

## Chemin optique

2<sup>ème</sup> année

### Principe de Fermat

On vérifie que pour sauver une personne en train de se noyer, il vaut mieux raccourcir le trajet dans l'eau et augmenter le trajet sur terre car on court plus vite qu'on ne nage...

On démontre que les lois de Descartes de la réflexion et de la réfraction sont également des lois qui **minimisent** le **temps** de parcours de la lumière pour aller d'un point à un autre (d'où une propagation rectiligne dans un milieu homogène).

La grandeur qui traduit en optique ce temps de parcours est le **chemin optique**.

### Chemin optique

On appelle **chemin optique** de A à B le long d'une courbe ( $\mathcal{I}$ ) et on note  $(AB)$  ou  $[AB]$  ou  $L_{AB}$  la quantité :

$$(AB) = \int_A^B n_{(M)} ds_{(M)}$$

Où  $s(M)$  est l'abscisse curviligne de A à M comptée le long de ( $\mathcal{I}$ ).

### Conséquences

1. Lorsque ( $\mathcal{I}$ ) correspond au trajet réellement emprunté par un rayon lumineux, exprimer  $(AB)$  en fonction de la vitesse de la lumière dans le vide  $c_0$  et du temps de parcours  $\Delta t_{AB}$  de A à B.

$(AB) =$

Le chemin optique apparaît donc comme la distance parcourue *dans le vide* pendant le temps de parcours dans le milieu.

**Autrement dit, bien qu'il s'exprime en mètres, le chemin optique ne représente pas une distance parcourue (sauf dans le vide) ; c'est en réalité une mesure du temps de parcours en unité de longueur :  $(AB)$  est proportionnel au temps de parcours  $\Delta t_{AB}$ .**

La situation inverse est bien connue : on convoque mentalement une distance en unité de temps lorsqu'on parle d'année-lumière.

2. Exprimer  $(AB)$  dans un milieu **homogène** et **isotrope**.

$(AB) =$

3. Exprimer  $(AB)$  lors d'une réfraction en I, d'un milieu 1 dans un milieu 2, entre A et B.

$(AB) =$

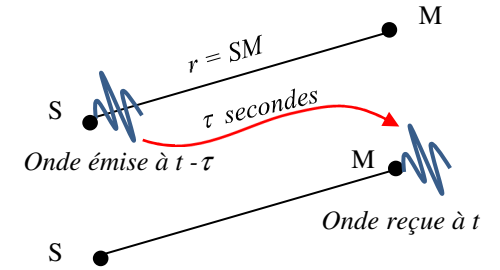
## Formalisme des ondes en termes de retard temporel

### Ondes progressives

En un point d'observation M, une source S crée un signal  $s(M, t)$ .

L'onde perçue à l'instant  $t$  en M a été émise à l'instant  $t - \tau$  en S.

$\tau = r/v = SM/v$  (où  $v$  est la vitesse de l'onde dans le milieu) est le **temps de propagation** de S à M : l'onde parvient en M avec un **retard  $\tau$** .



Retard temporel – Onde progressives

L'onde parvenant en M (situé à la distance  $r$  de S) à l'instant  $t$  a été émise en S à l'instant antérieur  $t - \tau$  avec  $\tau = r/v$  (où  $v$  est la vitesse de l'onde dans le milieu et  $r = SM$ ) :

$s(M, t) = s(S, \quad )$  ou encore  $s(M, t) = s(S, \quad )$

### Ondes planes progressives harmoniques - OPPH

Pour une onde sinusoïdale, le retard temporel se traduit par un **retard de phase  $\varphi$**  ou **déphasage** dû à la propagation.

Le signal **émis** par la source S s'écrit :  $s(S, t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_S)$ .

Retard de phase – OPPH

Le signal **reçu en M** se met alors sous la forme :

$$s(t) = s(M, t) = S_m \cos[\omega(t - r/v) + \varphi_S] \quad (1)$$

Ou encore :

$$s(t) = s(M, t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_{SM} + \varphi_S)$$

Avec  $\varphi_{SM} = < 0$  : **retard de phase** dû à la propagation de S à M souvent noté  $\varphi$ .

### Surface d'onde

Lieu des points M dans le même état vibratoire à un instant  $t$  donné donc **surface équiphasé** telle que

💡 Une OPPH peut également s'écrire :

$$s(t) = s(M, t) = S_m \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_S) \quad (2)$$

Avec :

$\vec{r} = \overrightarrow{SM}$  vecteur position de  $M$  par rapport à  $S$

$\vec{k} = k \vec{u}$  vecteur d'onde  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  ( $\lambda$  longueur d'onde dans le milieu considéré)

$\vec{u} = \frac{\overrightarrow{SM}}{SM}$  vecteur unitaire de la direction de propagation.

Ou encore :

$$s(t) = s(M, t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_{SM} + \varphi_S)$$

Avec  $\varphi_{SM} =$  : **retard de phase** dû à la propagation de  $S$  à  $M$ .

## Formalisme des ondes en termes de chemin optique

Dans l'écriture (1),  $\varphi_{SM} = -\frac{\omega}{v} r = -\frac{2\pi}{T} \frac{1}{v} SM = -\frac{2\pi}{\lambda} SM = -\frac{2\pi}{\lambda_0} n SM = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (SM)$ .

Dans l'écriture (2),  $\varphi_{SM} = -\vec{k} \cdot \vec{r} = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{\overrightarrow{SM}}{SM} \cdot \overrightarrow{SM} = -\frac{2\pi}{\lambda} SM = -\frac{2\pi}{\lambda_0} (SM)$ .

📖 On écrira donc en optique :

$$s(t) = s(M, t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_{SM} + \varphi_S) \quad \text{avec} \quad \varphi_{SM} =$$

Où  $(SM) = n SM$  est le chemin optique de  $S$  à  $M$  (dans un milieu homogène) traduisant la propagation de  $S$  à  $M$ .

Les **surfaces d'onde** sont donc des surfaces **équiphases** ou **iso-chemin optique**  $(SM) = \text{cte}$ .

Représentation complexe :  $\underline{s}(t) = \underline{S}_m e^{j\varphi_{SM}} e^{j\omega t}$  d'amplitude  $\underline{s} = \underline{S}_m e^{j\varphi_S}$  où  $\underline{S}_m = S_m e^{j\varphi_S}$ .

## Modèle de l'OPPH – Paquet d'onde

Une OPPH n'a pas de réalité physique car elles sont d'extension infinie dans le temps et l'espace (cf. notions sur les sources lumineuses et les trains d'onde).

Néanmoins, une **superposition** de telles ondes (cf. notions sur le paquet d'onde et l'analyse de Fourier) permet de construire des **ondes localisées** dans le temps et dans l'espace physiquement acceptables.

## Modèle scalaire de la lumière

Dans un milieu homogène et isotrope (air, verre, eau...), donc caractérisé par un indice  $n$  constant, la lumière est une **onde électromagnétique transverse** (cours d'électromagnétisme). Loin de la source, les ondes lumineuses peuvent être assimilées à des **ondes planes**.

📖 Le **rayon lumineux** est défini comme une ligne de champ du vecteur d'onde  $\vec{k}$  : **les rayons lumineux sont tangents au vecteur d'onde** en tout point.

Dans un **milieu isotrope**, les rayons lumineux indiquent la direction de propagation de l'énergie : **le vecteur de Poynting  $\vec{\Pi}$  est tangent aux rayons lumineux**.

📖 Dans de très nombreuses situations, il est possible de négliger le caractère vectoriel de l'onde et de l'assimiler à un scalaire (la norme du champ  $E = \|\vec{E}\|$ ).

Cependant, il existe des expériences dans lesquelles le caractère vectoriel de la lumière (sa polarisation) ne peut pas être négligé ; par exemple dans les expériences d'interférences en lumière polarisée.

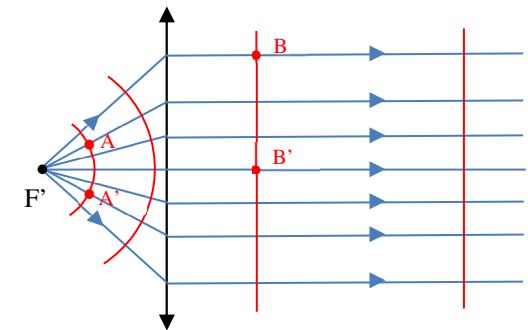
## Théorème de Malus Dupin

📖 Les rayons lumineux issus d'une même source et ayant traversé les mêmes systèmes optiques sont orthogonaux aux surfaces d'ondes.

Ou plus précisément :

Dans un milieu isotrope, après un nombre quelconque de réflexions et de réfractions, les rayons issus d'un même point source et ayant traversé les mêmes systèmes optiques sont orthogonaux aux surfaces d'ondes.

A et A' sont en phase  
B et B' sont en phase



## Principe de Fermat et principe de retour inverse de la lumière

**Principe de Fermat (1657) : La lumière se propage d'un point à un autre de façon à minimiser son temps de trajet.**

Enoncé actuel : le trajet suivi par la lumière pour aller d'un point A à un point B correspond à une valeur *stationnaire* du chemin optique par rapport aux chemins fictifs voisins allant de A à B.

Si le chemin optique (AB) est minimal (stationnaire), (BA) l'est aussi (car (AB) = (BA)) :

📖 **Principe de retour inverse de la lumière : la lumière emprunte le même chemin pour aller de A vers B que pour aller de B vers A.**