Optique Ondulatoire

H. EL RHALEB
Université Mohammed V, Rabat, Agdal
Faculté des Sciences,
Département de Physique,
Laboratoire de Physique Théorique
elrhaleb@fsr.ac.ma

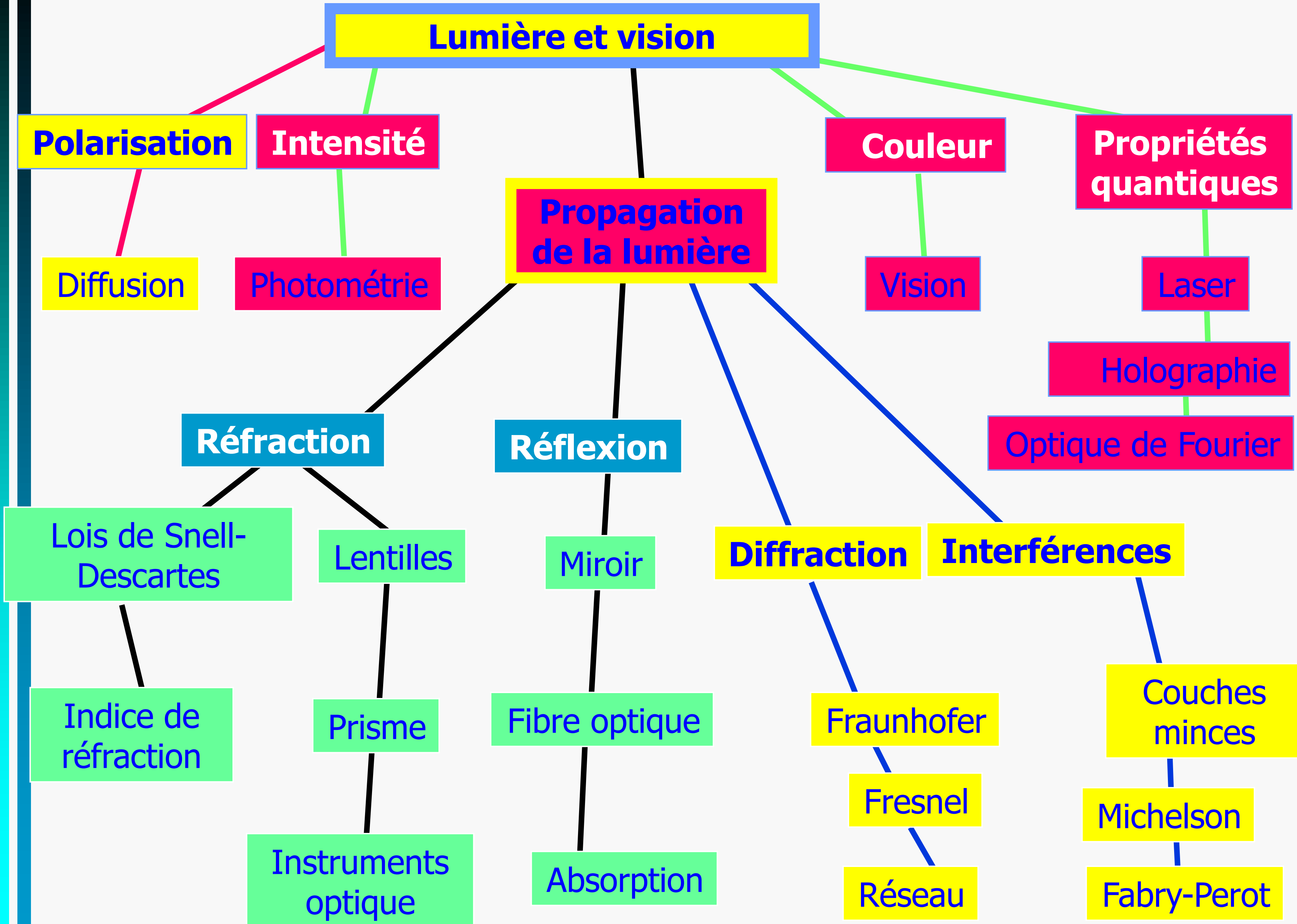
Filière SMP, année 2011-2012

A l'origine, l'*optique* est la science qui étudie les propriétés de la lumière et les lois de la vision.

Aujourd'hui, l'optique est la discipline scientifique et technique qui étudie la *production*, la *transmission* et la *détection* de la lumière.

Le domaine spectral couvert par l'optique est très étendu, couvrant des rayonnements X aux ondes millimétriques ce qui lui permet d'intervenir dans de nombreux domaines :

- ✓ **l'industrie (télécommunication, métrologie,…),**
- ✓ **en médecine (chirurgie, imagerie,…),**
- ✓ **l'environnement,**
- ✓ **en astronomie, en aéronautique,**
- ✓ **et dans la recherche.**


Lumière et vision
Polarisation
Intensité
Couleur
Propriétés quantiques
Propagation de la lumière
Diffusion
Photométrie
Vision
Laser
Holographie
Optique de Fourier
Réfraction
Réflexion
Lois de Snell-Descartes
Lentilles
Miroir
Diffraction
Interférences
Indice de réfraction
Prisme
Fibre optique
Fraunhofer
Couches minces
Fresnel
Michelson
Instruments optique
Absorption
Réseau
Fabry-Perot

Plan du cours

CHAPITRE I

Aspect ondulatoire de la lumière

L'*optique géométrique* est une restriction de l'optique ondulatoire : en optique géométrique, on ne se préoccupe que de la direction locale $\vec{u}$(M) de la propagation de l'onde et de la célérité locale c(M).

Le but de ce chapitre est d'assurer la transition vers l'*optique ondulatoire* où on s'intéresse à la *phase* de la grandeur physique qui se propage et à l'*énergie* transportée par l'onde.

I – Généralités sur la vibration lumineuse

Les *ondes lumineuses* sont des ondes électromagnétiques, décrites par deux champs vectoriels, électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$ qui vérifient l'équation d'onde suivante dans un milieu transparent, homogène et isotrope :

$$\Delta U - \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0 \qquad \text{avec} \qquad U = E \text{ ou } B$$

v est la vitesse de propagation qui dépend de la nature du milieu.

L'analyse de *Fourier* permet de considérer l'onde U(M,t) émise par une source ponctuelle, comme une somme de fonctions sinusoïdales du temps de pulsation ω.

On peut donc décomposer U(M,t) en ondes monochromatiques c.à.d de la forme :

$$U(M,t) = A(M)\cos\left[\omega\left(t - \tau_M\right) - \varphi_S\right]$$

- A(M) est fonction de M (l'amplitude de l'onde) ;

- ω est la pulsation. Elle est reliée à la période T et à la fréquence ν de la radiation par les relations :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \qquad \text{et} \qquad \nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

- τ_M est le temps mis par la lumière pour se propager d'un point source S à un point d'observation M.

- $\omega\tau_M + \varphi_S$ est la phase au point M.

En reportant ces fonctions dans les équations de *Maxwell* on obtient les résultats suivants :

✓ Les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont dans la plan d'onde perpendiculaire à la direction de propagation;

✓ Le vecteur de *Poynting* est perpendiculaire au plan d'onde $\Rightarrow$ la direction de propagation de l'onde est aussi la direction de propagation de l'énergie. $\vec{P} = \dfrac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu}$

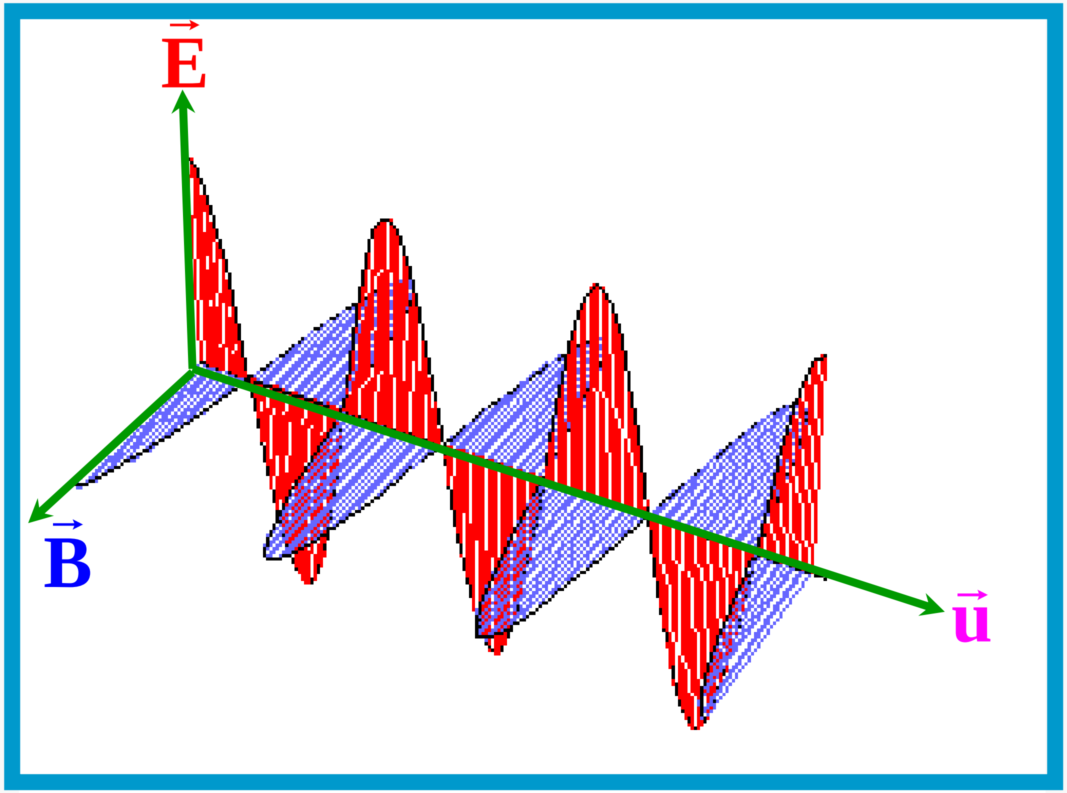
✓ Les vecteurs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont, à chaque instant, perpendiculaires l'un à l'autre en chaque point.

✓ Les modules de $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont proportionnels : $\dfrac{|\vec{E}|}{|\vec{B}|} = v$

✓ Les vecteurs $\vec{u}$, $\vec{E}$ et $\vec{B}$ forment un trièdre :

$$\vec{B} = \frac{\vec{u} \wedge \vec{E}}{v}$$

Pour une onde polarisée rectilignement, $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont orthogonaux entre eux et dans un plan fixe.



II – Modèle scalaire des ondes lumineuses

II.1 - Le chemin optique

Soit ℓ l'abscice curviligne le long du rayon lumineux allant de S à M. Le retard τ_M s'exprime alors :

$$\tau_M = \int_0^{\tau_M} dt = \int_S^M \frac{dt}{d\ell} d\ell = \int_S^M \frac{1}{v(P)} d\ell = \frac{1}{c}\int_S^M n(P) d\ell$$

On appelle *chemin optique* le long du trajet SM l'expression :

$$\boxed{L_{SM} = \int_{SM} n(P)\, d\ell = c\,\tau_M}$$

Le chemin optique est donc une mesure en unité de longueur du temps mis par la lumière pour se propager de S en M.

L'expression de l'onde lumineuse devient :

$$U(M,t) = A(M)\cos\left[\omega\left(t - \frac{L_{SM}}{c}\right) - \varphi_S\right]$$

Soit en introduisant la longueur d'onde dans le vide λ_o :

$$U(M,t) = A(M)\cos\left(\omega t - \varphi_S - 2\pi\frac{L_{SM}}{\lambda_o}\right)$$

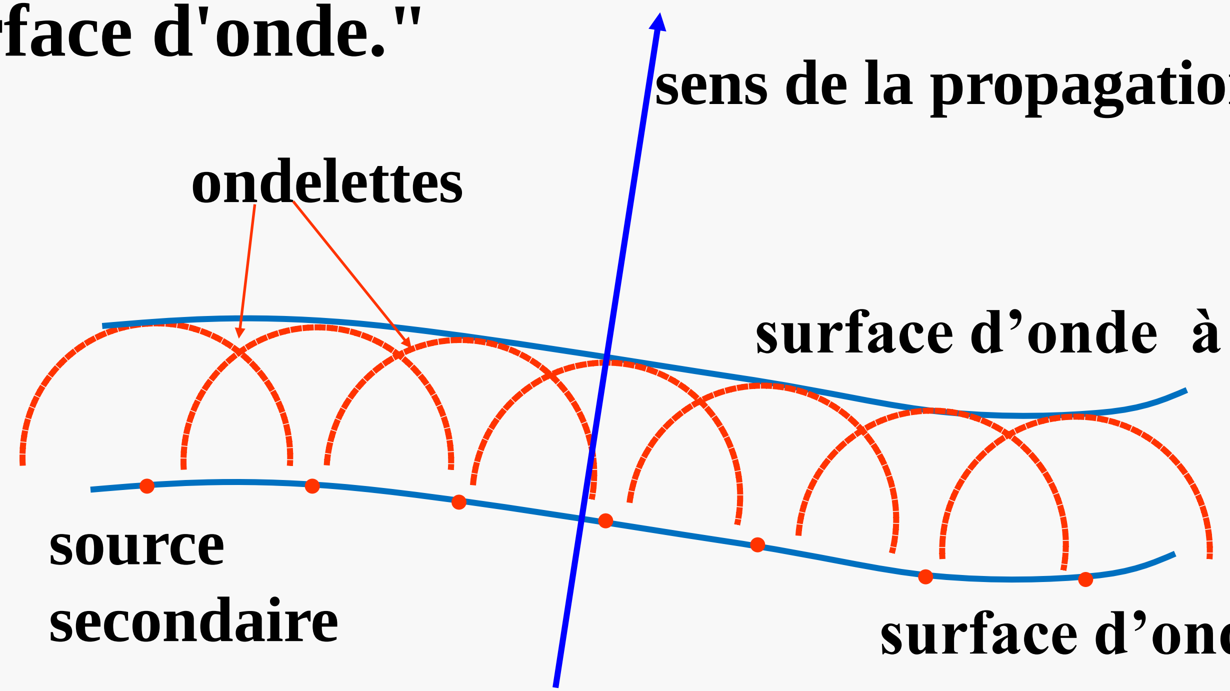
Pour alléger l'écriture, on utilise le retard de phase φ_M :

$$U(M,t) = A(M)\cos\left(\omega t - \varphi_M\right)$$

où $\varphi_M = \varphi_S + 2\pi\frac{L_{SM}}{\lambda_o}$

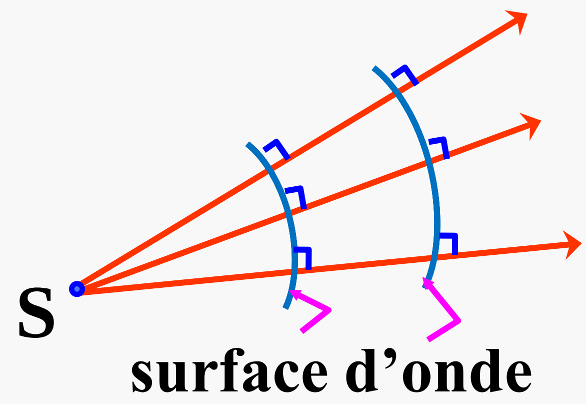
II.2 – Principe de Huyghens

" Les points d'égale perturbation lumineuse forment un ensemble appelé ***surface d'onde***. Chacun de ces points se comporte comme une source secondaire qui émet des ***ondelettes*** sphériques si le milieu est isotrope. L'enveloppe de ces ondelettes forme une nouvelle surface d'onde."



II.3 - Théorème de Malus

Définition : Dans un milieu isotrope, les rayons lumineux sont localement perpendiculaires aux surfaces d'onde.



Le théorème de *Malus* relie directement cette notion caractéristique de l'optique ondulatoire, à la notion de rayon lumineux qui est fondamentale en optique géométrique.

II.4 – Notion d’éclairement

Dans le visible, compte tenu des fréquences élevée ($\nu \sim 10^{15}$ Hz), les détecteurs d’ondes lumineuses ne sont sensibles qu’à une moyenne temporelle.

Un détecteur linéaire, qui serait sensible à $<U(M,t)>$ serait inefficace car cette valeur moyenne est nulle.

Les détecteurs utilisés en optique (photodiodes, photorésistances, photomultiplicateurs, …) sont sensibles à $<U^2(M,t)>$.

On appelle intensité en un point M la grandeur :

$$I(M) = 2<U^2(M,t)>$$

$$I(M) = \frac{2}{T}\int_0^T A^2(M)\cos^2(\omega t - \varphi_M)\,dt$$

Sachant que $\cos^2(x) = \dfrac{1+2\cos(2x)}{2}$

$$I(M) = \frac{A^2(M)}{T}\int_0^T \left(1 + \cos(2\omega t - 2\varphi_M)\right)dt$$

En intégrant

$$I(M) = \frac{A^2(M)}{T}\left[t + \frac{\sin(2\omega t - 2\varphi_M)}{2\omega}\right]_0^T = \frac{A^2(M)}{T}\left(T + 0\right)$$

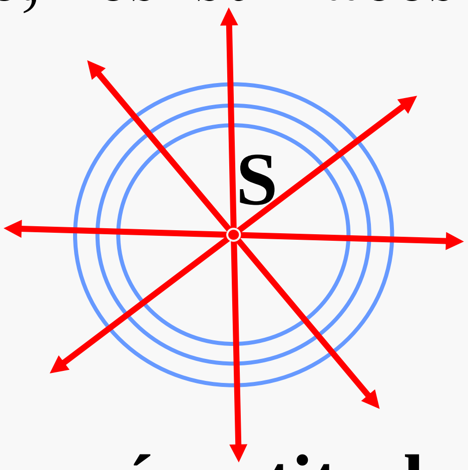
D'où

$$\boxed{I(M) = A^2(M)}$$

II.5 – Onde sphérique

L'*onde sphérique* est l'onde émise par une source ponctuelle dans un milieu homogène.

D'après l'expression du chemin optique, les surfaces d'ondes ont pour équation : $n\overline{SM} = cte$



de telle sorte qu'il s'agit d'une sphère de centre S.

$\Rightarrow$ Onde sphérique

La puissance émise par la source S se répartit de manière isotrope dans l'espace. L'intensité I ne dépend que de la distance r = SM.

La puissance moyenne totale reçue par une sphère de centre S et de rayon r s'écrit :

$$P = \iint_{(S)} I(r)dS = I(r)\iint_{(S)} dS = 4\pi r^2 I(r)$$

Si le milieu n'est pas absorbant, la puissance P reçue par la sphère de rayon r se trouve un peu plus tard sur une sphère de rayon r' > r, de telle sorte que finalement P ne dépend pas de r. Ainsi :

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2} \equiv \frac{1}{r^2} \quad \text{et} \quad A(r) = \sqrt{I(r)} \equiv \frac{1}{r}$$

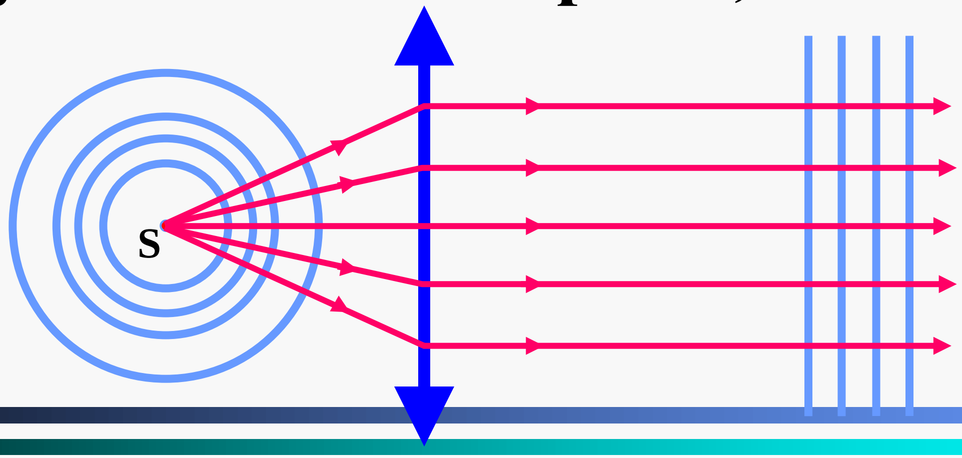
De telle sorte que l'amplitude instantanée d'une onde sphérique s'écrit :

$$\boxed{U(M,t) = \frac{K}{r}\cos\left(\omega t - \varphi_S - 2\pi\,\frac{nr}{\lambda_o}\right)}$$

II.6 – Onde plane

L'*onde plane* est la limite d'une onde sphérique, lorsque la source est infiniment loin de la zone d'observation. Dans ce cas, localement, la direction de propagation est constante et les surfaces d'ondes sphériques sont assimilables à leurs plans tangents.

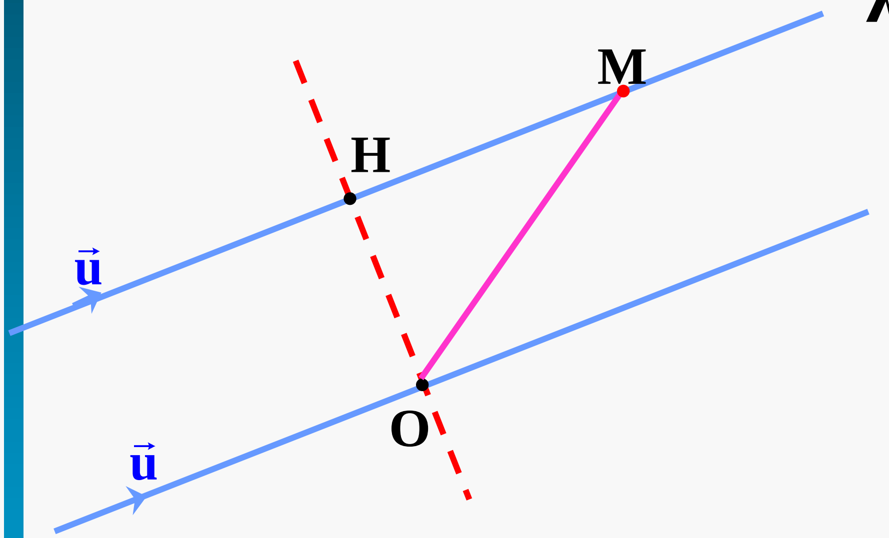
Une lentille mince utilisée en collimateur transforme une onde sphérique émise par S placée dans son plan focal objet en une onde plane, au voisinage de l'axe optique.



Phase d'une onde plane

La source S étant à l'infini, tous les chemins optiques L_{SM} sont infinis. Pour exprimer φ_M, on fais intervenir un point O quelconque et se contente de comparer φ_M et φ_O.

$$\varphi_M - \varphi_O = \frac{2\pi}{\lambda_o}(L_{SM} - L_{SO})$$



$$\begin{aligned} L_{SM} - L_{SO} &= L_{SH} + L_{HM} - L_{SO} \\ &= L_{HM} \\ &= nHM \end{aligned}$$

HM représente la projection du vecteur OM sur le rayon lumineux passant par M.

$$\varphi_M = \varphi_O + \frac{2\pi n\,\vec{u}.\overrightarrow{OM}}{\lambda_o}$$

On définit le vecteur d'onde k par :

$$\boxed{\vec{k} = \frac{2\pi n}{\lambda_o}\vec{u}}$$

Pour une onde plane on écrit donc :

$$\boxed{U(M,t) = A\cos(\omega t - \varphi_O - \vec{k}.\overrightarrow{OM})}$$