\vec{E}$  et d'un champ magnétique  $\vec{B}$ .

Cette onde peut se propager dans les milieux matériels ou dans le vide contrairement à une onde mécanique (le son par exemple) qui ne peut se propager que dans les milieux matériels.

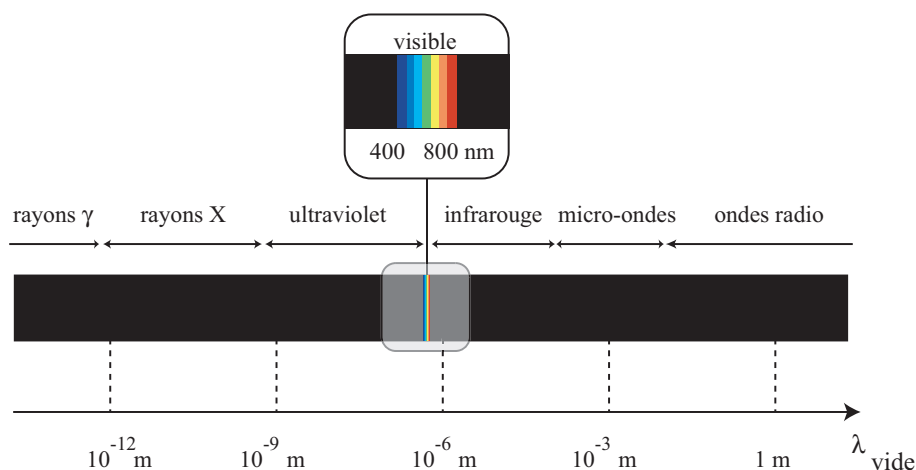


FIGURE XVII.2 – Spectre des ondes électromagnétiques. La lumière visible correspond aux longueurs d'onde comprises entre 400 et 800 nm (dans le vide).

Les ondes lumineuses visibles correspondent à un très petit domaine des ondes électromagnétiques (cf Fig.XVII.2). Dans le domaine visible (entre 4 et  $8 \cdot 10^{14}$  Hz), chaque couleur correspond à une vibration lumineuse de fréquence donnée.

Couleur	Fréquence (en $10^{14}$ Hz)	Longueur d'onde (en nm) dans le vide
fin de l'ultraviolet	7,50	400
violet	7,14	420
bleu	6,52	460
vert	5,70	530
jaune	5,17	580
orange	5,00	600
rouge	4,62	650
début de l'infrarouge	3,75	800

*Cette fréquence, intrinsèque, est indépendante du milieu traversé, contrairement à la longueur d'onde qui peut varier, comme nous le verrons dans ce chapitre, suivant le milieu de propagation.*

#### I.4 La lumière comme onde ET corpuscule

A la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, deux expériences (le rayonnement du corps noir et l'effet photoélectrique) conduisent Planck et Einstein à poser les bases de la mécanique quantique en introduisant le concept de *photons*.

##### Définition XVII.4 – Le photon

Le photon est une particule de masse nulle constituant la lumière.

Chaque photon a une énergie correspondant à un quantum d'énergie

où

est la constante de Planck ("hilfe" en allemand) et se propage à une vitesse  $c$  dans le vide.

Remarque : c'est donc un retour à la théorie *corpusculaire* de la lumière qu'envisageait Newton au début du XVIII<sup>ème</sup> siècle.

##### Propriété XVII.2 – Onde ET corpuscle

Ce sont de Broglie, Schrödinger et Bohr qui, au début du XX<sup>ème</sup>, mirent fin aux débats en parlant de *dualité onde-corpuscule* et en introduisant la *mécanique quantique* : la lumière est à la fois une onde et un ensemble de particules. Les deux modèles sont complémentaires et représentent deux façons différentes de décrire une même réalité.



Le passage du caractère corpusculaire au caractère ondulatoire dépend notamment de l'intensité lumineuse<sup>1</sup> (cf Fig.XVII.3).

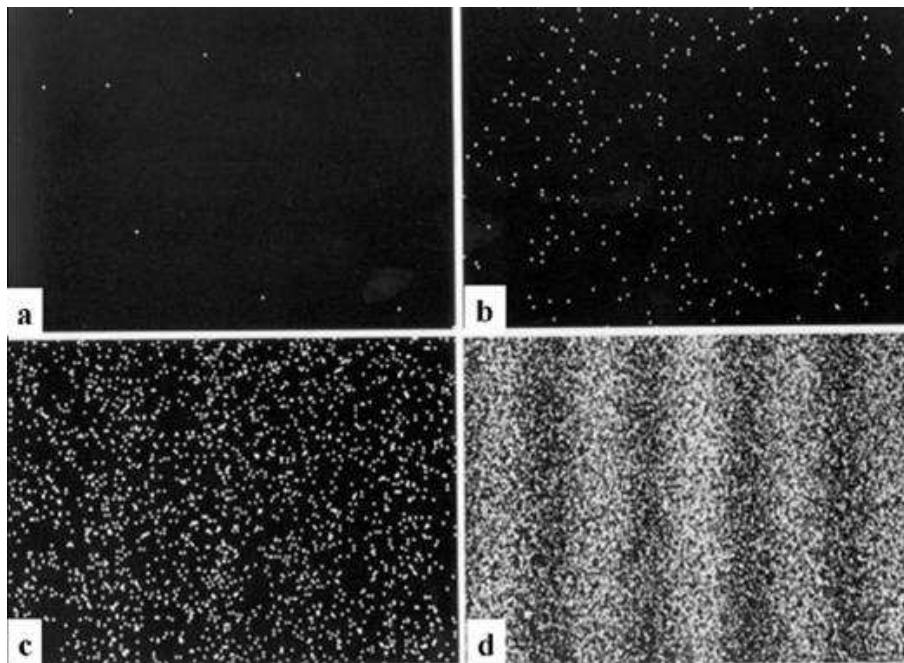


FIGURE XVII.3 – Expérience d'interférences photon par photon - Si l'on dispose d'une source émettant des photons un à un, on peut observer l'apparition des franges d'interférences lorsqu'un grand nombre de photons a été émis.

### Propriété XVII.3 – La matière elle aussi est une onde

Usuellement présentée comme étant constituée de particules, la matière peut être décrite comme une onde dans le cadre de la mécanique quantique. Cette thématique fera l'objet d'une approche documentaire dans le cours d'introduction à la physique quantique.

Plusieurs dispositifs expérimentaux ont ainsi déjà mis en évidence cette propriété :

- ★ diffraction des électrons <sup>a</sup>
- ★ diffraction de neutrons <sup>b</sup>
- ★ interférences d'atomes ultrafroids <sup>c</sup>
- ★ ou encore interférences de molécules <sup>d</sup>

<sup>a</sup>. <http://www.hitachi.com/rd/research/em/doubleslit.html>

<sup>b</sup>. Single and double slit diffraction of neutrons. A. Zeilinger, R. Gähler, C.G. Shull, W. Treimer and W. Mampe, Rev. of Mod. Phys. **60**, 1067 (1988)

<sup>c</sup>. Measurement of the spatial coherence of a trapped Bose gas at the phase transition. Bloch et al. Nature (2000) vol. 403 (6766) pp. 166-170

<sup>d</sup>. A Kapitza-Dirac-Talbot-Lau interferometer for highly polarizable molecules. Gerlich et al., Nature Physics (2007) vol. 3 (10) pp. 711-715

1. V. Jacques, E. Wu, T. Toury, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier et J.F. Roch, Eur. Phys. Jour. D (2005) vol. 35 (3) pp. 561-565

## II Propagation de la lumière

### II.1 Définitions

Dans le cadre du programme, on se limitera à l'étude de la propagation de la lumière dans des milieux homogènes, transparents et isotropes (MHTI).

Exemples : le vide, l'air, l'eau, le verre... peuvent être considérés comme MHTI lorsqu'ils sont homogènes et au repos.

#### Définition XVII.5 – Milieux H.T.I.

- ★ On appelle **milieu homogène** un milieu dont les propriétés sont identiques en tout point de l'espace.

Exemple : air  $\neq$  nuage de poussière.

- ★ On appelle **milieu transparent** un milieu qui laisse passer une partie de la lumière visible.

Exemple : eau  $\neq$  métal.

- ★ On appelle **milieu isotrope** un milieu dont les propriétés sont indépendantes de la direction d'étude (indépendantes de la direction de propagation de la lumière par exemple). Aucune direction n'est alors privilégiée.

Exemple : verre  $\neq$  cristal, verre polarisant.

En laboratoire, on obtient un film polaroïd grâce au dépôt d'une couche d'alcool polyvinylique imbibée d'iode. Pendant la fabrication, les chaînes de polymère sont étirées de manière à ce que les cristaux d'iode, fixés sur les différentes chaînes, s'alignent. La lumière polarisée parallèlement aux chaînes est absorbée tandis que la lumière polarisée perpendiculairement est transmise.



Remarque : cette année, on négligera l'absorption d'une partie de la lumière par les milieux matériels (constitués de molécules) sauf dans le cours de chimie sur la spectrophotométrie (loi de Beer-Lambert).

### II.2 Indice de réfraction

#### Propriété XVII.4 – Vitesse de la lumière dans un MHTI

Dans un MHTI matériel, la lumière se propage à une vitesse  $v$  inférieure à celle de la lumière dans le vide  $c$  :

$$v < c$$

**Définition XVII.6 – Indice de réfraction ou indice optique**

On caractérise ainsi le milieu par son *indice de réfraction*. Cette grandeur sans dimension est définie par :

On dit qu'un milieu est d'autant plus *réfringent* que son indice est *élevé*. Cet indice est toujours positif et supérieur à 1. On donne quelques exemples dans le tableau XVII.1.

Remarque : nous verrons dans la suite qu'il dépend de la longueur d'onde de la lumière considérée.

Tableau XVII.1 – Valeurs de l'indice de réfraction pour quelques milieux de propagation usuels.

Milieu	Vide	Air	Eau	Verre	Diamant
$n$	1	$1,0003 \simeq 1$	1,3	1,5	2,4

**Propriété XVII.5 – Longueur d'onde**

Lorsque la lumière change de milieu, la fréquence temporelle  $\nu$  reste constante alors que la longueur d'onde, est modifiée :

où  $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$  est la longueur d'onde dans le vide.

**II.3 Milieu dispersif****Définition XVII.7 – Milieu dispersif**

Il s'agit d'un milieu dont l'indice de réfraction dépend de la longueur d'onde.

La plupart des milieux transparents ont un indice de réfraction qui vérifie bien la formule simplifiée de Cauchy :

où  $A$  (sans dimension) et  $B$  (en  $\text{m}^2$ ) sont des constantes positives.

Remarque : on rappelle que la vitesse de propagation dans un milieu dispersif dépend aussi de la longueur d'onde.

Milieu	Indice pour $\lambda_0 = 486,1 \text{ nm}$ (bleu)	Indice pour $\lambda_0 = 589,4 \text{ nm}$ (jaune)	Indice pour $\lambda_0 = 656,3 \text{ nm}$ (rouge)
vide	1	1	1
air sec à 0°C	1,000294	1,000292	1,000291
eau à 20°C	1,337	1,333	1,331
verre de type flint	1,674	1,661	1,654
verre de type crown	1,521	1,515	1,513

### Propriété XVII.6 – Evolution de l'indice optique avec la longueur d'onde

L'indice optique diminue donc quand la longueur d'onde augmente :

$$\lambda_{\text{bleu}} < \lambda_{\text{rouge}} \implies n_{\text{bleu}} > n_{\text{rouge}}$$

Comme on va le voir avec le *prisme* en verre, la dispersion peut être utilisée pour séparer les différentes longueurs d'ondes.

## III Sources de lumière

### Définition XVII.8 – Types de sources

- ★ Une **source primaire** émet de la lumière par elle-même.  
*Exemples* : étoiles, ampoules, tubes à décharges (néons), lasers...
  - ★ Une **source secondaire** renvoie la lumière qu'elle reçoit d'une autre source.  
*Exemples* : planètes, Lune, arbres...
- Ces objets **absorbent** une partie du rayonnement, et en **diffusent** une autre partie. C'est la longueur d'onde de la lumière diffusée qui détermine la couleur de l'objet.

### III.1 Sources thermiques

#### Propriété XVII.7 – Rayonnement thermique

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique dépendant de sa température.

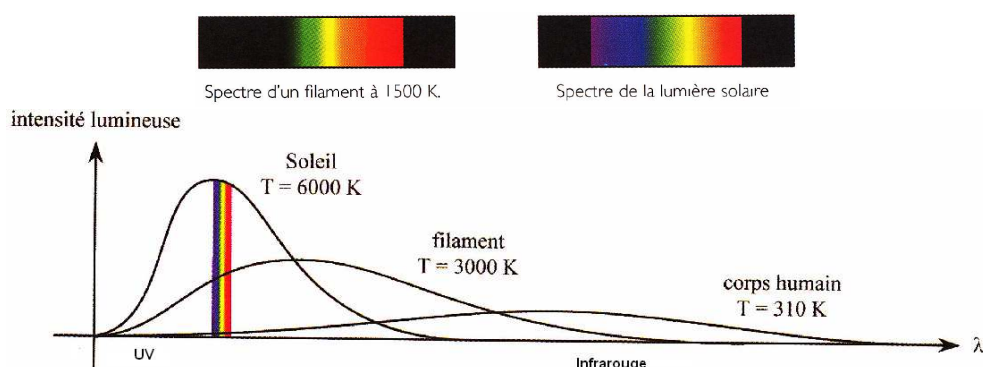


FIGURE XVII.4 – Spectres d'émission de corps ayant des températures différentes.

Ces *spectres* - décomposition de la lumière en fonction de sa longueur d'onde - sont obtenus à l'aide d'un milieu dispersif comme le prisme qui "sépare" les longueurs d'onde (cf Fig.XVII.5).

## Expérience XVII.2 – Spectres d'une "lampe blanche"



FIGURE XVII.5 – Dispersion de la lumière du Soleil à travers un prisme : le spectre est continu.

## Propriété XVII.8 – Les spectres thermiques

- ★ Les sources thermiques comme les lampes à incandescence, le Soleil, ... émettent des rayonnements comportant toutes les longueurs d'ondes visibles : on parle alors de **lumière blanche** et de **spectre continu**.
- ★ Plus la température du corps est élevée, plus son spectre d'émission est déplacé vers les fréquences élevées (donc vers les longueurs d'onde faibles) :
  - Les objets à température usuelle (300 K) émettent dans l'infrarouge.
  - Dans une lampe ordinaire, le filament de tungstène est porté à une température d'environ 2800 K. Son maximum d'émission est situé dans l'infrarouge, mais il émet également dans le visible.
  - Le Soleil possède une température de surface de 5700 K. Son maximum d'émission est dans le domaine visible.

## III.2 Sources spectrales

## Expérience XVII.3 – Lampe à décharge

Dans une lampe à décharge, la lumière est émise par un gaz placé entre deux électrodes, et soumis à des décharges électriques. Les lampes à vapeur de sodium qui équipent de nombreux lampadaires en sont un bon exemple.

Au laboratoire, on utilisera essentiellement des lampes à vapeur de sodium et à vapeur de mercure.

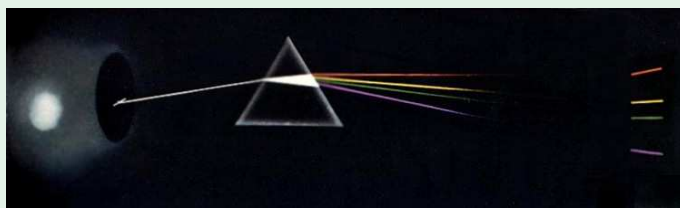


FIGURE XVII.6 – Dispersion de la lumière d'une lampe spectrale à travers un prisme : le spectre est discontinu.

## Propriété XVII.9 – Spectre d'émission d'un élément chimique

Le spectre d'émission d'une lampe à décharge est **discontinu** (cf Fig.XVII.6). Il est constitué de **raies**, caractéristiques du (ou des) gaz qu'elle contient. Ce type de sources de lumière ne contient donc que certaines longueurs d'onde très précises.

Remarque : l'étude des raies émises par un corps (une étoile par exemple) permet d'identifier les éléments qui le constituent.

### III.3 Sources laser

LASER est l'acronyme de LIGHT AMPLIFICATION BY STIMULATED EMISSION OF RADIATION.

#### Expérience XVII.4 – Description d'un laser

Un laser est schématiquement constitué d'une cavité à l'intérieur de laquelle se trouve un milieu actif appelé *milieu amplificateur*. Dans le cas du laser He-Ne (pointeur laser rouge), le milieu actif est un mélange d'hélium et de néon gazeux. Ce milieu actif est excité par une source extérieure (arc électrique, flash lumineux, autre laser...), et en réponse émet de la lumière.

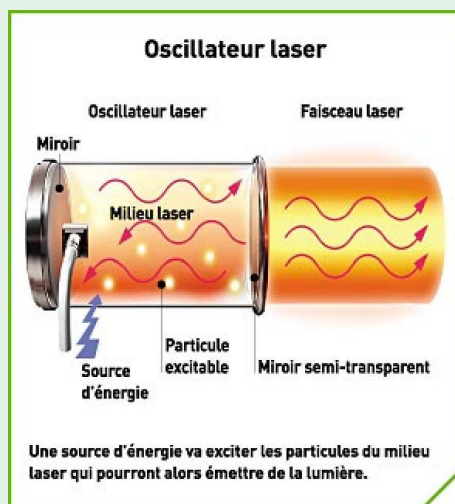


FIGURE XVII.7 – Schéma de fonctionnement d'un laser.

La cavité est fermée par deux miroirs, dont un, semi-transparent, laisse passer une faible partie de la lumière, le reste étant renvoyé dans la cavité. La lumière passe ainsi plusieurs fois dans la cavité, et est amplifiée à chaque passage.

#### Propriété XVII.10 – Spectre d'un laser

Le spectre du laser ne contient qu'une seule raie, donc une seule longueur d'onde. C'est une lumière **monochromatique**. Dans le cas du laser hélium-néon,  $\lambda_L = 632,8 \text{ nm}$ .

Remarque : la puissance des lasers utilisés au laboratoire est de l'ordre de 1 mW. Cette puissance est concentrée sur une très faible surface ( $1 \text{ mm}^2$ ), ce qui rend le laser très dangereux pour l'œil. On veillera à ne jamais diriger un faisceau laser dans son œil ou celui d'une personne à proximité !