

# Optique

Olivier Roques

2016-2017

## 1 Généralités

**Propriété 1.1.** Classification des radiations (en longueur d'onde) :

- Moins de 5pm (soit  $< 5 \cdot 10^{-12} \text{m}$ ) : Rayon Gamma
- Entre 5pm et 10nm : Rayon X
- Entre 10nm et 380nm : Rayons UV
- 380nm et 780nm : Domaine du visible
- Entre 780nm et  $100 \mu\text{m}$  : Infrarouges
- Entre  $100 \mu\text{m}$  et 1mm : Rayon Téraherz (THz)
- Entre 1mm et 1m : Micro-ondes
- Supérieure à 1m : Ondes radio

**Définition 1.1.** Le *spectre électromagnétique* est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses différentes composantes en termes de fréquence ou encore de longueur d'onde associée. Plus précisément, le spectre  $S(\nu)$  est la densité spectrale de puissance avec  $S(\nu) = |s(\nu)|^2$  où  $s(\nu)$  représente la répartition en fréquence de l'amplitude de chaque composante.

## 2 Fibre optique

**Définition 2.1.** Un *diélectrique* est un matériau qui ne possède pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Ainsi, ce milieu ne conduit pas le courant, il est isolant.

**Définition 2.2.** Un *guide d'onde* optique est une structure diélectrique, uniforme le long d'un axe, capable de transporter de l'énergie électromagnétique à des longueurs d'onde situées dans les parties infrarouge et visible du spectre sur des distances grandes devant la longueur d'onde.

En pratique, un guide d'onde est constitué d'une région diélectrique planaire ou linéaire appelée cœur. Cette zone est entourée par un ou plusieurs milieux diélectriques dont les indices de réfraction sont inférieurs à celui du cœur afin d'assurer le confinement de l'onde par réflexion totale interne. Cette zone extérieure au cœur est appelée la gaine du guide. Le diamètre typique du cœur d'une fibre optique est de  $D_{\text{cœur}} = 9 \mu\text{m}$ .

**Définition 2.3.** La *dispersion intermodale* est le phénomène d'élargissement des créneaux du signal source dû aux trajectoires différentes qu'emprunte la lumière. Deux solutions pour s'affranchir de ce problème : fibre à gradient d'indice et fibre monomode.

**Propriété 2.1.** Les angles des rayons dont l'énergie est guidée sont quantifiés. Seuls certains sont permis. Les autres ne se propagent pas, même s'ils satisfont la condition de réflexion totale interne. Un *mode guidé* correspond donc à un angle de propagation dans le guide et une répartition transverse donnée. Un *mode transverse* est un champ qui maintient sa répartition transverse et sa polarisation suivant la direction de propagation  $z$ .

### 3 Le LASER

**Définition 3.1. LASER : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.** Un laser est constitué de trois éléments :

- Un *amplificateur de lumière* utilisant l'émission stimulée (pompage optique). Un système amplificateur est un système qui lorsqu'il est soumis à un champ de fréquence  $\omega$  et d'amplitude  $E_{in}$  fournit à sa sortie un champ  $E_{out}$  dont l'amplitude et la phase ont été modifiées :  $U_{out} = \sqrt{G} e^{i\varphi} E_{in}$ .
- Un *résonateur optique* (Cavité de Fabry-Perot).
- Un *couplage avec l'extérieur*.

**Principe de l'émission de lumière** L'émission de lumière se fait sous l'action d'une perturbation électromagnétique qui fait vibrer l'atome. On peut classer l'émission de lumière en trois domaines :

**Le rayonnement thermique** Tout corps porté à une certaine température émet des ondes EM, donc de la lumière (ampoules, Soleil, métaux en fusion...).

**La luminescence (LED)** C'est un rayonnement incohérent émis dans toutes les directions avec un spectre beaucoup plus large que celui d'un laser. Elle résulte de transitions atomiques spontanées entre deux états d'énergie discrets d'un atome.

**Le rayonnement stimulé (laser)** Si un photon traverse le milieu avec une énergie suffisante, il peut provoquer la désexcitation d'un atome qui libère alors son énergie de transition sous forme d'un photon qui possède la même phase, la même fréquence, la même polarisation ainsi que la même direction que le photon incident. Pour obtenir une majorité d'atomes excités, il faut réaliser une inversion de population : c'est le rôle du *pompage*.

**Définition 3.2.** La *cavité de Fabry-Perot* a pour rôle de faire aller et venir la lumière dans le milieu amplificateur. Elle est constituée de deux miroirs plans face à face qui réfléchissent successivement la lumière. Pour que l'onde continue à croître, il faut que le gain compense les pertes dues aux réflexions et à l'absorption du milieu et des miroirs, donc  $G_{A/R} = P_{A/R}$ . De plus, il faut qu'une onde ayant décrit un aller-retour puisse se retrouver en phase avec elle-même, donc  $\varphi_{A/R} = 2k\pi$ .

**Propriété 3.1.** Les propriétés du faisceau laser sont :

- **Localisation spatiale de l'énergie lumineuse** : toute la puissance lumineuse peut être concentrée dans un mode de propagation. C'est ce que l'on appelle la *cohérence spatiale*.
- **Localisation temporelle de l'énergie lumineuse** : la durée des impulsions de lumière produites peuvent être réduites à quelques femtosecondes.

- La monochromaticité de son rayonnement.
- La lumière peut être polarisée.

## 4 Diffraction

**Principe de Huygens-Fresnel** Si un point  $M$  reçoit une onde d'amplitude  $E(M, t)$ , alors on peut considérer qu'il réémet une onde sphérique de même fréquence, même amplitude et même phase que l'onde incidente au point considéré. Tous les points d'une même surface éclairée par une même onde plane réémettent des ondes cohérentes entre elles.

**Amplitude complexe  $U(P)$  en un point  $P$  de l'espace**  $M(x, y)$  est un point de l'écran diffractant,  $P(X, Y)$  est un point du plan d'observation,  $U_0(M)$  est l'amplitude complexe de l'onde en  $M$  et  $Q(M)$  est le facteur d'inclinaison. On a alors  $U(P) = \iint_{\text{Surface de l'écran}} U_0(M)Q(M) \frac{e^{-i\vec{k}\cdot\vec{r}}}{r} dS$ .

### Hypothèses et approximations nécessaires

- Illumination monochromatique dans un milieu linéaire, isotrope, homogène et permanent
- $P$  est très éloigné de l'écran mais proche de l'axe :  $Q(M)$  constant.
- **Approximation de Fresnel** : Consiste à considérer l'ouverture diffractante  $D$  petite devant  $r$  et  $L$  ainsi que les angles petits.
- **Approximation de Fraunhofer** : On regarde le phénomène de diffraction à l'infini. Donc  $L \gg \frac{2\pi(x^2+y^2)}{2\lambda}$  d'où  $e^{-\frac{ik(x^2+y^2)}{2L}} \approx 1$ .

Ainsi  $U(P)$  devient, en considérant la répartition du champ  $T$  à l'infini,

$$T(X, Y) = \frac{e^{-ikL}}{i\lambda L} e^{-\frac{ik}{2L}(X^2+Y^2)} \iint_{\text{Tout l'espace}} E_{\text{incident}}(x, y)t(x, y) e^{\frac{ik}{L}(xX+yY)} dS$$

On pose alors  $u = \frac{X}{\lambda L}$  et  $v = \frac{Y}{\lambda L}$  appelées *fréquences spatiales* qui représentent un angle dépendant de la longueur d'onde : plus la fréquence spatiale est élevée, plus l'angle est important. On reconnaît alors une *transformée de Fourier* à deux dimensions :  $T(u, v) \propto \text{TF}[E_{\text{incident}}(x, y)t(x, y)]$ . Ainsi la diffraction (ou la répartition du champ complexe) correspond à la transformée de Fourier du champ après l'écran diffractant. La TF s'effectue du domaine de l'espace  $(x, y)$  au domaine des fréquences spatiales  $(u, v)$ .

**Diffraction par une lentille** Une lentille convergente éclairée par une onde plane (dont les faisceaux se croisent à l'infini) focalise tous les rayons dans son plan focal image en un point. Une lentille ramène donc la diffraction à l'infini dans son plan focal image : on considère qu'une lentille convergente effectue une transformée de Fourier de la répartition du champ complexe depuis son plan focal objet vers son plan focal image.

### Méthode : diffraction par une lentille convergente

1. Dans le plan focal objet, en coordonnées  $(x, y)$  :
  - (i) Exprimer le champ incident.
  - (ii) Exprimer la transmittance de l'objet diffractant.
  - (iii) En déduire l'expression du champ en sortie de l'écran diffractant.
2. Dans le plan focal image :
  - (i) Calculer l'expression du champ diffracté dans le plan focal image par transformé de Fourier du champ précédent (coordonnées  $(u, v)$ ).
  - (ii) En déduire l'expression du champ diffracté dans le plan focal image, en coordonnées spatiales  $(X, Y)$ .
  - (iii) En déduire l'intensité diffractée dans le plan focal image (coordonnées  $(u, v)$  ou  $(X, Y)$ ).

### Propriétés générales reliant l'écran diffractant et la figure de diffraction

- Si on **dilate** / **contracte** les coordonnées dans l'espace direct, ce qui revient à multiplier par  $a$  et  $b$  les dimensions de l'ouverture, on observe inversement une **contraction** / **dilatation** de l'espace spectral et un changement de l'amplitude du spectre résultant.
- Une **translation** de la fonction  $t(x, y)$  dans le plan focal objet se traduit par la **multiplication** de l'amplitude de la figure de diffraction par un **terme de phase**.

**Définition 4.1.** Le produit de convolution de deux fonctions  $f$  et  $g$  vaut  $(f * g)(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(x-t) dt$ . La TF d'un produit de convolution de deux fonctions est égale au produit simple des TF et réciproquement :  $\text{TF}[(f * g)(x)] = \text{TF}[f(x)] \times \text{TF}[g(x)]$  et  $\text{TF}[(f \times g)(x)] = \text{TF}[f(x)] * \text{TF}[g(x)]$ .

### Lien entre variation d'intensité dans une image et fréquences spatiales

- Les **variations rapides** comme par exemple les contours d'un objet, les détails, les rayures seront représentées sur l'écran de diffraction par de l'énergie lumineuse loin de l'axe optique.
- Les **variations lentes**, les couleurs uniformes et la valeur moyenne de l'image seront représentées par de l'énergie lumineuse proche de l'axe.