

Chapitre 1 : Modèle scalaire des ondes lumineuses

I. Modèles corpusculaire et ondulatoire

1. Optique géométrique

En première année, nous avons utilisé l'optique géométrique pour expliquer la formation d'images lumineuses.

Principes de l'optique géométrique :

- La lumière se propage selon des courbes appelées rayons lumineux.
- La lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène.
- Un milieu transparent est caractérisé par son indice de réfraction n .
- Les directions des rayons réfléchis et transmis à l'interface de deux milieux transparents sont données par les lois de Descartes.

Au XVII^{ème} siècle, cette théorie permet à Newton d'expliquer la formation des arcs en ciel en étudiant la réfraction de la lumière dans les gouttelettes d'eau. Elle permet également à Galilée de construire sa lunette. Cependant, dès 1690, Huygens propose un modèle ondulatoire de la lumière expliquant la réfraction.

2. Mise en évidence du caractère ondulatoire de la lumière

Expérience : laser + fente fine ou cheveu.

Observations : L'optique ne permet pas d'observer la figure sur l'écran. En effet, elle prévoit une tache sur l'écran de la taille de la fente. On observe que plus l'ouverture de la fente est faible, plus la tache sur l'écran est étalée. Il s'agit du phénomène de diffraction.

Expérience : fentes d'Young

Observations : L'optique prévoit la formation de deux lignes lumineuses sur l'écran. On observe l'apparition d'alternance de franges rectilignes noires et brillantes. Il s'agit du phénomène d'interférence. Il y a des zones où les ondes provenant des deux sources s'ajoutent (interférences constructives) et des zones où elles se compensent (interférences destructives).

Ces deux phénomènes ne peuvent être expliqués par l'optique géométrique, il faut alors utiliser l'optique ondulatoire ou optique physique. De plus, le phénomène de diffraction se produit lorsque la lumière rencontre un obstacle. Cependant, il n'est visible que lorsque l'obstacle a une taille du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

La lumière est une onde électromagnétique. On considère qu'elle se propage dans un milieu linéaire homogène transparent d'indice de réfraction n .

3. Dualité onde-corpuscule

Le modèle corpusculaire a été développé par Planck et surtout Einstein au début du XXème siècle. On considère que la lumière est constituée de «grains» d'énergie qui se propagent à la vitesse c . Ces grains (ou quanta d'énergie) sont des particules sans masse appelée **photons**.

L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante :

$$E = h\nu \quad \text{avec } h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \text{ (constante de Planck).}$$

Les deux modèles, ondulatoire et corpusculaire, se complètent. Cette dualité onde corpuscule pour la lumière est alors généralisée aux particules dans la théorie de la mécanique quantique par De Broglie, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, ...

II. Modèle scalaire de la lumière

1. La vibration lumineuse

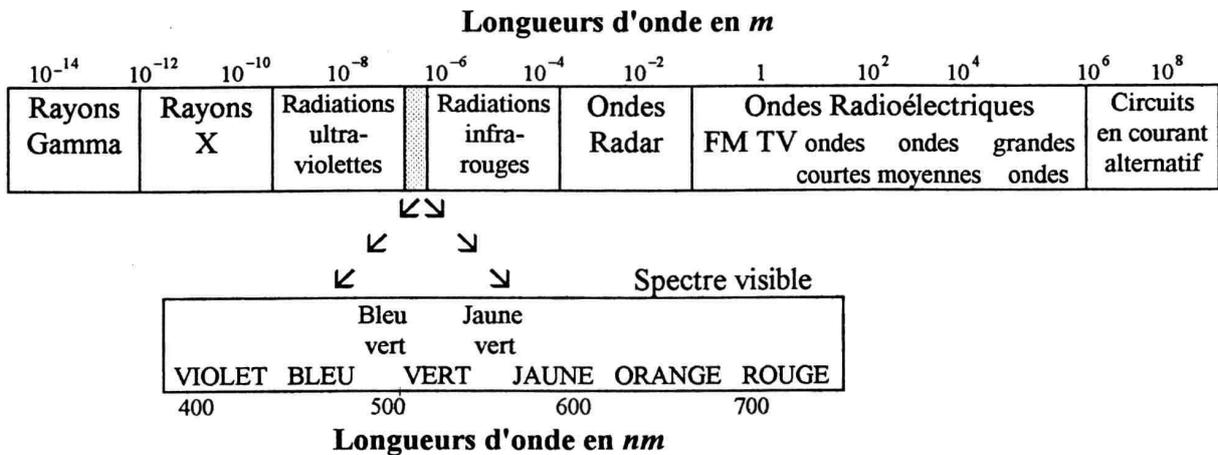


FIGURE 1 – Domaines des ondes électromagnétiques

2. Récepteurs

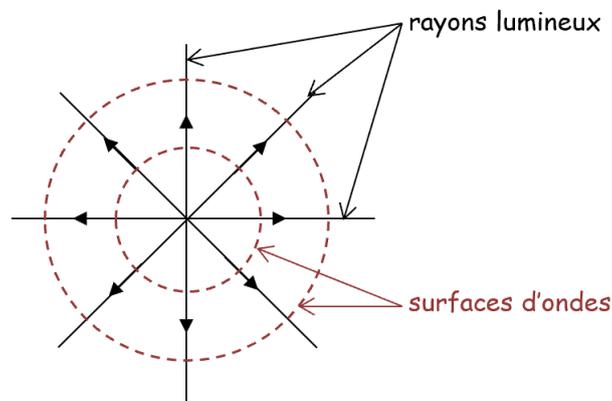
Temps de réponse τ_R des capteurs optique (ordre de grandeur) :

Récepteur	Temps de réponse τ_R
Œil	0.1 s
Photodiode	10^{-6} s
Photoresistance	10^{-2} s
Capteur CCD	10^{-4} s

3. **Éclairement ou intensité**
4. **Lumière monochromatique**
5. **Chemin optique**
6. **Surface d'onde**

III. Différents types d'onde

1. Onde sphérique



2. **Onde plane**
3. **Effet d'une lentille mince dans l'approximation de Gauss**

IV. Différents types de lumière

1. Analyse spectrale : transformée de Fourier

La transformée de Fourier d'une fonction $f(t)$ est définie par :

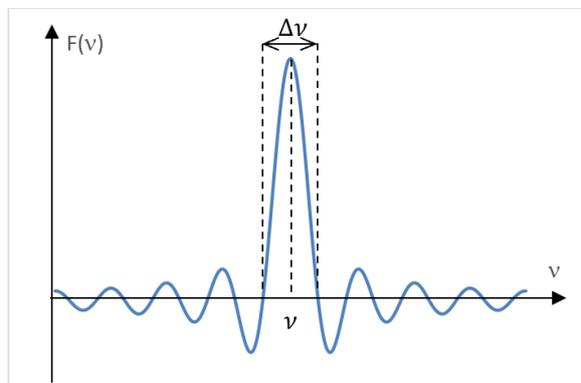
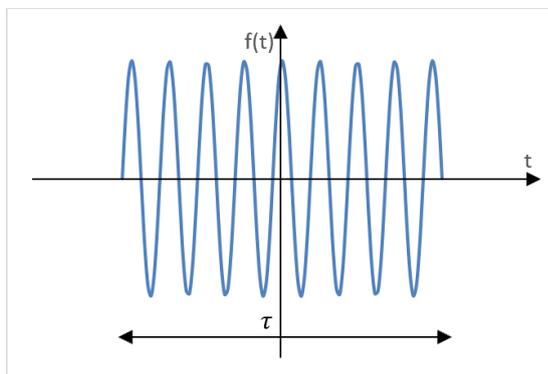
$$\underline{F}(v) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(2j\pi vt) dt$$

En utilisant la transformée de Fourier, nous passons du domaine temporel au domaine fréquentiel. Ces deux espaces sont duaux, ils représentent deux visons de la même chose. Cette transformée de Fourier nous donne deux renseignements :

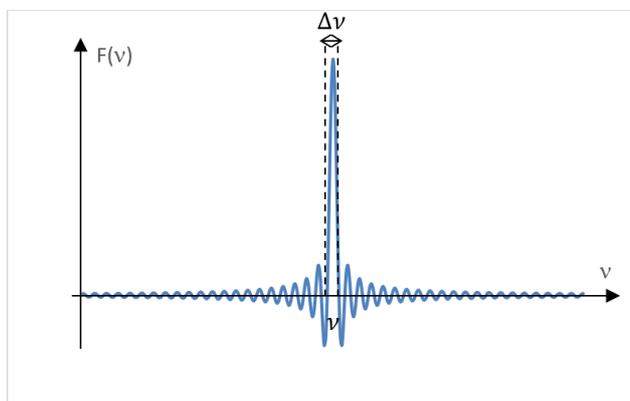
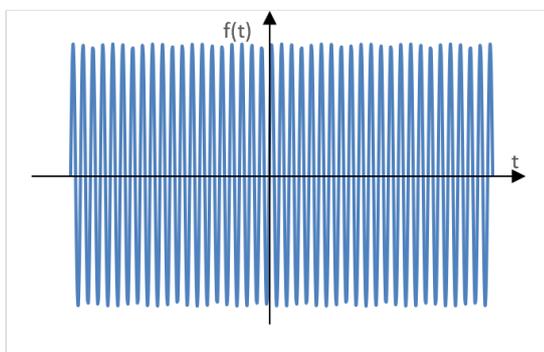
- le module de $\underline{F}(v)$ nous donne les amplitudes relatives des composantes fréquentielles
- l'argument nous donne les phases relatives.

Exemples de transformées de Fourier :

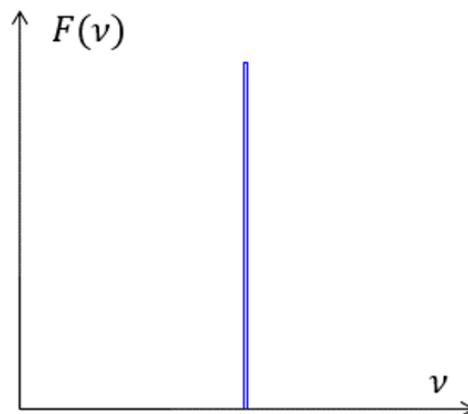
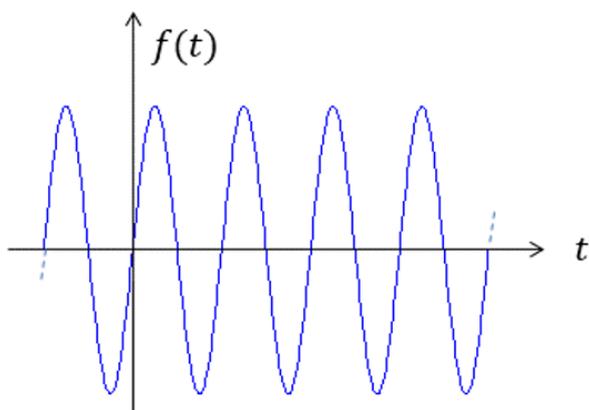
→ Portion de sinusoïde de fréquence ν et de durée τ :



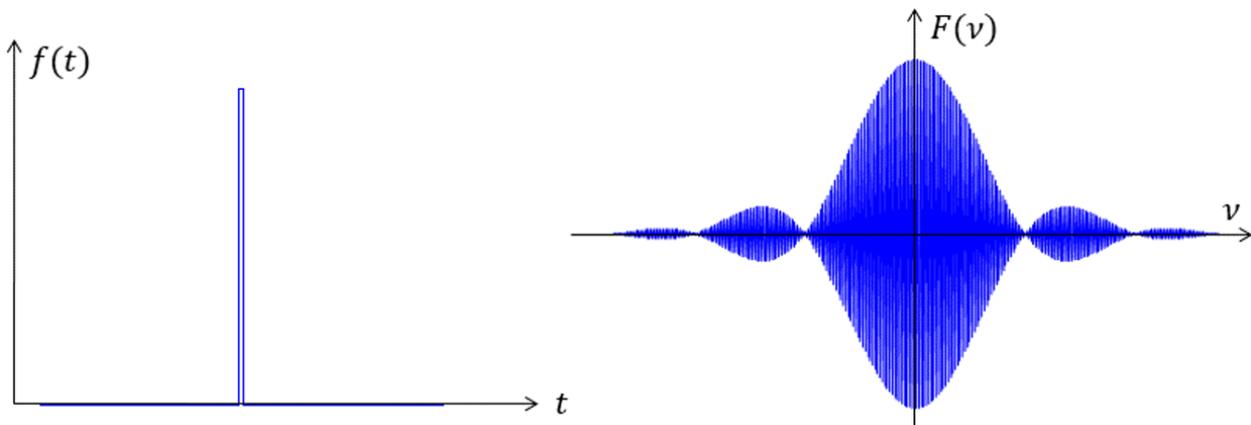
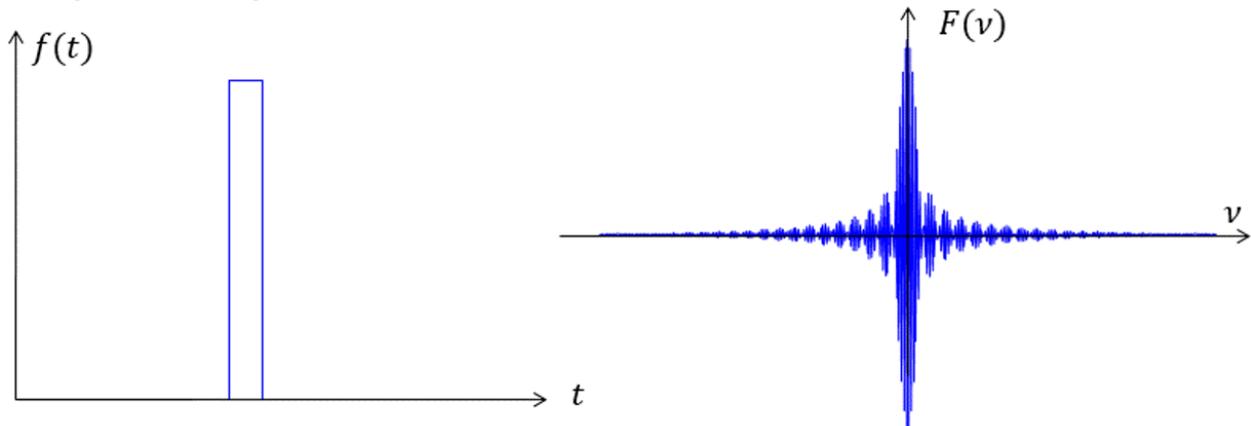
→ Portion de sinusoïde de fréquence ν et de durée $\tau' = 5\tau$:



→ Sinusoïde infinie de fréquence ν :



→ Signaux rectangulaires :



Conclusion :

Le spectre en fréquence d'un signal de durée temporelle τ a une extension fréquentielle telle que :

$$\boxed{\Delta\nu} \quad (1)$$

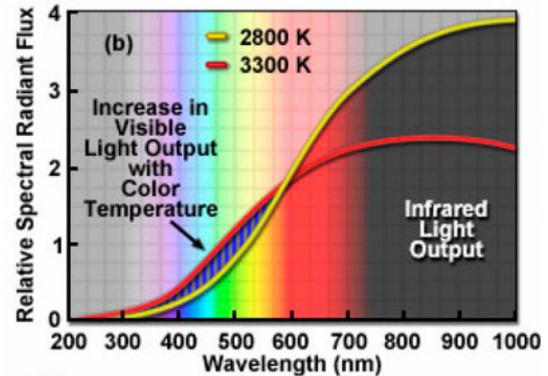
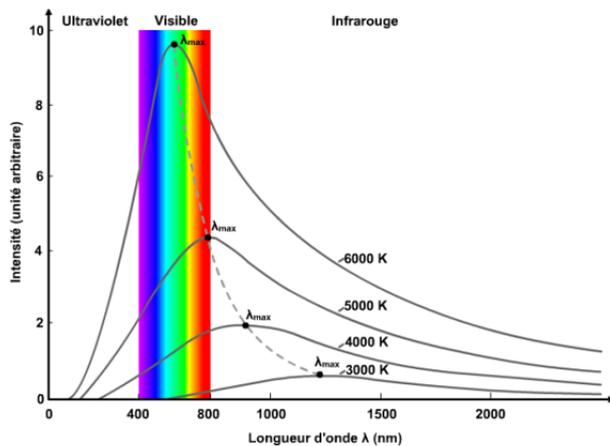
2. Sources de lumières

a. Sources de lumière blanche :

On parle de source lumière blanche lorsque le spectre contient toutes les composantes visibles du spectre de façon continue. Ces sources sont soit issues du rayonnements d'un corps noir, soit de la fluorescence.

Lampes à incandescence

Dans le Soleil ou les lampes à filament, la lumière est émise par un corps chaud, ce qui produit un spectre intrinsèquement continu. Cela est décrit par le modèle du corps noir dont le spectre est le suivant :



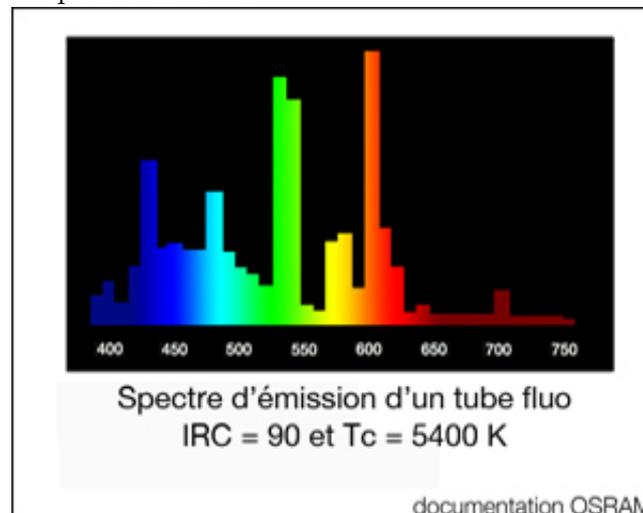
On peut écrire la loi de Wien permettant d'obtenir la température du corps chaud à partir de son spectre :

$$\lambda_{\max} T = \text{cste} \quad (2)$$

Exemple : Soleil $T = 6000 \text{ K}$, $\lambda_{\max} = 500 \text{ nm}$. Les étoiles bleues sont les plus chaudes.

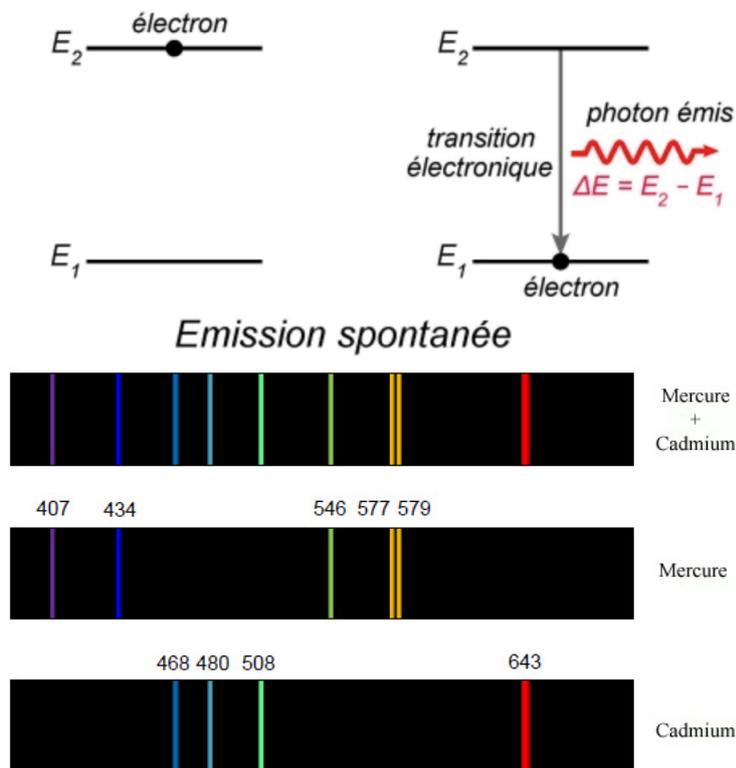
Tubes fluorescents et LEDS

Une lumière avec un spectre discret est produite par un dispositif (DEL = semi-conducteur, fluocompacte = gaz excité) puis cette lumière est absorbée par une substance fluorescente qui réémet dans le visible un spectre continu



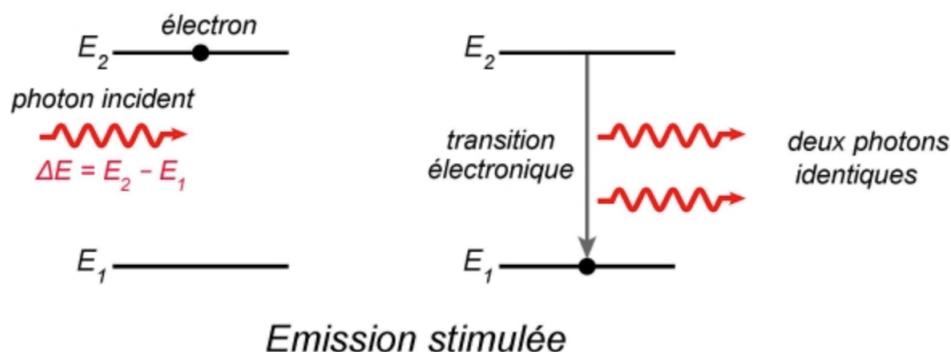
b. Lampes spectrales

Elles correspondent à l'émission de lumière par des atomes excités (par collision ou décharge électrique). Lorsque l'atome est excité, il se trouve dans un niveau d'énergie plus élevé. En se désexcitant, l'atome émet une onde électromagnétique de fréquence proportionnelle à la différence d'énergie entre les deux niveaux : $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_{12}$. Dans le cas de la désexcitation de molécules, on obtient un spectre de bandes. L'émission est dite spontanée car le processus décrit a lieu aléatoirement.



c. Les lasers :

Le fonctionnement du laser est fondé sur le principe de l'émission stimulée découvert par Einstein. Les atomes situés dans une cavité résonante sont dans un état excité. Un photon d'énergie $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu_{12}$ arrive sur un atome excité. L'atome se désexcite sous l'action du photon incident. Il émet alors un second photon. Le second photon est identique au premier (même direction, même polarisation, même phase à l'origine).



3. Le modèle du train d'onde

Dans une approche semi-classique, l'onde lumineuse est émise sous forme d'une succession de trains d'ondes.

En première approximation, les trains d'ondes sont des sinusoides tronquées de durée moyenne τ_c , nommé temps de cohérence.

On a vu, que pour un signal sinusoidal de durée τ_c , ce dernier a une spectre en fréquence de largeur $\Delta\nu$ telle que :

$$\Delta\nu \times \tau_c \simeq 1$$

On a $\Delta\nu \ll \nu_0$, avec ν_0 la fréquence de la sinusoides. Cela correspond à un intervalle de longueur d'onde dans le vide $\Delta\lambda$, avec $\Delta\lambda \ll \lambda_0$. On montre que :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta\nu}{\nu_0}$$

La phase à l'origine des trains d'ondes est aléatoire.

Définition

Le longueur de cohérence est la longueur parcourue par l'onde pendant τ_c . Il s'agit donc de la longueur du train d'onde.

Pour une onde lumineuse quasi-monochromatique :

$$\ell_c = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

Plus la raie est large, plus la longueur de cohérence est petite.

Les ordres de grandeur :

Pour un lampe à vapeur de sodium, on trouve typiquement $\ell_c \simeq \text{mm}$.

Comme $\ell_c = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$, on peut augmenter la longueur de cohérence en diminuant $\Delta\lambda$. Les phénomènes principaux responsables de l'élargissement du spectre sont :

- les collisions entre atomes ;
- l'effet Doppler.

Pour le laser hélium-néon du laboratoire, $\ell_c \sim 30 \text{ cm}$.

Source	λ_m (nm)	f (10^{14} Hz)	Δf (Hz)	τ_c (s)	ℓ_c
Lumière blanche	575	5,2	$3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{-15}$	$0,9 \mu\text{m}$
Lampe Hg haute pression	546,1	5,5	10^{12}	10^{-12}	0,3 mm
Laser He-Ne	632,8	4,74	10^9	10^{-9}	30 cm
Laser He-Ne stabilisé	632,8	4,74	10^4	10^{-4}	30 km