

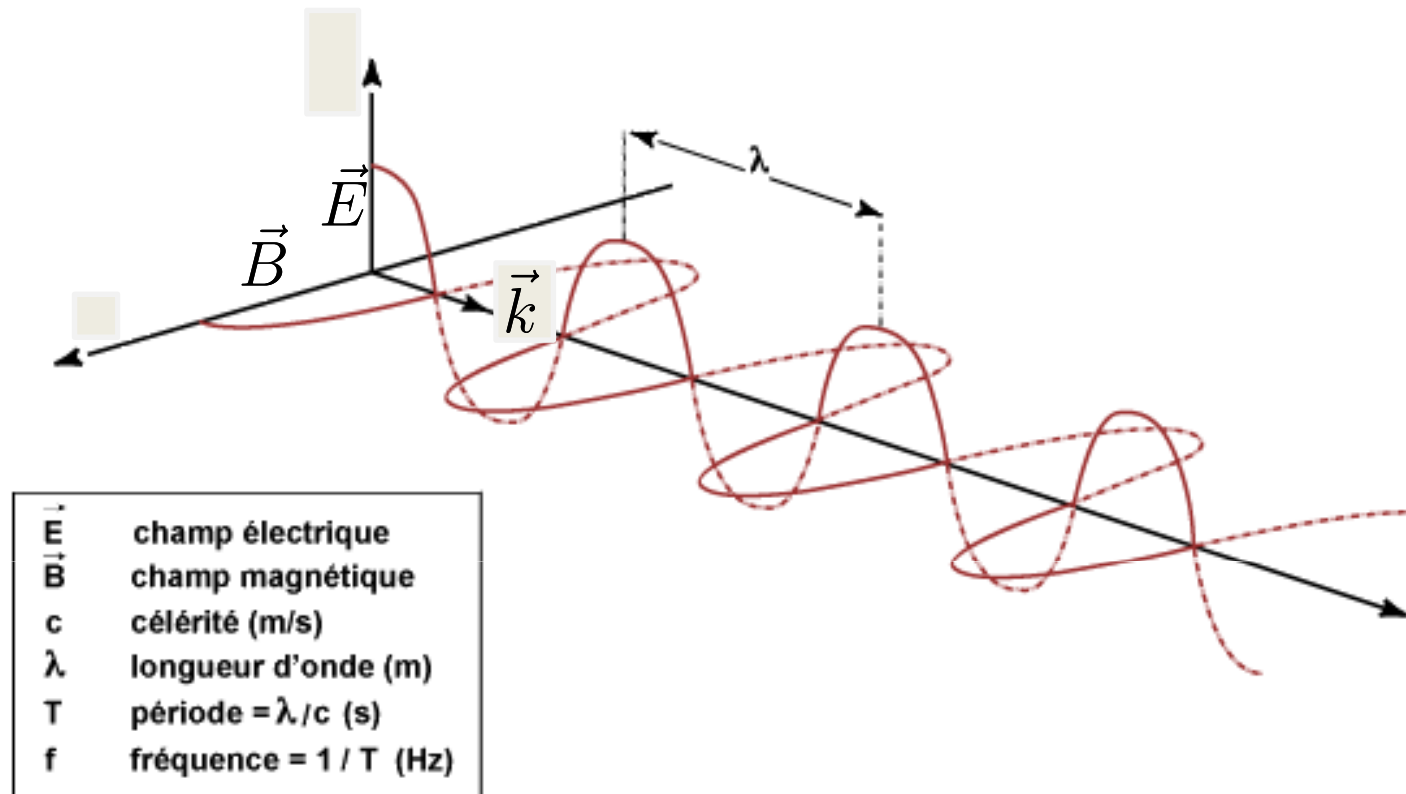
# Principes de base de l'optique

Nicolas Sandeau  
Maître de Conférences



ANbioΦ

# Une onde électromagnétique



Amplitude

Phase

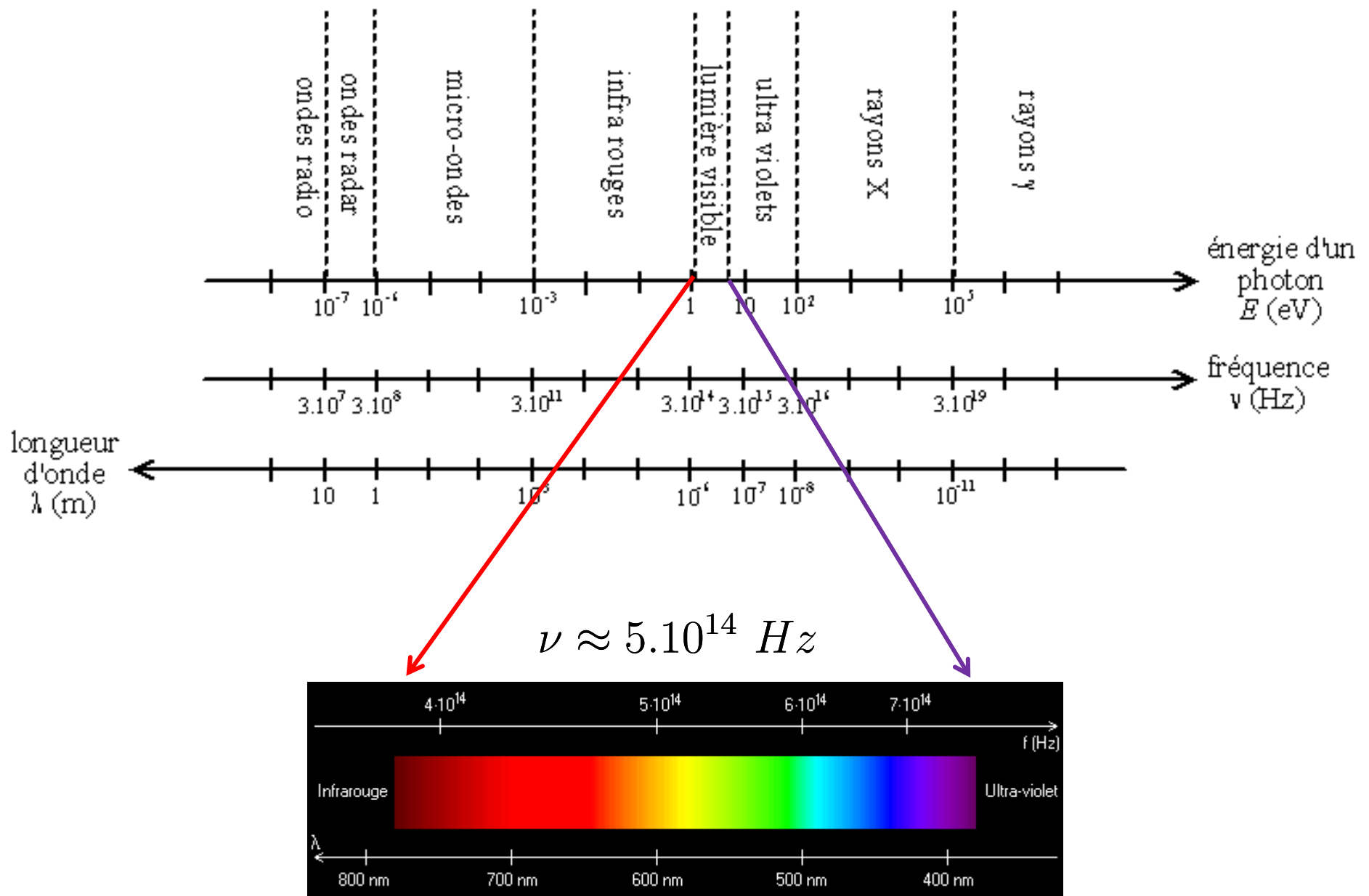
Polarisation

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{e}$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{b}$$

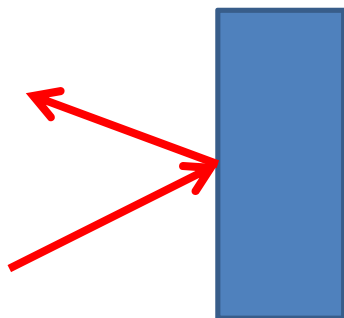
$$k = n \frac{2\pi}{\lambda} = n \frac{\omega}{c}$$

# Les gammes spectrales

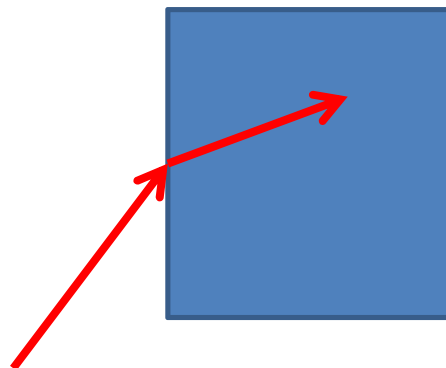


# Interaction lumière-matière

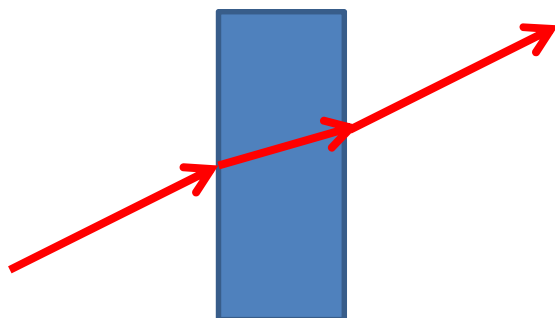
réflexion



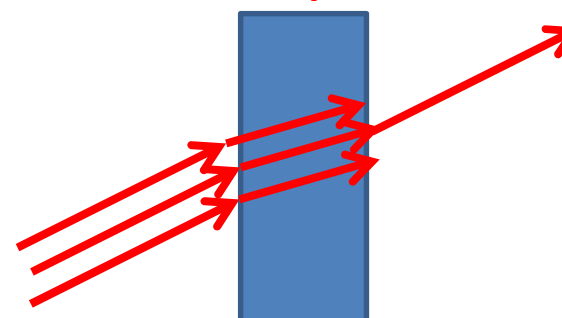
réfraction



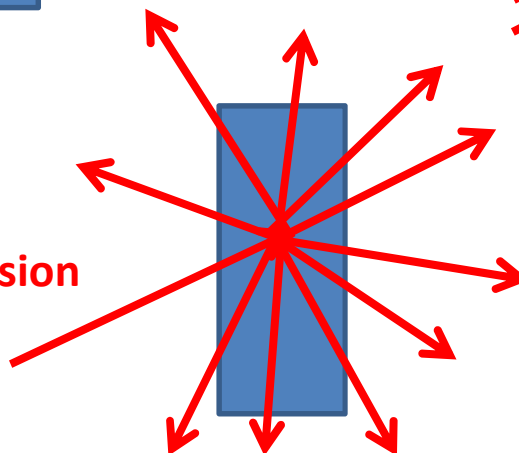
transmission



absorption



diffusion



# Les sources

# Les sources

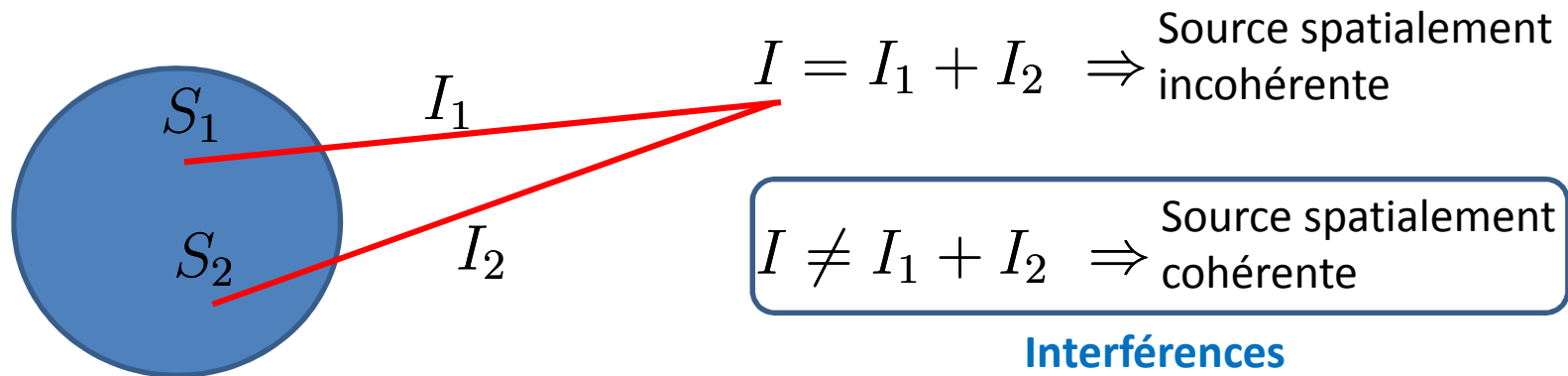
Deux types :

- Les sources spatialement **cohérentes**

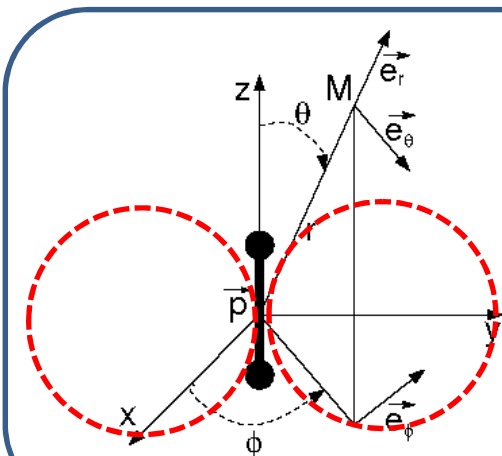
Lasers, émetteurs ponctuels, émetteurs cohérents...

- Les sources spatialement **incohérentes**

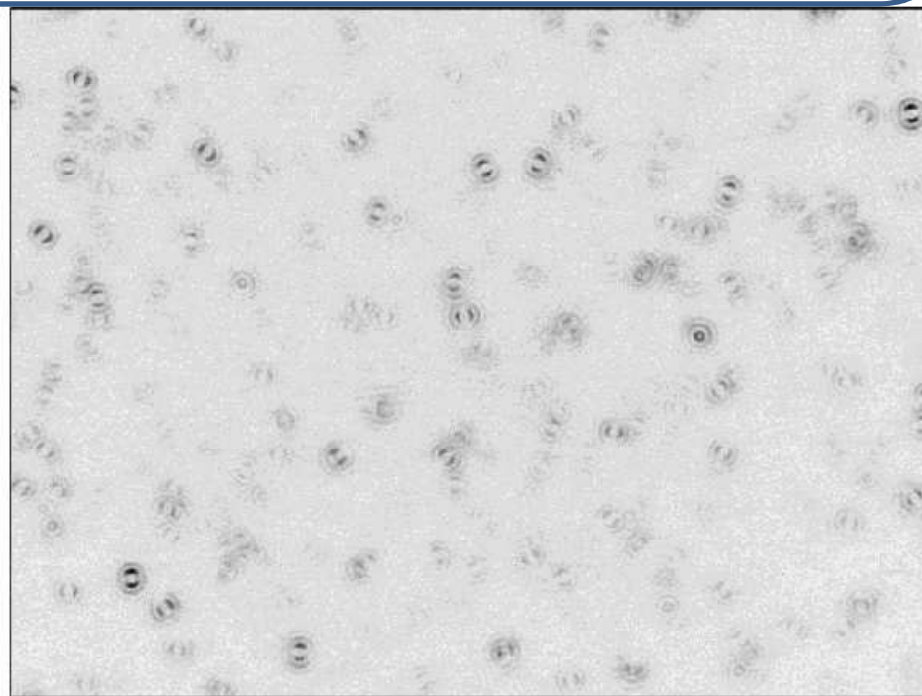
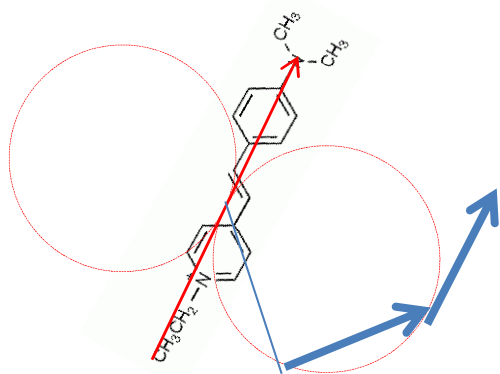
Lampes blanches (thermiques), « spectrales », objets luminescents



# Les sources élémentaires



$$\vec{E} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{-k^2 p_0 \sin\theta}{r} \right) \exp(ikr) \vec{e}_\theta$$



# Les sources

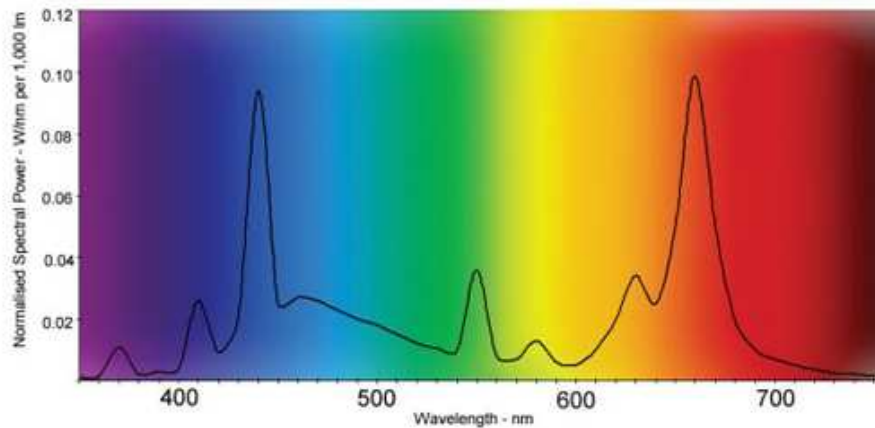
Lampe blanche



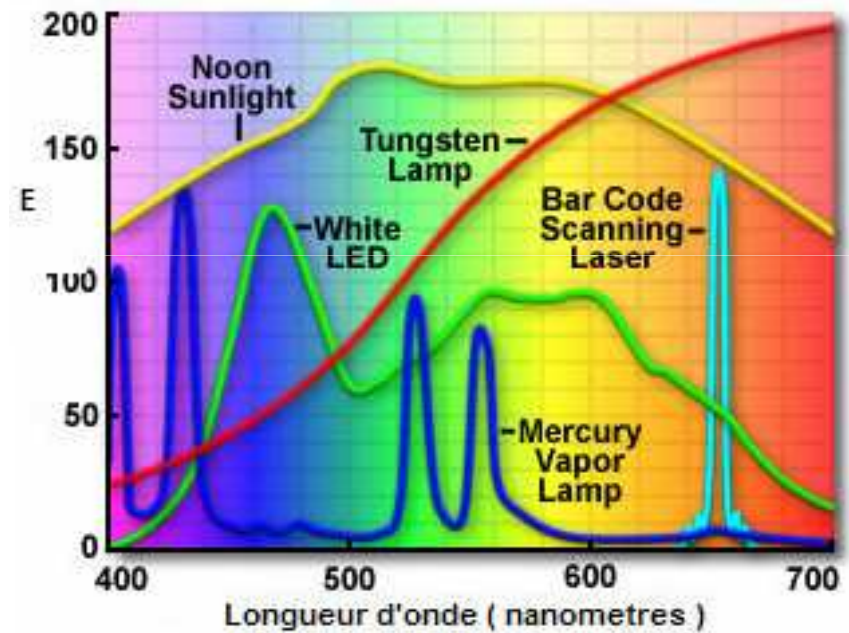
Lampe spectrale (Hg)



Tube néon



Spectre d'émission des sources lumineuses visibles



# Les LASERs

**Les Lasers continus** caractérisés par:

- la puissance moyenne en W
- la (les) longueur d'onde (nm)

Il existe des lasers solides (+petits), à gaz...

**Les Lasers impulsions** caractérisés par:

- durée d'impulsion (s)
- l'énergie (J) ou (la puissance moyenne)
- fréquence de répétition (Hz)...

Ils sont généralement accordables en  $\lambda$ .

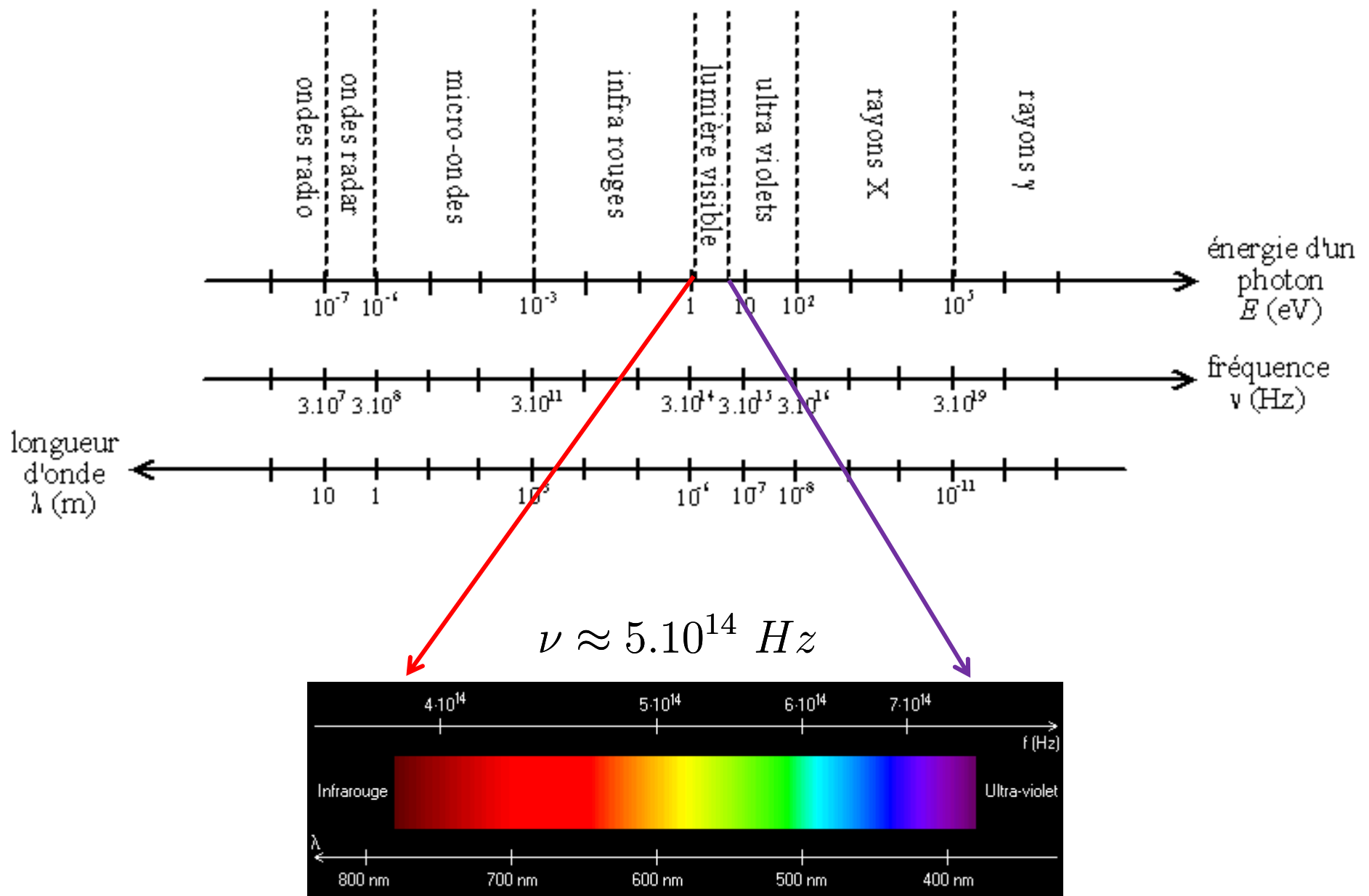
Une durée d'impulsion courte  $\Rightarrow$  un spectre large

$$\Delta\lambda\Delta t \propto \frac{\lambda_0^2}{c}$$

$$\begin{aligned} \text{Ex: } \lambda_0 &= 900 \text{ nm} & \Rightarrow \Delta\lambda &= \frac{(9 \cdot 10^{-7})^2}{3 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-13}} = 27 \text{ nm} \\ \Delta t &= 100 \text{ fs} \\ f &= 100 \text{ MHz} & \Rightarrow P_i &= \frac{P_m}{f\Delta t} = 100 \text{ kW} \\ P_m &= 1 \text{ W} \end{aligned}$$

# La détection

# Les gammes spectrales



# La détection

$$\nu \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Les détecteurs dans le visible (IR & UV proches) sont sensibles à l'intensité.

$$I \propto \frac{1}{T} \int_T \|\vec{E}\|^2 dt$$

- |                       |                       |                                       |
|-----------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| • L'œil               | T=20 à 100 ms         | ⇒ moyenne sur $\sim 10^{13}$ périodes |
| • Capteurs classiques | T $\approx$ 1 $\mu$ s | ⇒ moyenne sur $\sim 10^8$ périodes    |
| • APD & PM de qualité | T $\approx$ 1 ns      | ⇒ moyenne sur $\sim 10^5$ périodes    |
| • Streak Camera       | T $\approx$ 1 ps      | ⇒ moyenne sur $\sim 10^2$ périodes    |

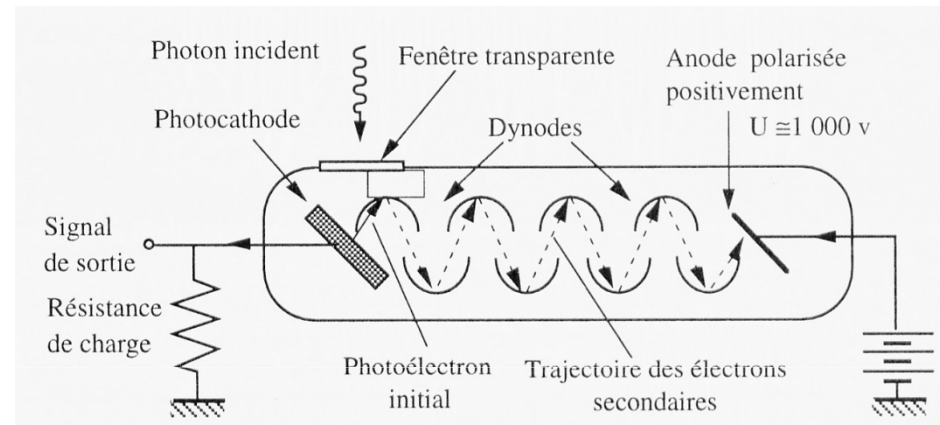
Les détecteurs ne sont donc pas sensibles aux oscillations des champs mais à  $E_0^2$ .  
perte de la phase

Comment mesurer le spectre? la polarisation?

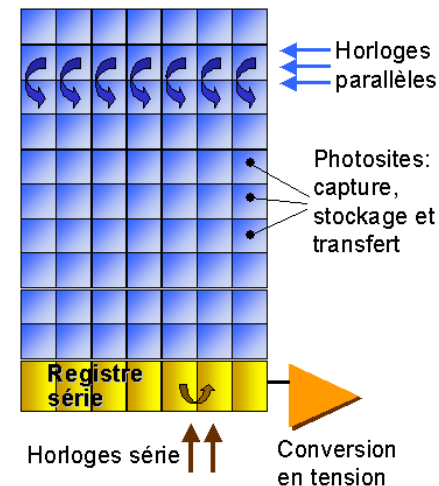
# Les détecteurs

Deux catégories:

- Les détecteurs ponctuels : Photodiode, APD, PM...



- Les imageurs (multi-pixels): CCD, CMOS...



# Les détecteurs- APD / PM

## Caractéristiques:

- Rendement quantique
- Bruit quantique /électronique
- Gamme de sensibilité spectrale
- Rapidité
- Dynamique
- temps d'obscurité (APD)
- transfert de l'image (CCD)...

## Mode de fonctionnement:

- Analogique
- comptage de photons

# Les détecteurs- APD / PM

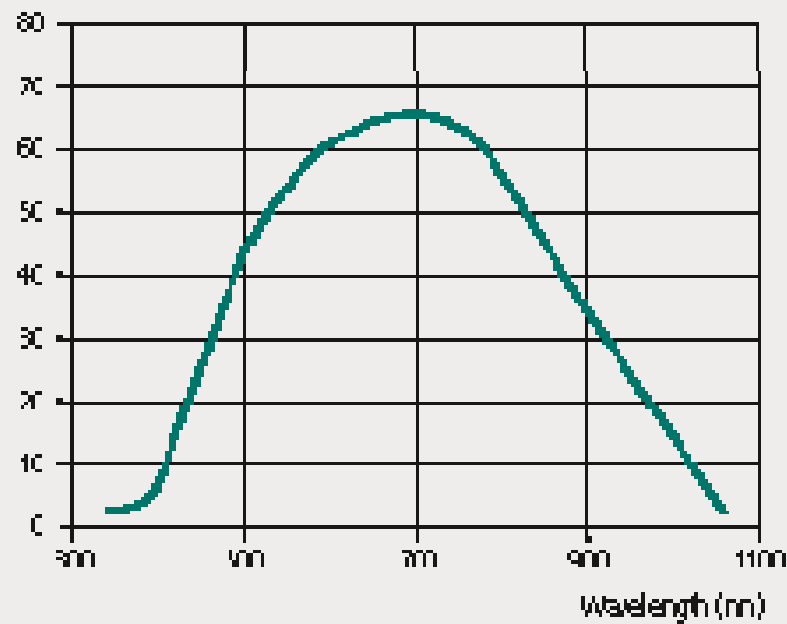
APD



PM

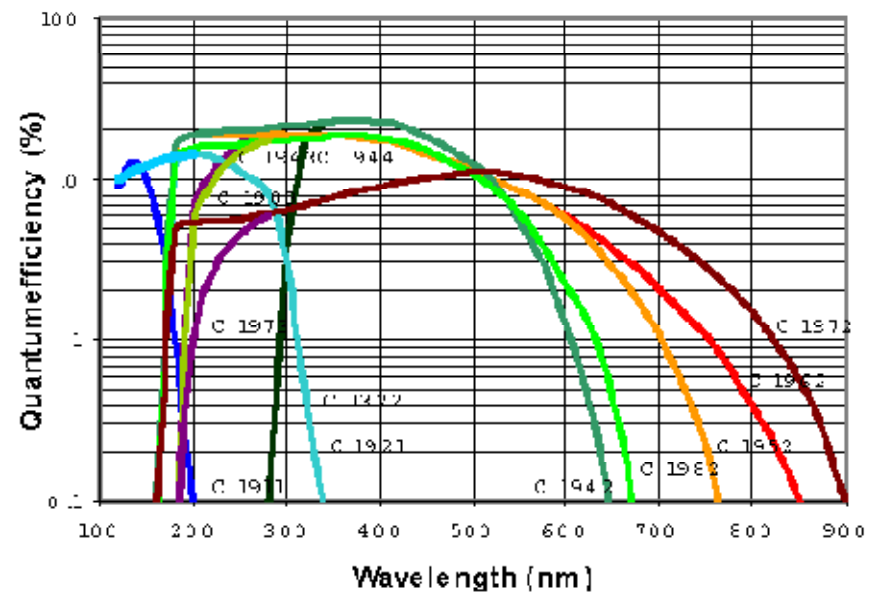


Photon Detection Efficiency (Pd)



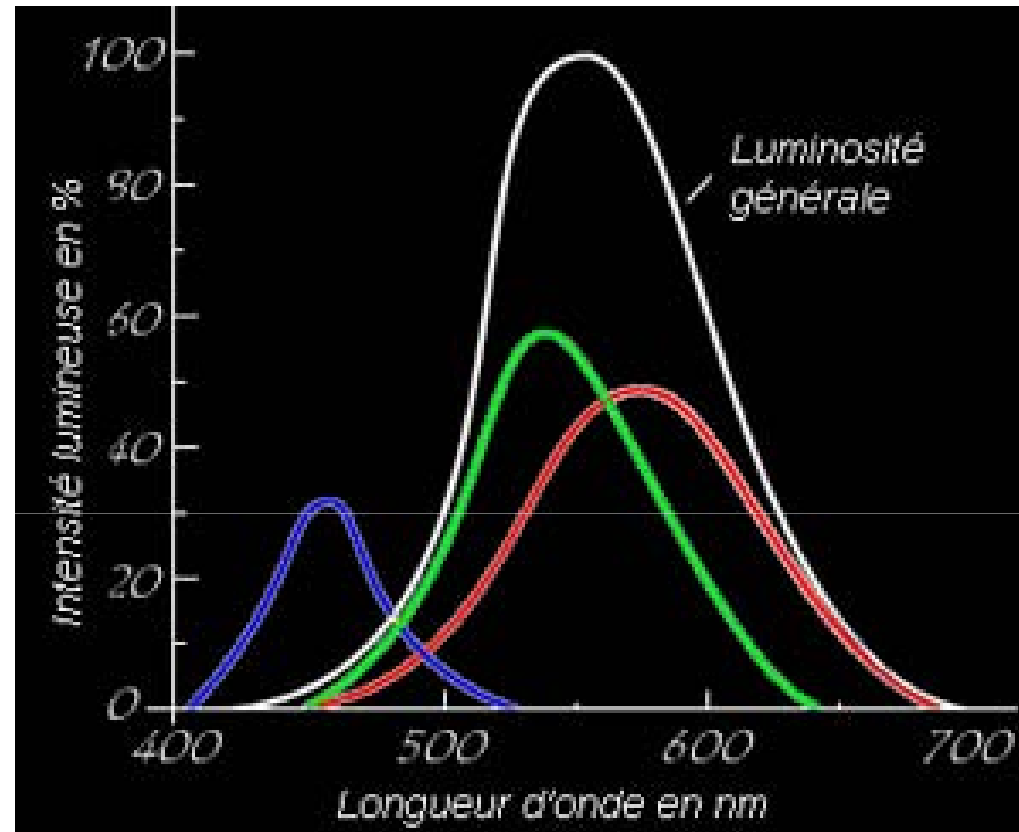
65% de rendement mais qq ns d'obscurité

Spectral response



20% de rendement mais pas de temps d'obscurité

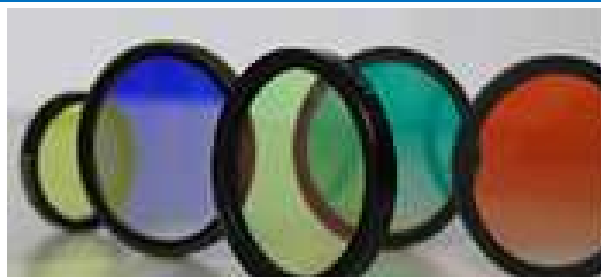
# La perception des couleurs (l'œil)



**Nos 3 cônes se comportent comme 3 détecteurs sensibles dans des gammes différentes. Le cerveau en déduit la couleur!**

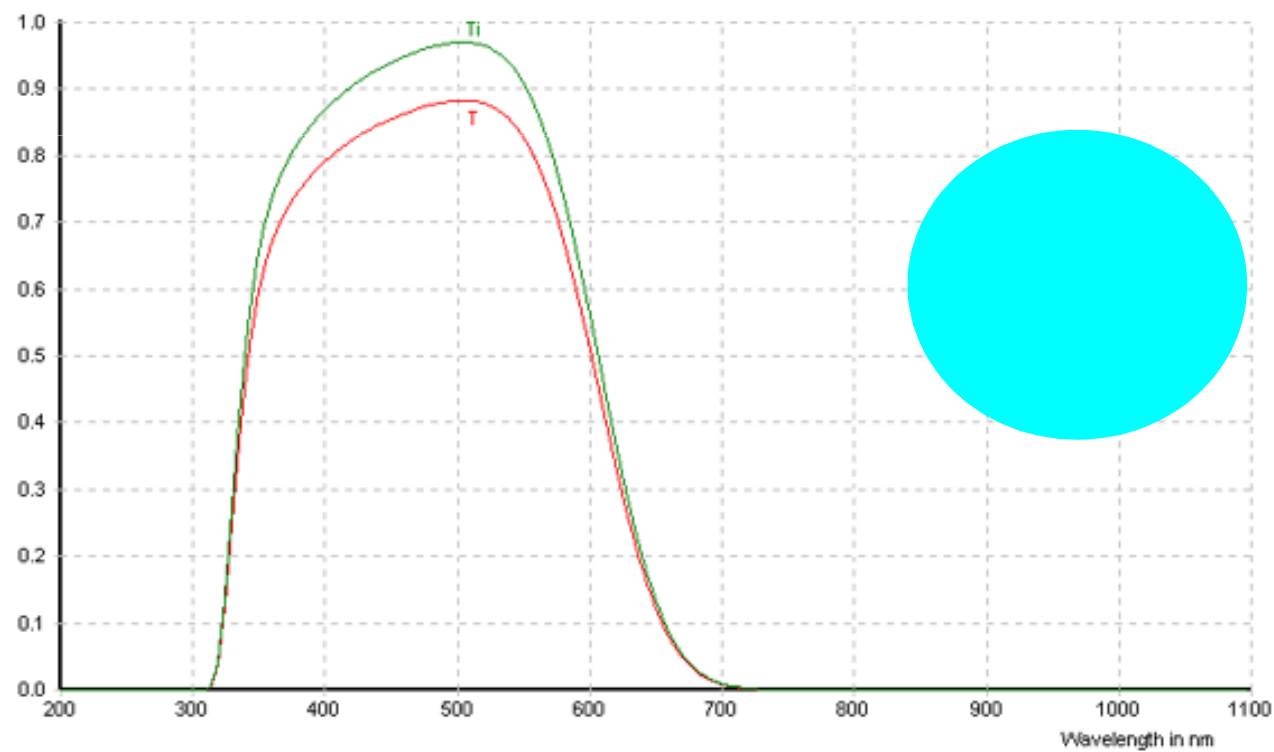
# **Analyses spectrales**

# Les filtres absorbants



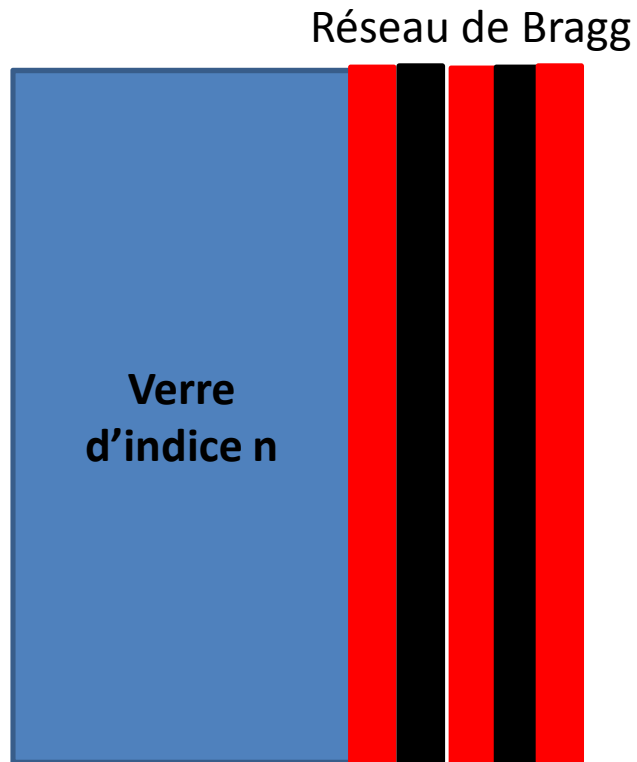
Thickness in mm : 1.0  
Wavelength in nm :  
Transmittance :  
Internal Transmittance :

BG39

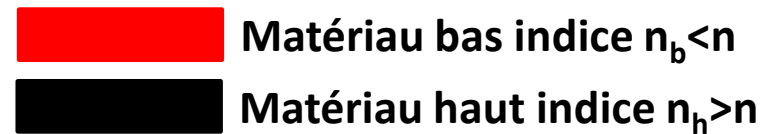


Filtre qui nous apparait de couleur Cyan

# Les filtres diélectriques (couches minces)



$$R+T=1$$



Intérêts:

- n'absorbe pas donc ne chauffe pas!
- filtres complexes
- Filtre très efficaces

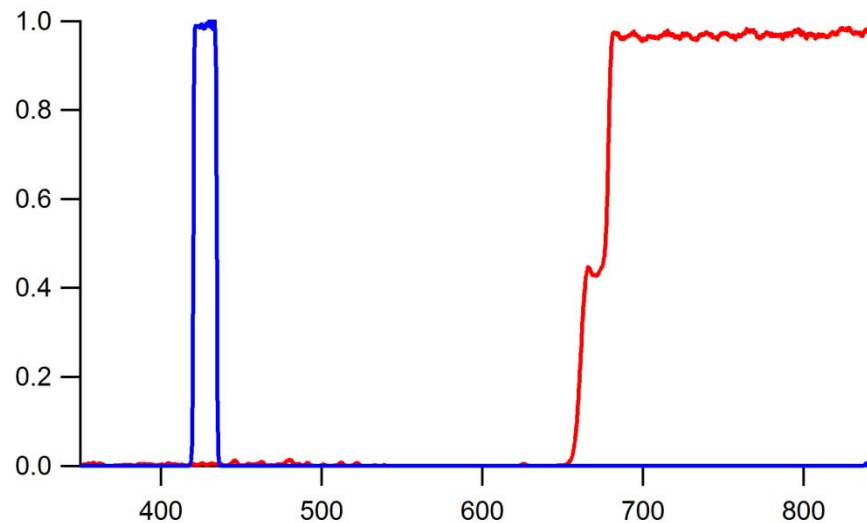
# Les filtres diélectriques (couches minces)

## Trois types d'utilisations:

- Miroirs très efficaces  $R=0,999$
- Antireflets  $R=0,01$

- Miroirs dichroïques à  $45^\circ$

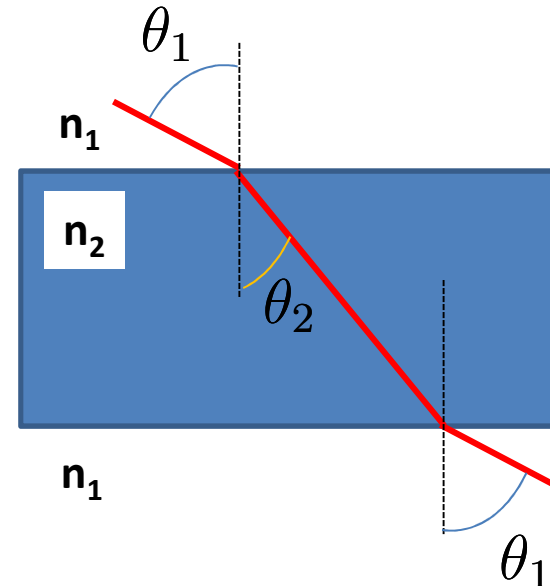
- Filtres  $T$



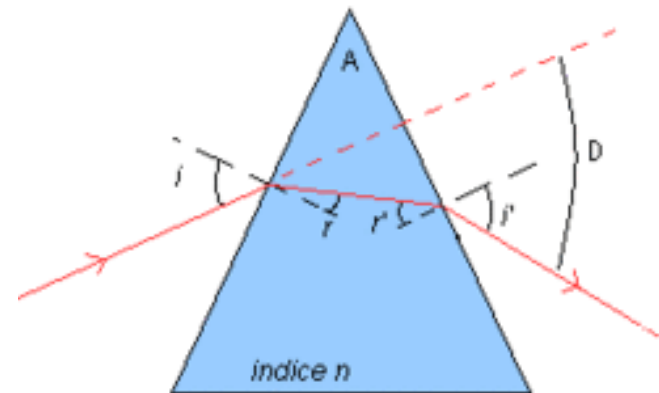
# Les prismes

**Loi de Descartes:**

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



**Le prisme:**

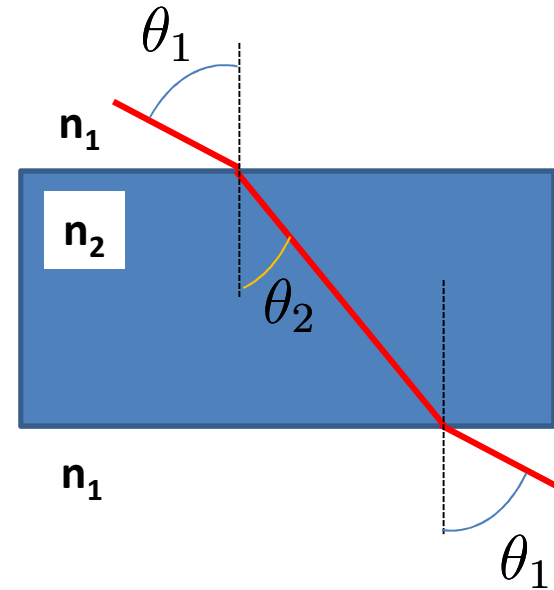


$$D = i + \arcsin \left[ n \cdot \sin \left( A - \arcsin \frac{\sin i}{n} \right) \right] - A$$

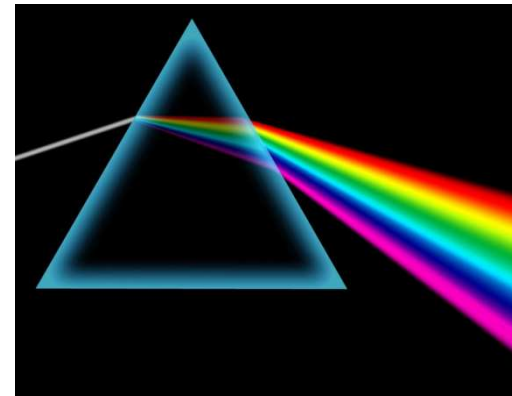
# Les prismes

**Loi de Descartes:**

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

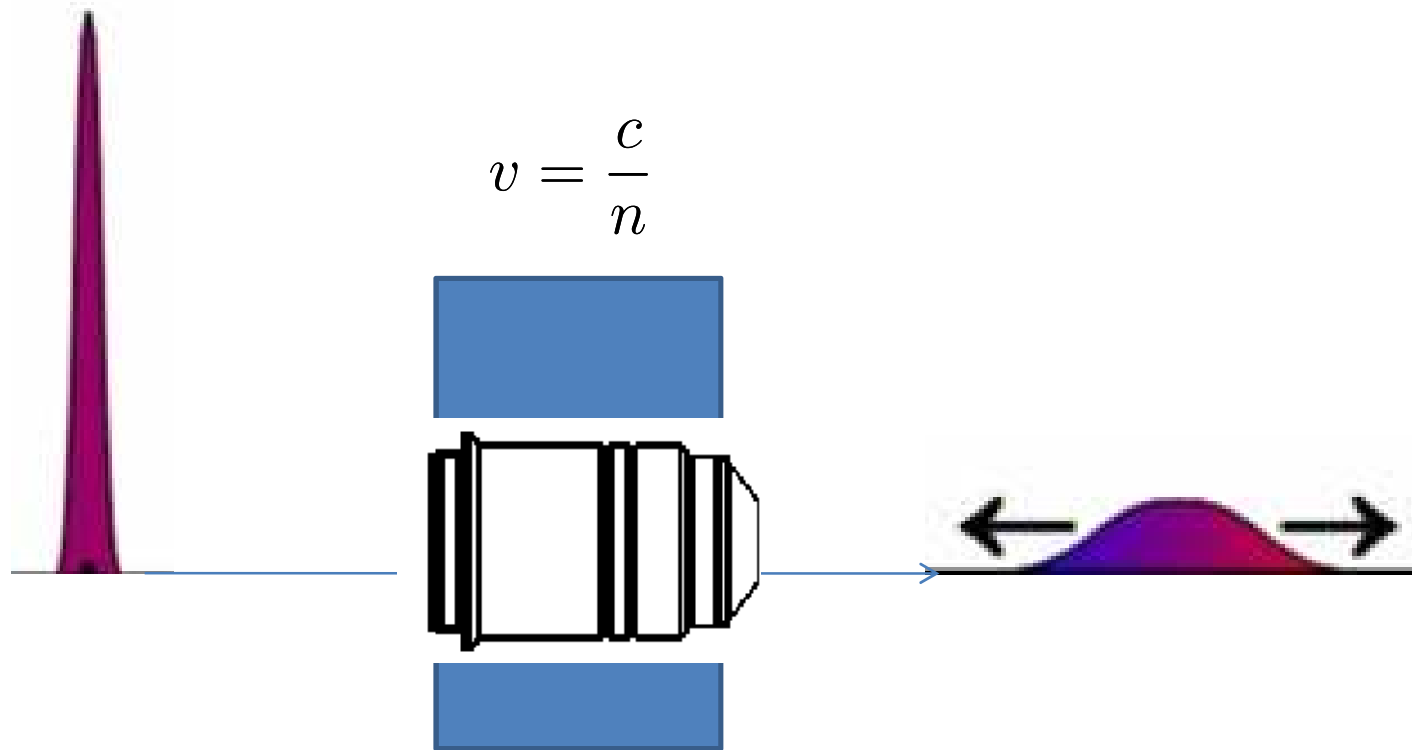


**Dispersion chromatique:  $n(\lambda)$**



$$D = i + \arcsin \left[ n(\lambda) \cdot \sin \left( A - \arcsin \frac{\sin i}{n(\lambda)} \right) \right] - A$$

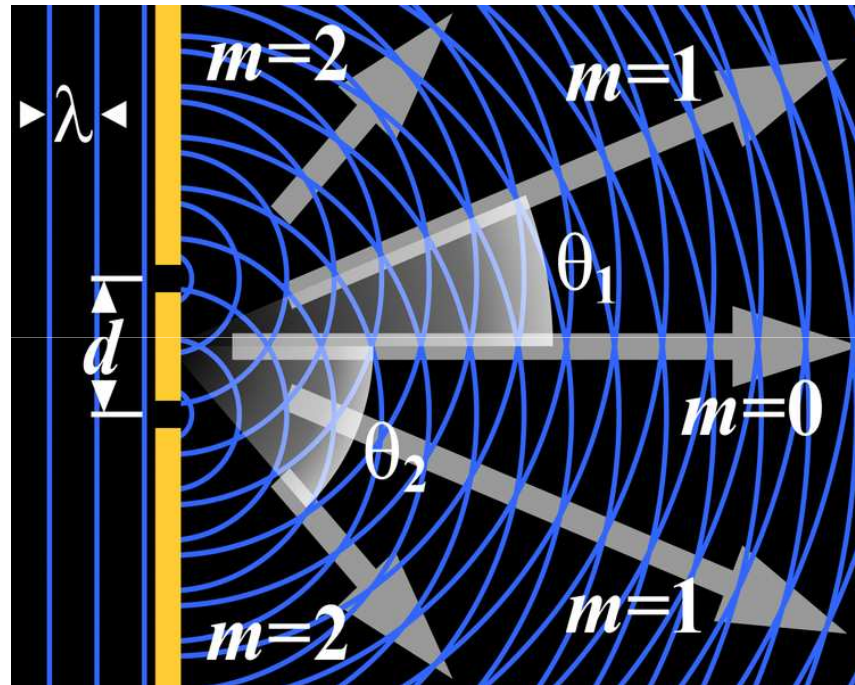
# Dispersion et impulsions courtes



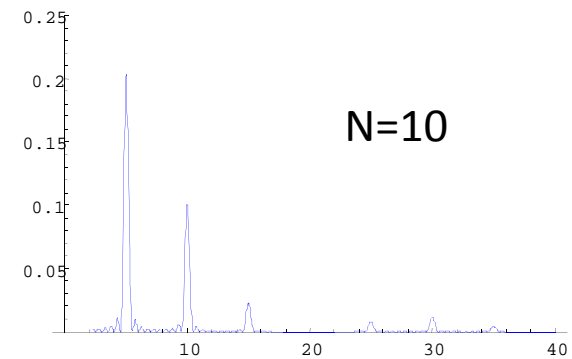
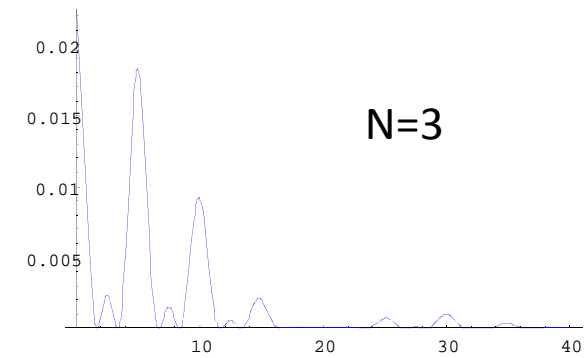
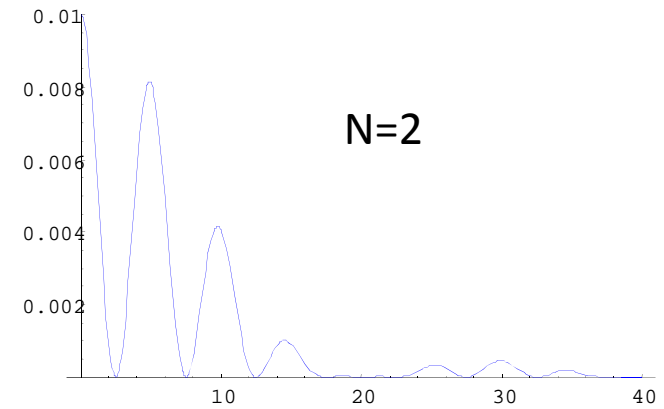
Ex:  $\lambda_0 = 900 \text{ nm}$   
 $\Delta t = 100 \text{ fs}$

$$\Rightarrow \Delta\lambda = \frac{(9 \cdot 10^{-7})^2}{3 \cdot 10^{-8} \cdot 10^{-13}} = 27 \text{ nm}$$

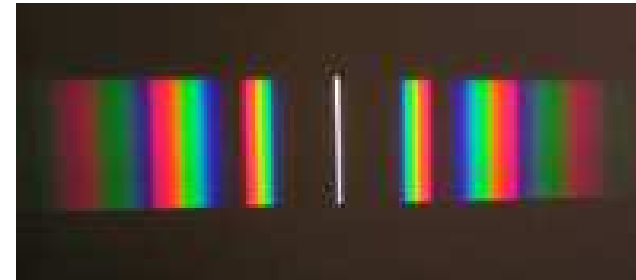
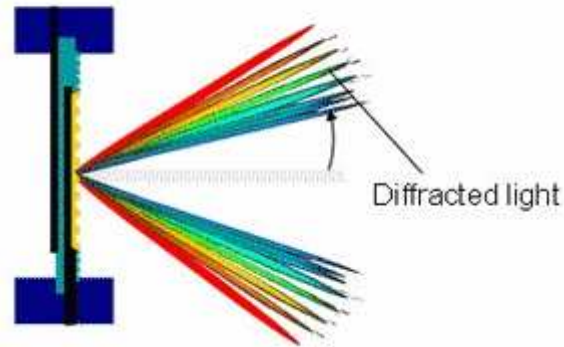
# Diffraction par N fentes



$\lambda$  fixée



# Les réseaux (diffraction)



## Formule du réseau en réflexion

$$n_1 \sin r = -n_1 \sin i + m \frac{\lambda}{a}$$

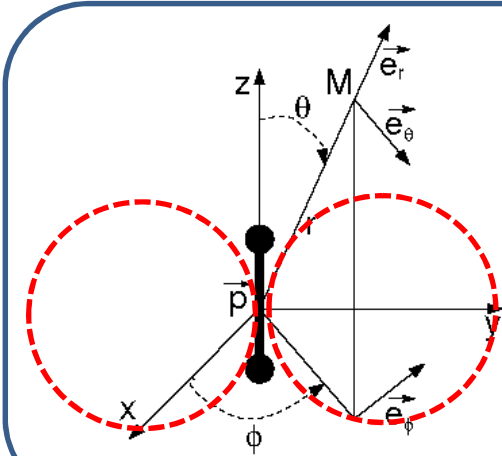
$m$  → ordre

## Formule du réseau en transmission

$$n_2 \sin t = n_1 \sin i - m \frac{\lambda}{a}$$

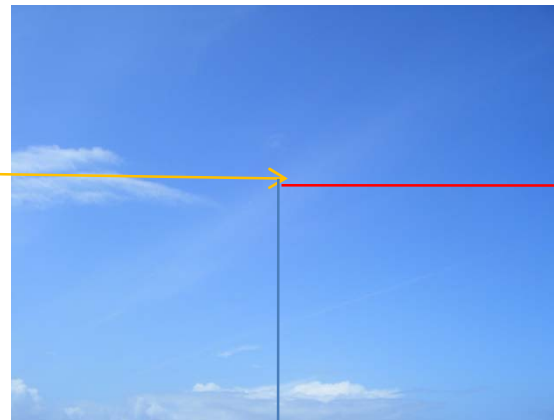
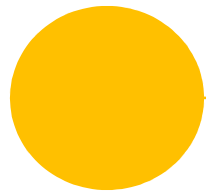
$a$  → distance entre les traits

# La diffusion de Rayleigh



$$\vec{E} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{-k^2 p_0 \sin\theta}{r} \right) \exp(ikr) \vec{e}_\theta$$

$$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$$



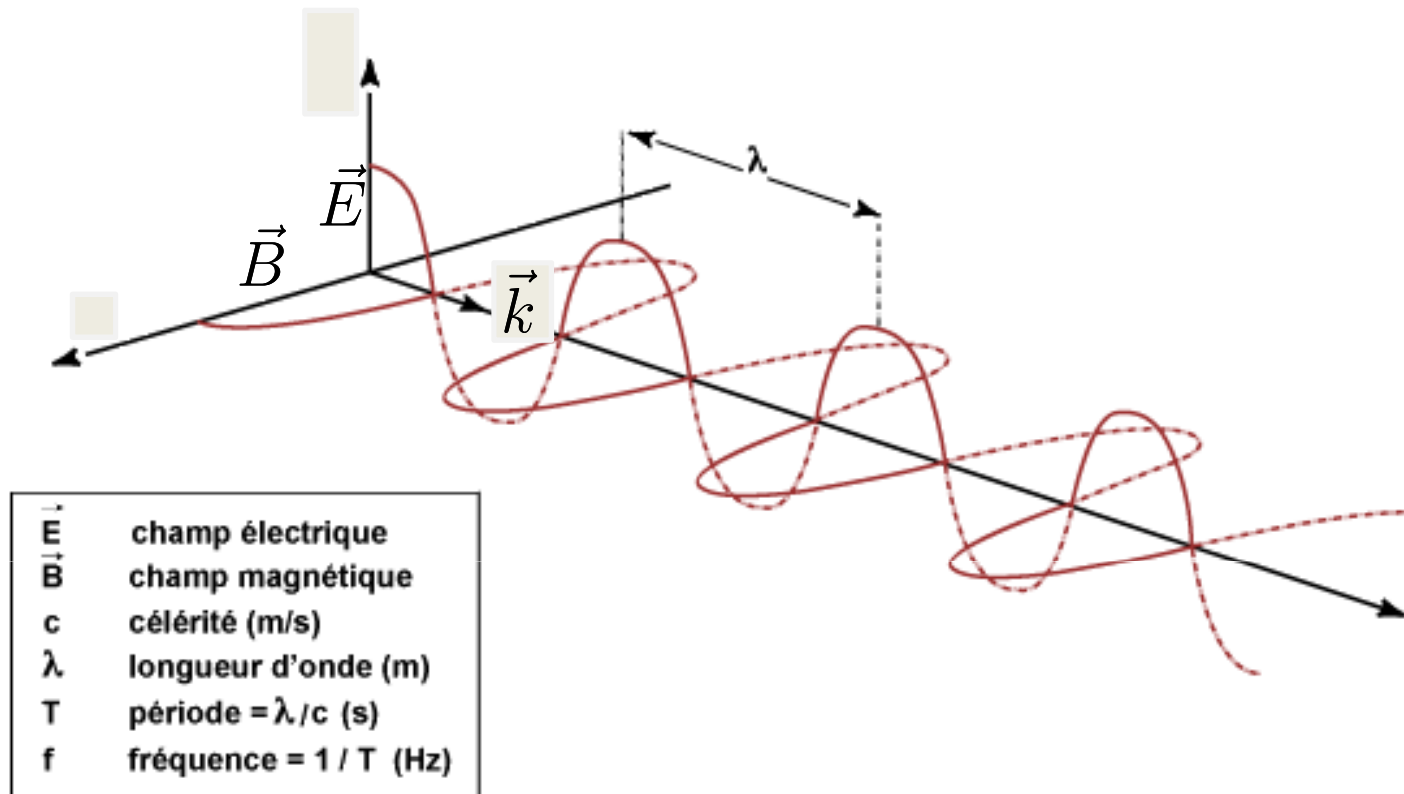
rouge

bleu



# **Polariseurs et polarisations**

# Une onde électromagnétique



Amplitude

Phase

Polarisation

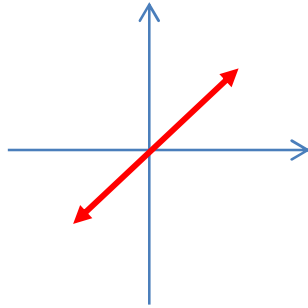
$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{e}$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{b}$$

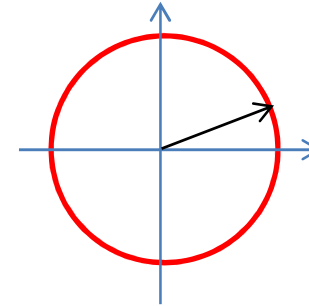
$$k = n \frac{2\pi}{\lambda} = n \frac{\omega}{c}$$

# Les polarisations

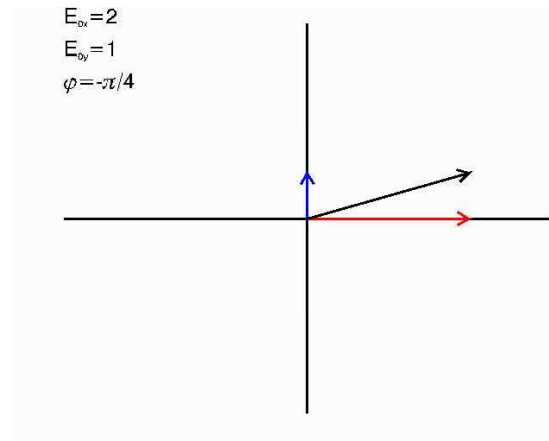
Polarisation rectiligne



Polarisation circulaire

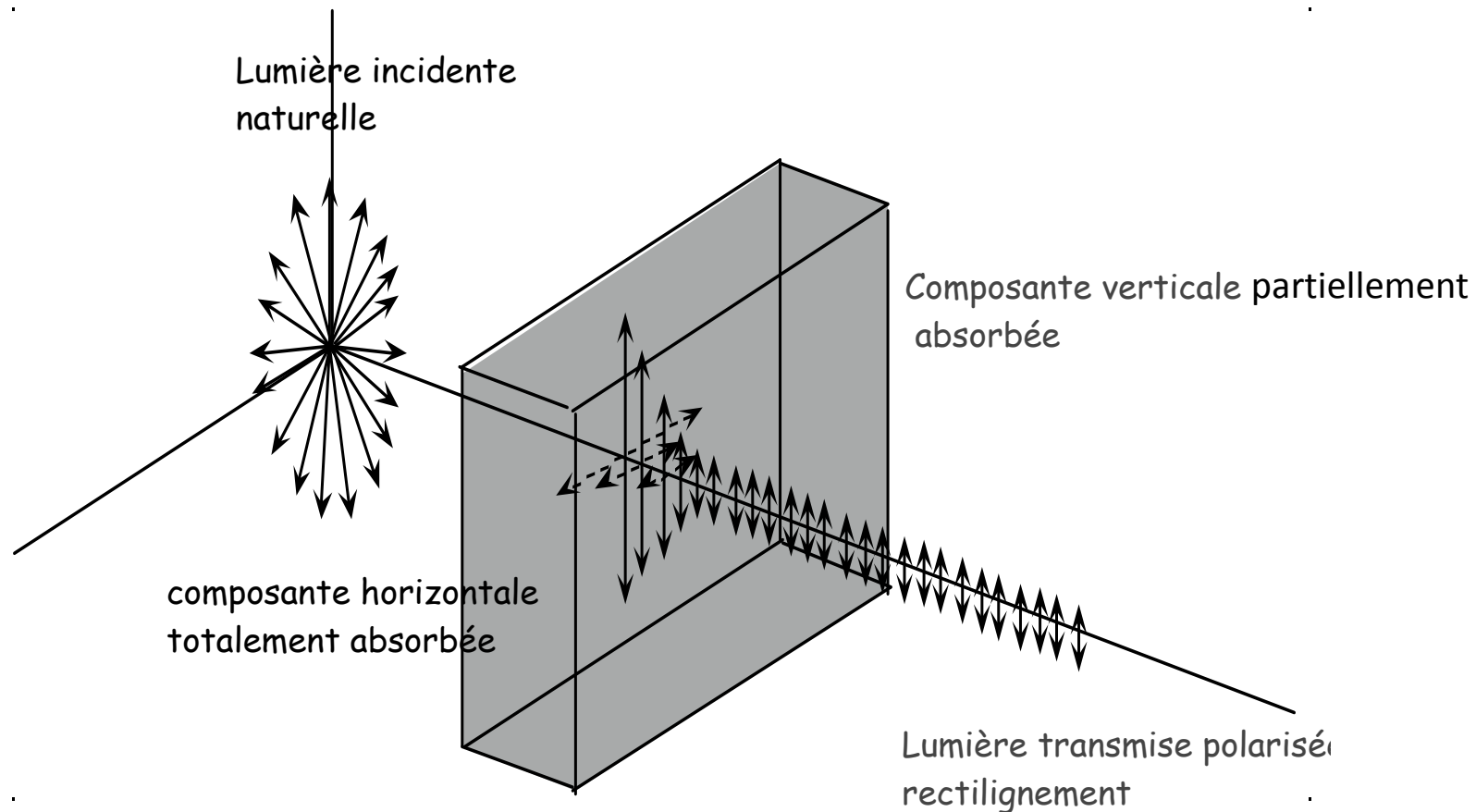


Polarisation elliptique



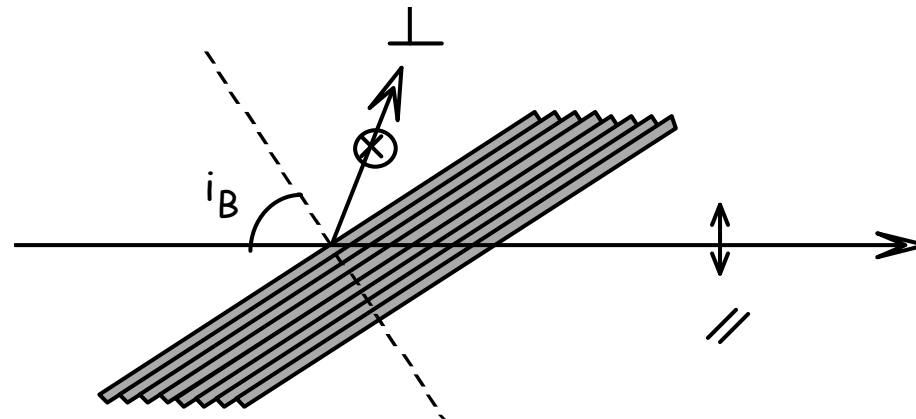
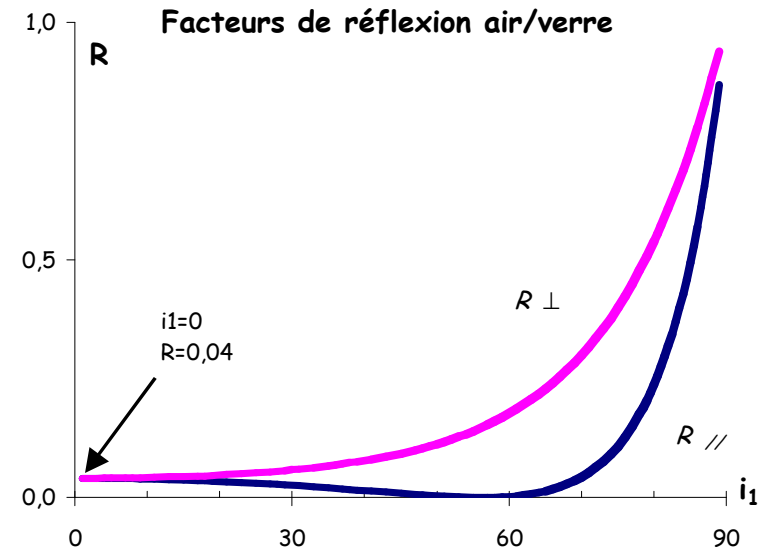
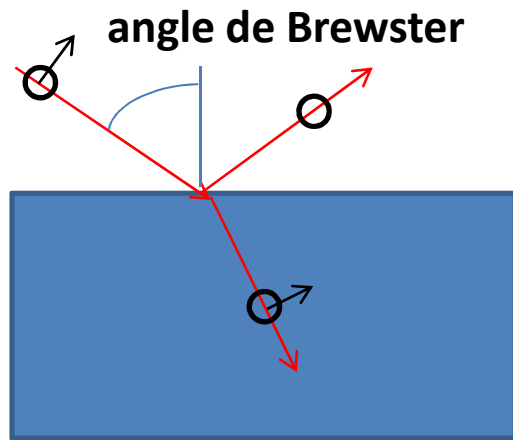
# Les polariseurs

Polariseurs par absorption ex: polaroid® (*les moins chers*)



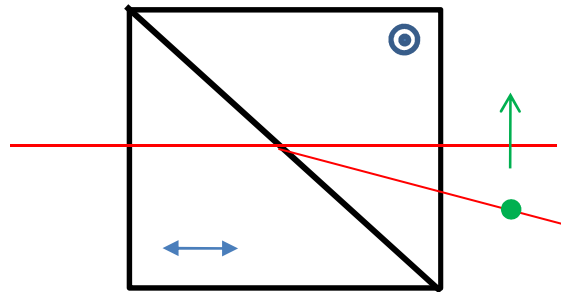
# Les polariseurs

## Polariseurs par réflexion vitreuse

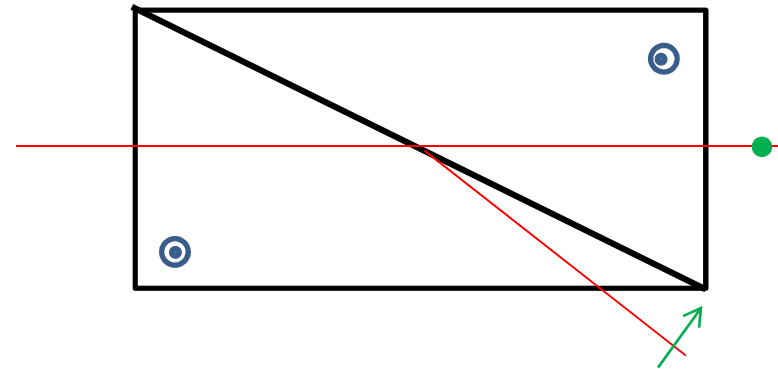


# Les polariseurs

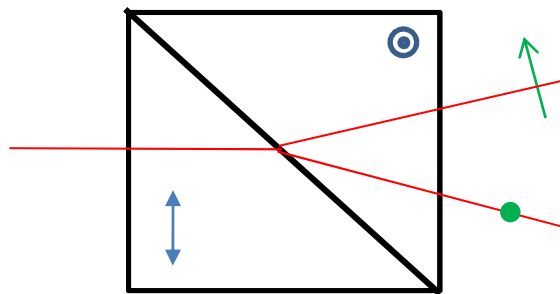
## Polariseurs par des prismes biréfringents



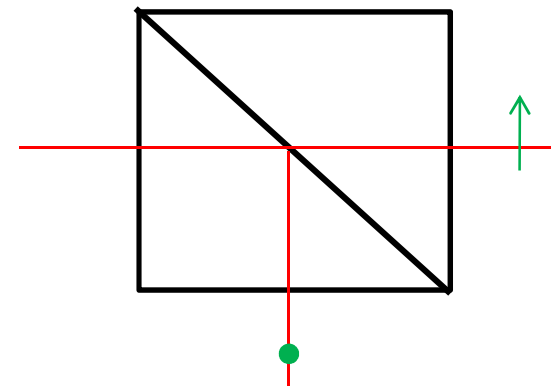
Prisme de Rochon



Prisme de Glan-Thompson



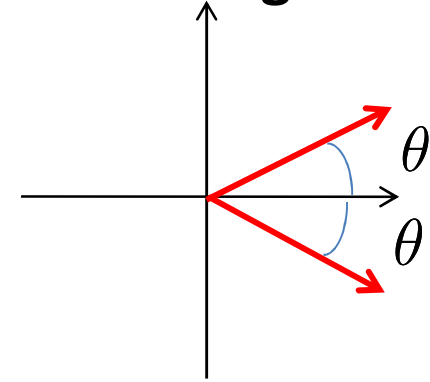
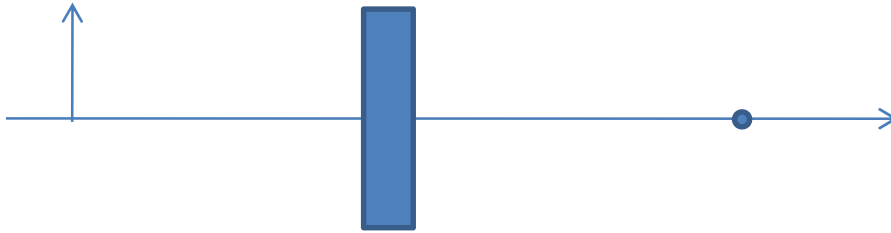
Prisme de Wollaston



Cube polarisant

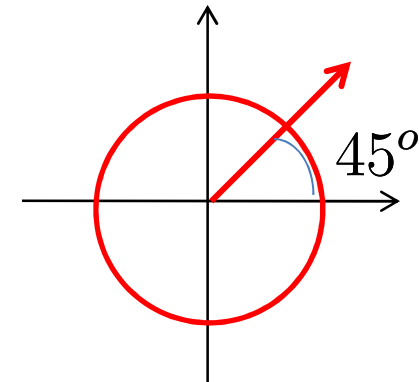
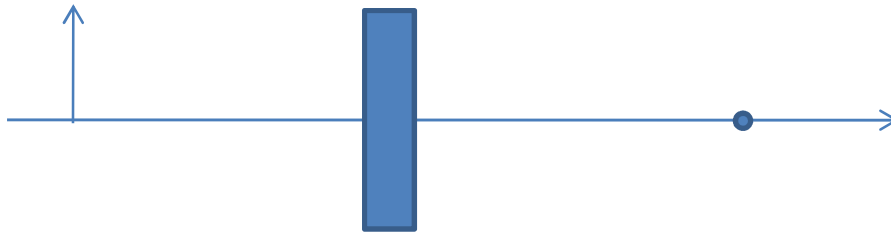
# Les lames de phase

**Lame demi onde** pour faire tourner une polarisation rectiligne



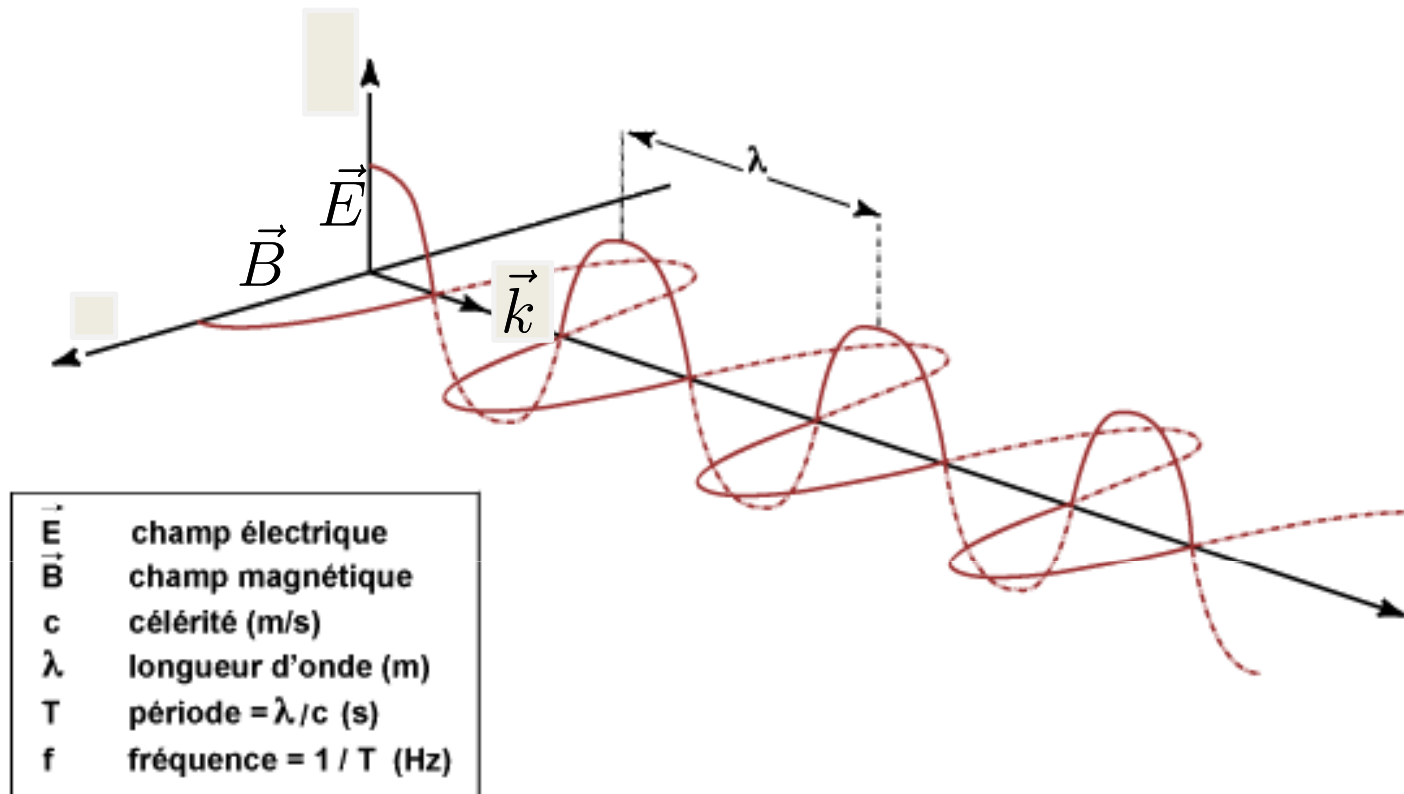
**Lame quart d'onde**

pour transformer une pola rectiligne en pola circulaire et vice versa



**Mesurer la phase?**

# Une onde électromagnétique



Amplitude

Phase

Polarisation

$$\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{e}$$

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}) \vec{b}$$

$$k = n \frac{2\pi}{\lambda} = n \frac{\omega}{c}$$

# Les interférences

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \cos \theta$$

S1

$$\vec{E}_1 = E_1 \cos(\omega t + \phi_1) \vec{e}_1$$

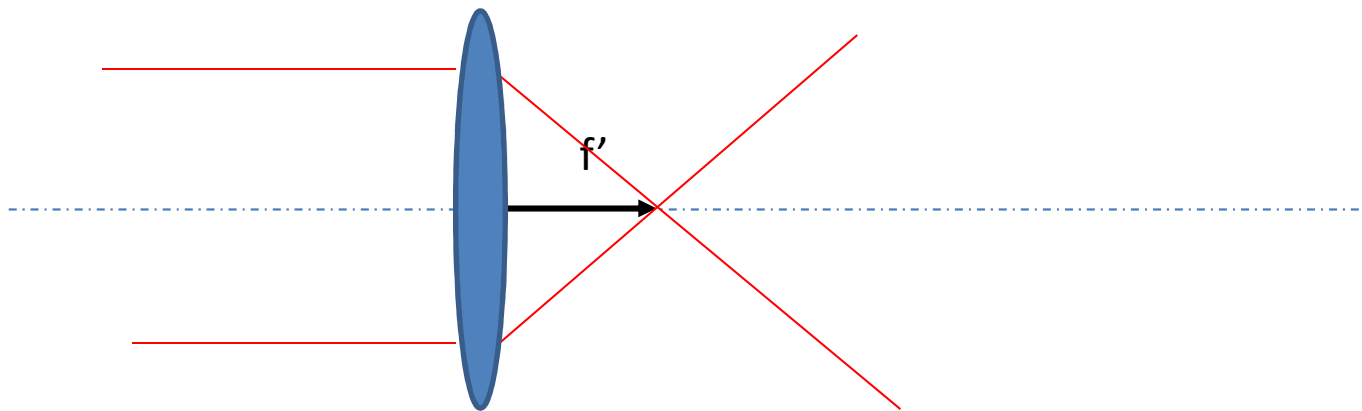
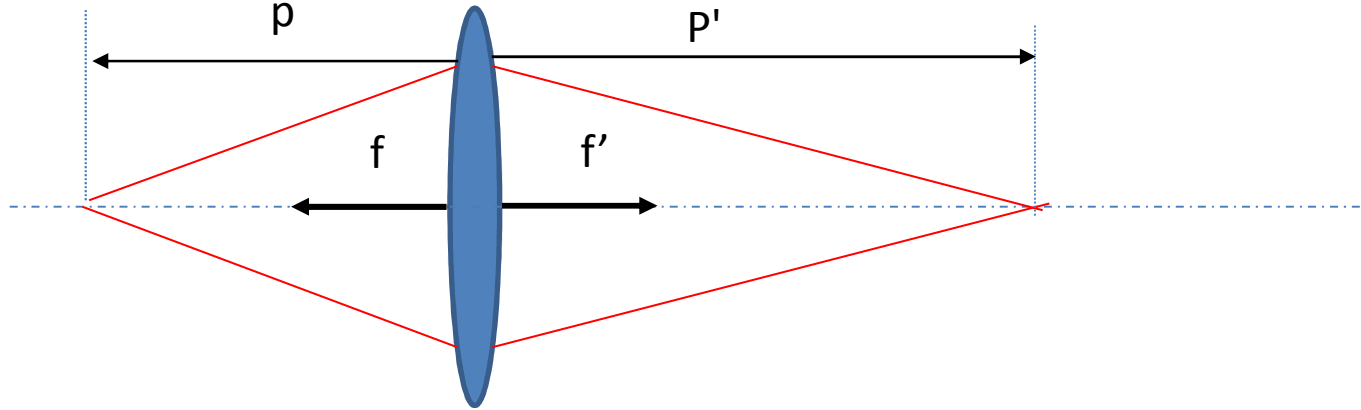
S2

$$\vec{E}_2 = E_2 \cos(\omega t + \phi_2) \vec{e}_2$$

# **Les lentilles et objectifs**

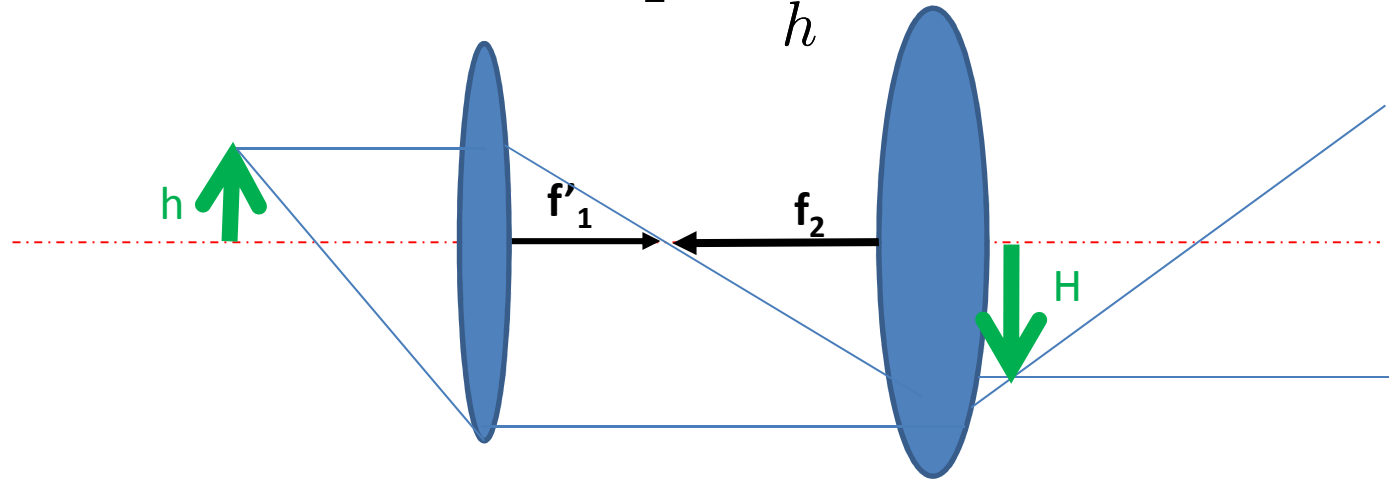
# Les lentilles

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$$

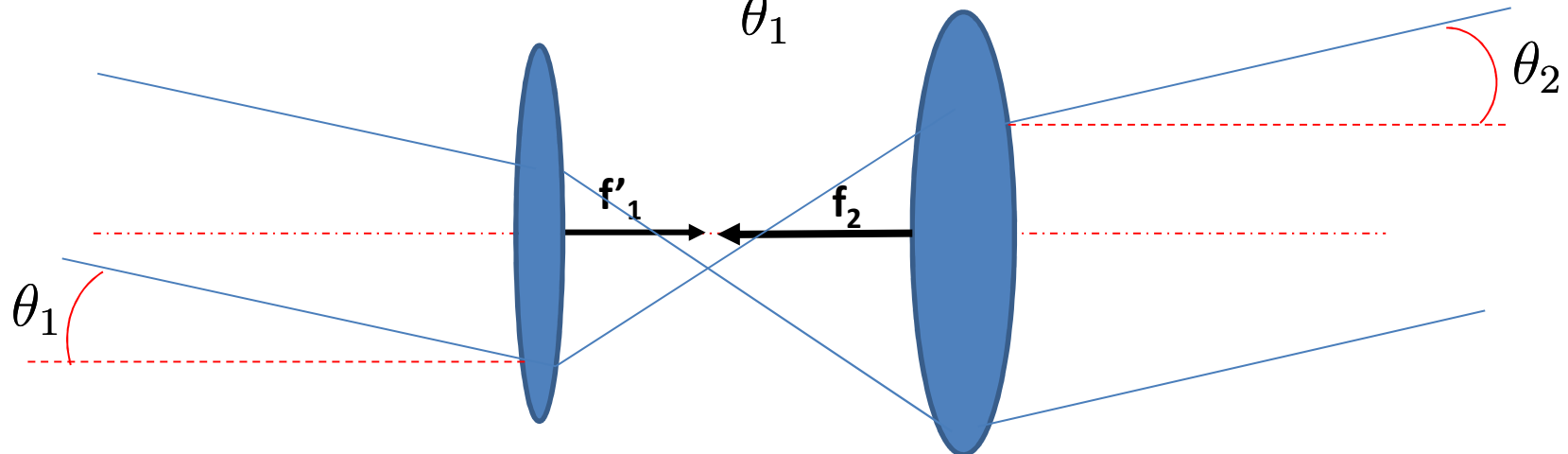


# Grandissement et grossissement

Grandissement  $\Gamma = \frac{H}{h}$

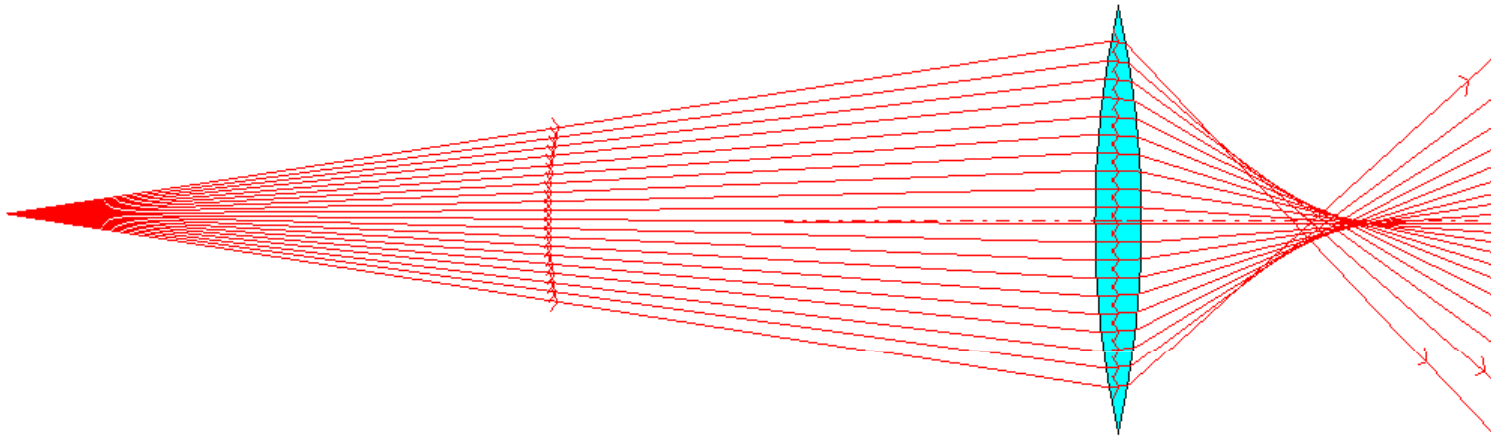


Grossissement  $G = \frac{\theta_2}{\theta_1}$

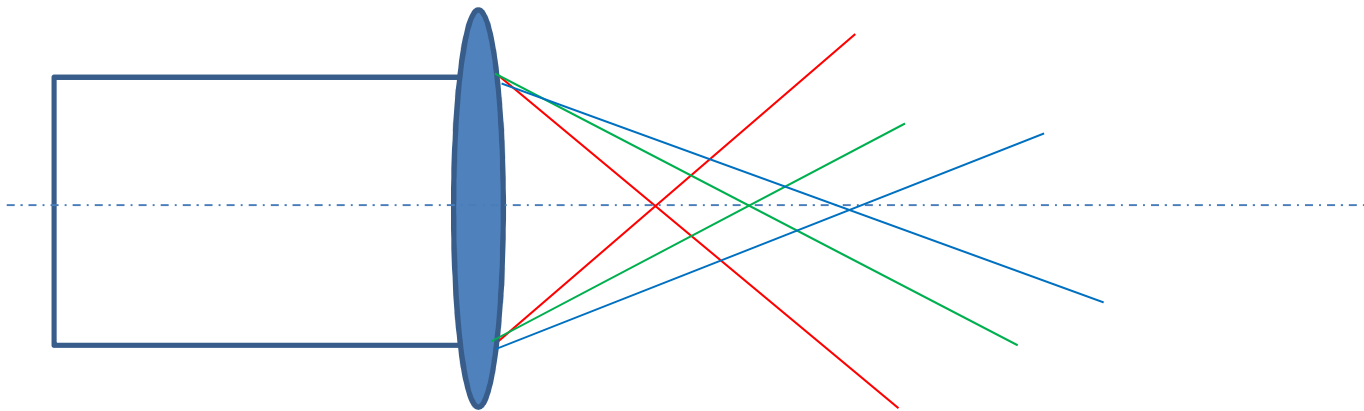


# Les lentilles et les aberrations

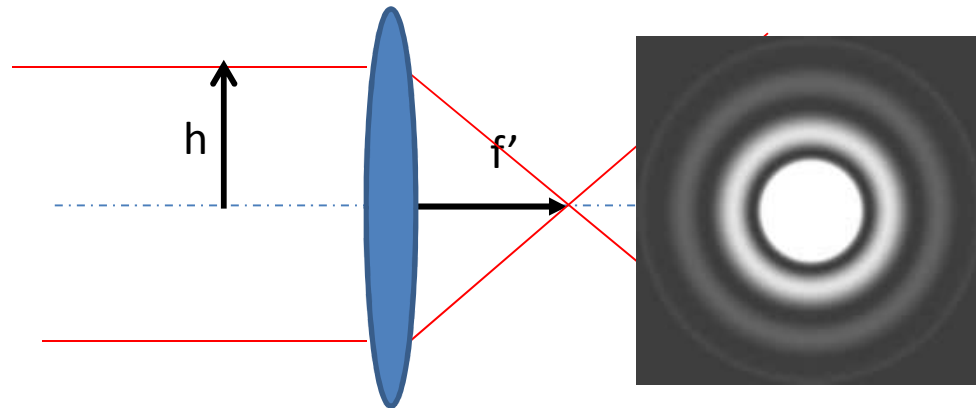
Aberration géométrique de sphéricité



Aberration chromatique

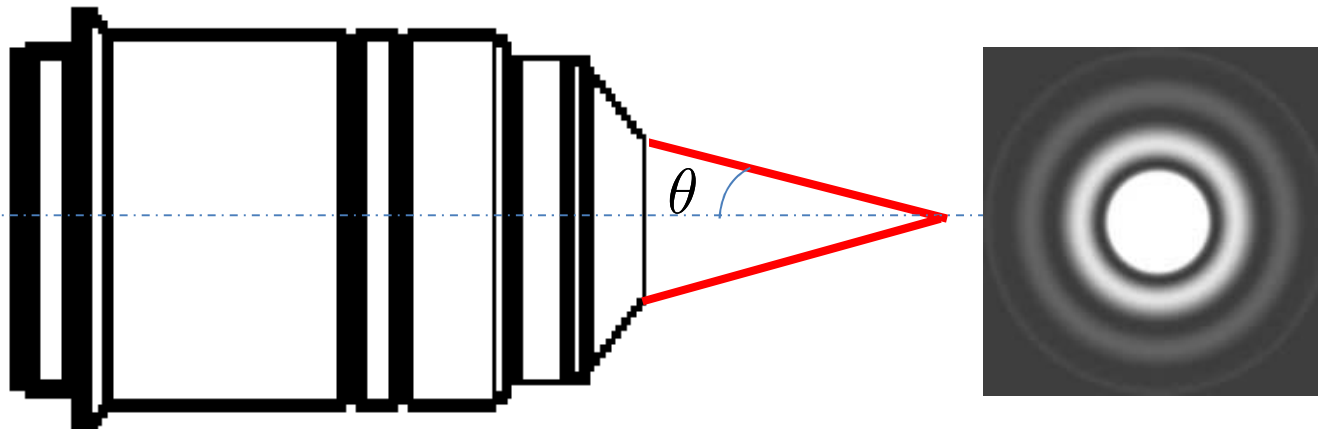


# Les lentilles et la diffraction



$$\left( \frac{J_1 \left( k \frac{h}{f'} r \right)}{r} \right)^2$$

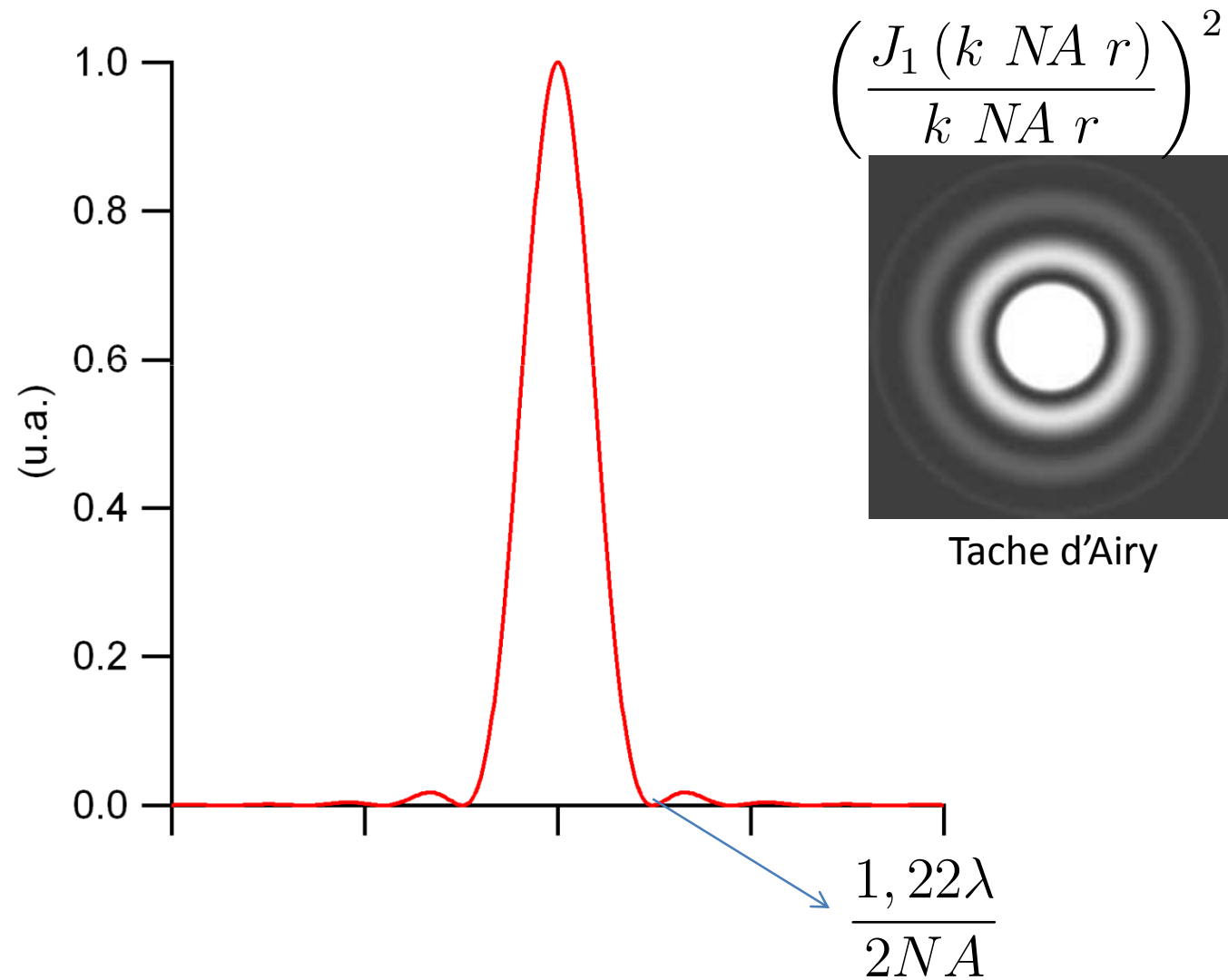
$$NA = n \sin \theta$$



$$\left( \frac{J_1 (k NA r)}{k NA r} \right)^2$$

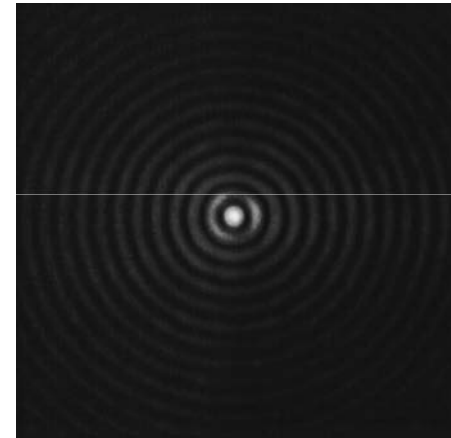
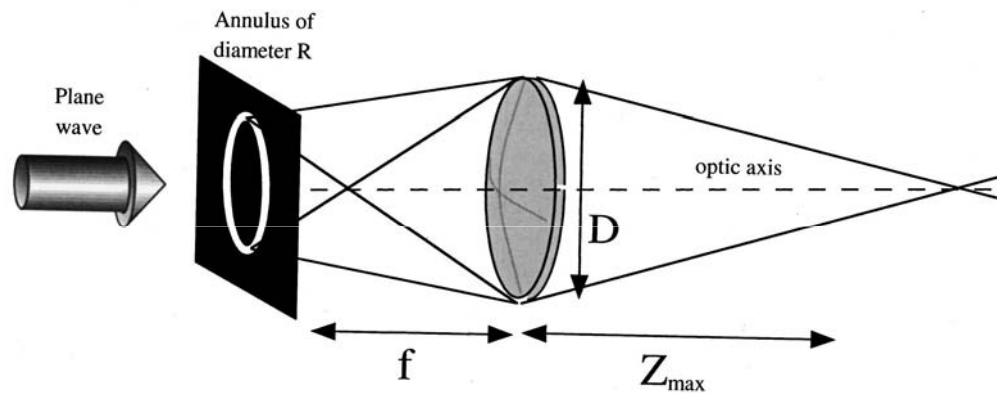
Tache d'Airy

# La tache d'Airy



# Optique de Fourier

Ex: faisceau de Bessel



Am. J. Phys. **67** (10), 1999