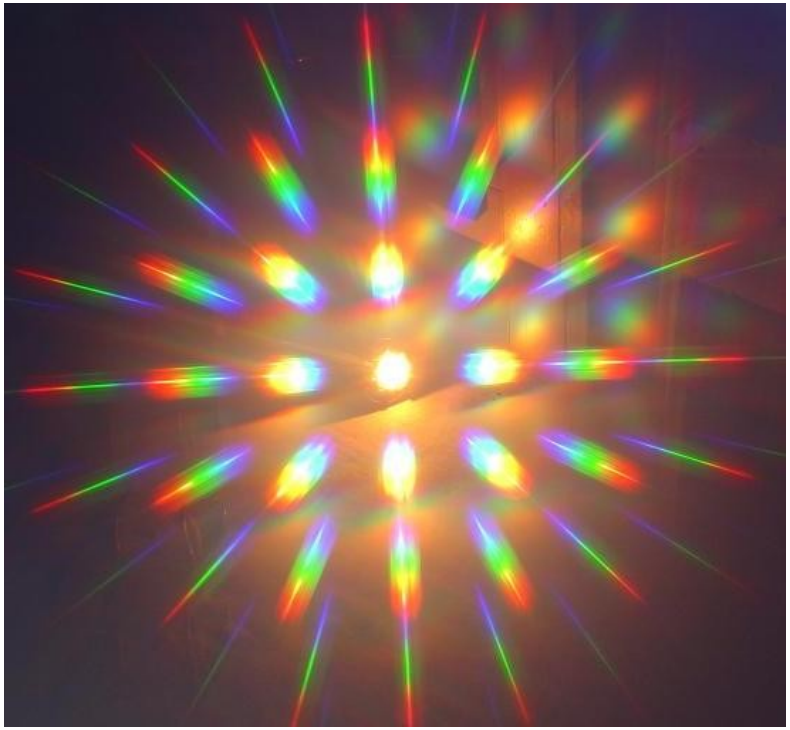
Optique Ondulatoire



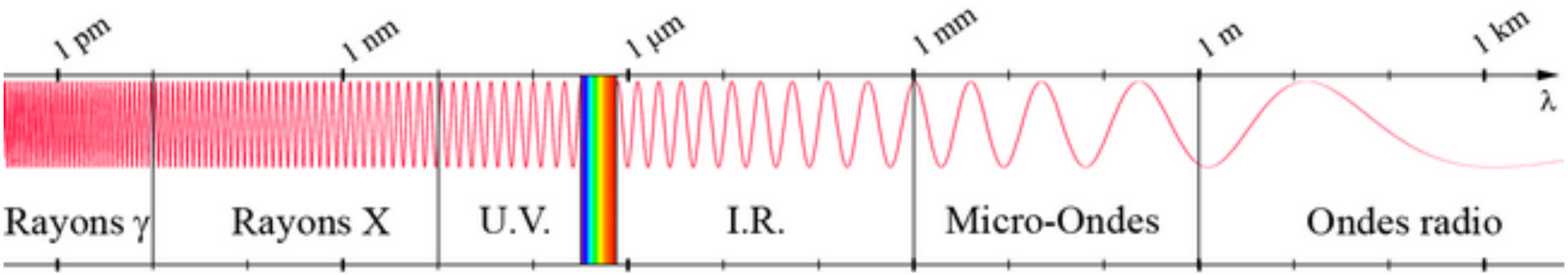
http://www.astuces-pratiques.fr/electronique/laser-twinkling-vert-50mw-et-rouge-150mw

Karine Coulié

karine.coulie@univ-amu.fr

Lumière

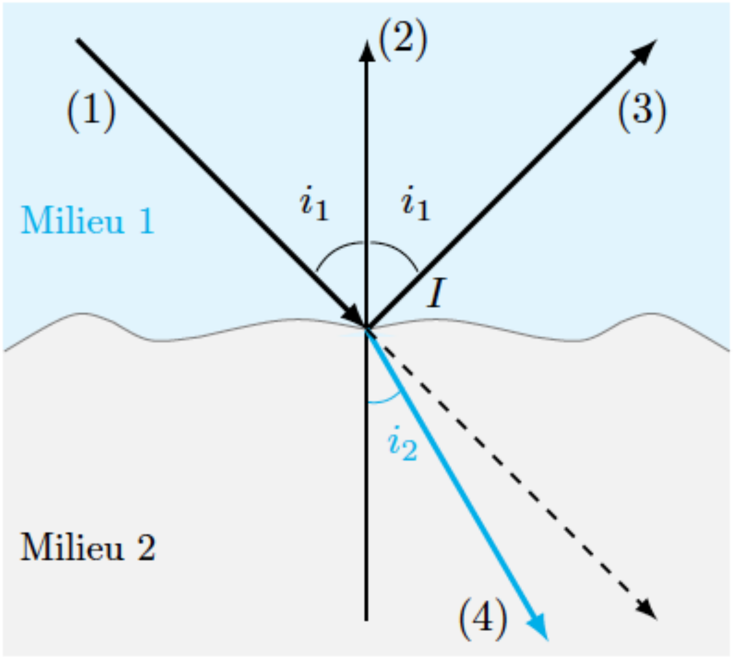
Onde électromagnétique de longueur d'onde quelques dizaines de µm dans le spectre visible



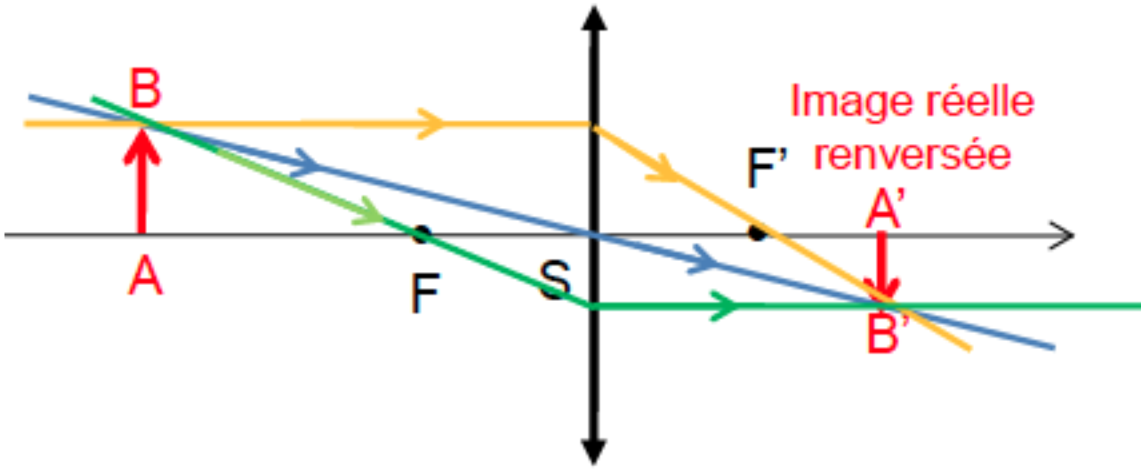
http://tpe-lumiere.e4y.fr/lumiere_electromagnetique/vitesse_onde_vitesse_lumiere.php

Loi de Descartes

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$



Physique L1, Pearson



Relation de conjugaison

$$\frac{1}{\overline{SA'}} - \frac{1}{\overline{SA}} = \frac{1}{\overline{SF'}}$$

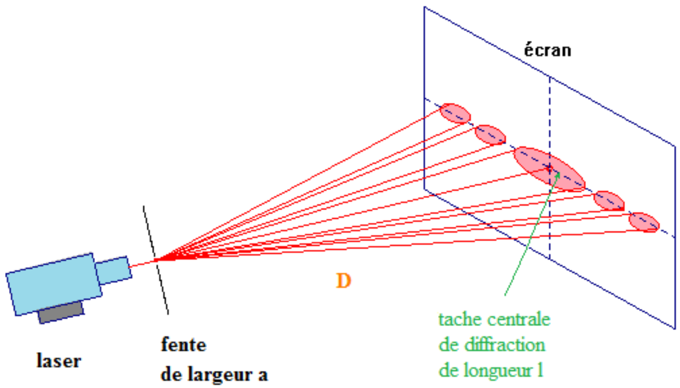
Lac de montagne: exemple de réfraction et de réflexion simultanée

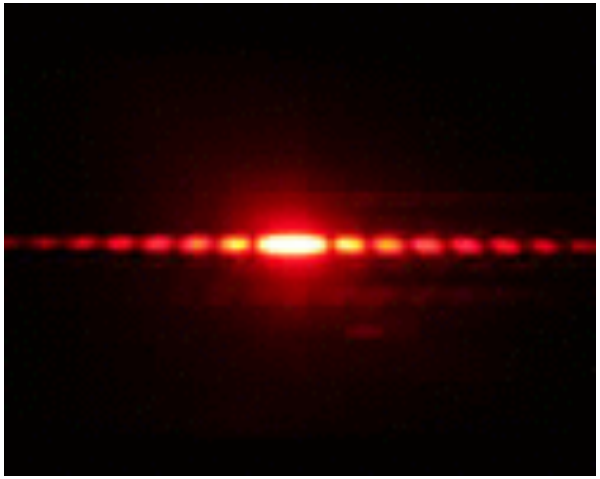
Modèle de l'optique géométrique approprié dans certaines conditions:

- La nature vectorielle de l'onde n'intervient pas
- Les rayons sont indépendants; 2 rayons qui se superposent n'interfèrent pas.
- Les propriétés physiques (n ou transparence) du milieu de propagation varient sur des longueurs caractéristiques >> λ de la radiation.

Les limites de l'optique géométrique

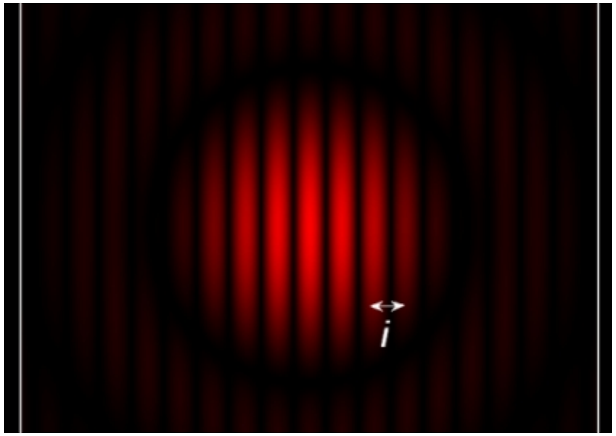
- **Diffraction par une fente**

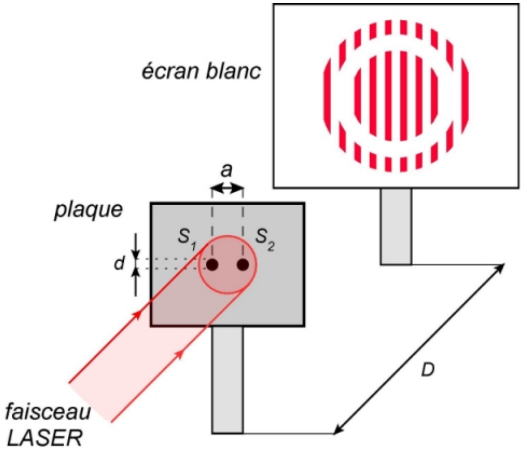




http://www.ilephysique.net/physique_terminale-modele-ondulatoire-lumiere.php

- **Interférences**

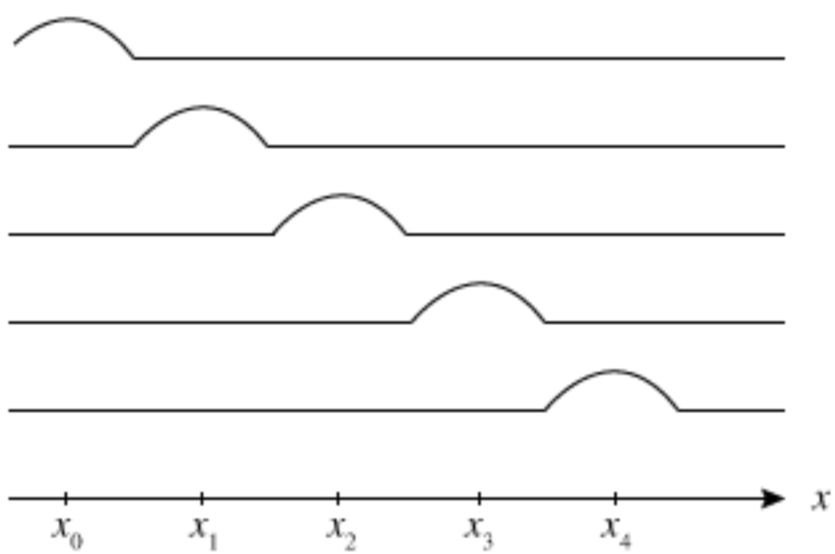




http://www.maxicours.com/se/fiche/2/4/398342.html/ts

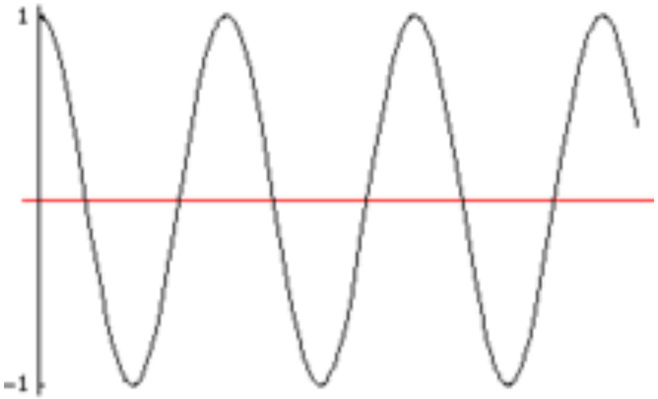
Onde progressive

Onde qui se propage dans une direction repérée par un vecteur unitaire $\vec{u}$, sans se déformer, à la célérité c.



Onde progressive harmonique

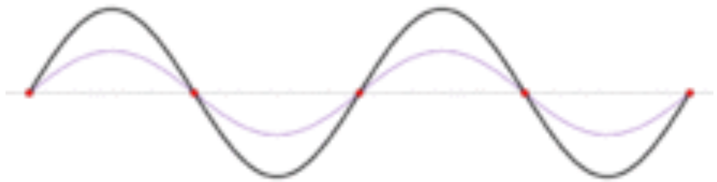
Dépendance en temps sinusoïdale.



Onde stationnaire

Seule l'amplitude varie

Ex: superposition de 2 ondes se propageant dans le sens contraire



1. Modèle scalaire de la lumière
2. Phénomène d’interférence
3. Interféromètre de Michelson
4. Interférences entre ondes multiples
5. Diffraction à l’infini

Optique Ondulatoire

CHAPITRE 1

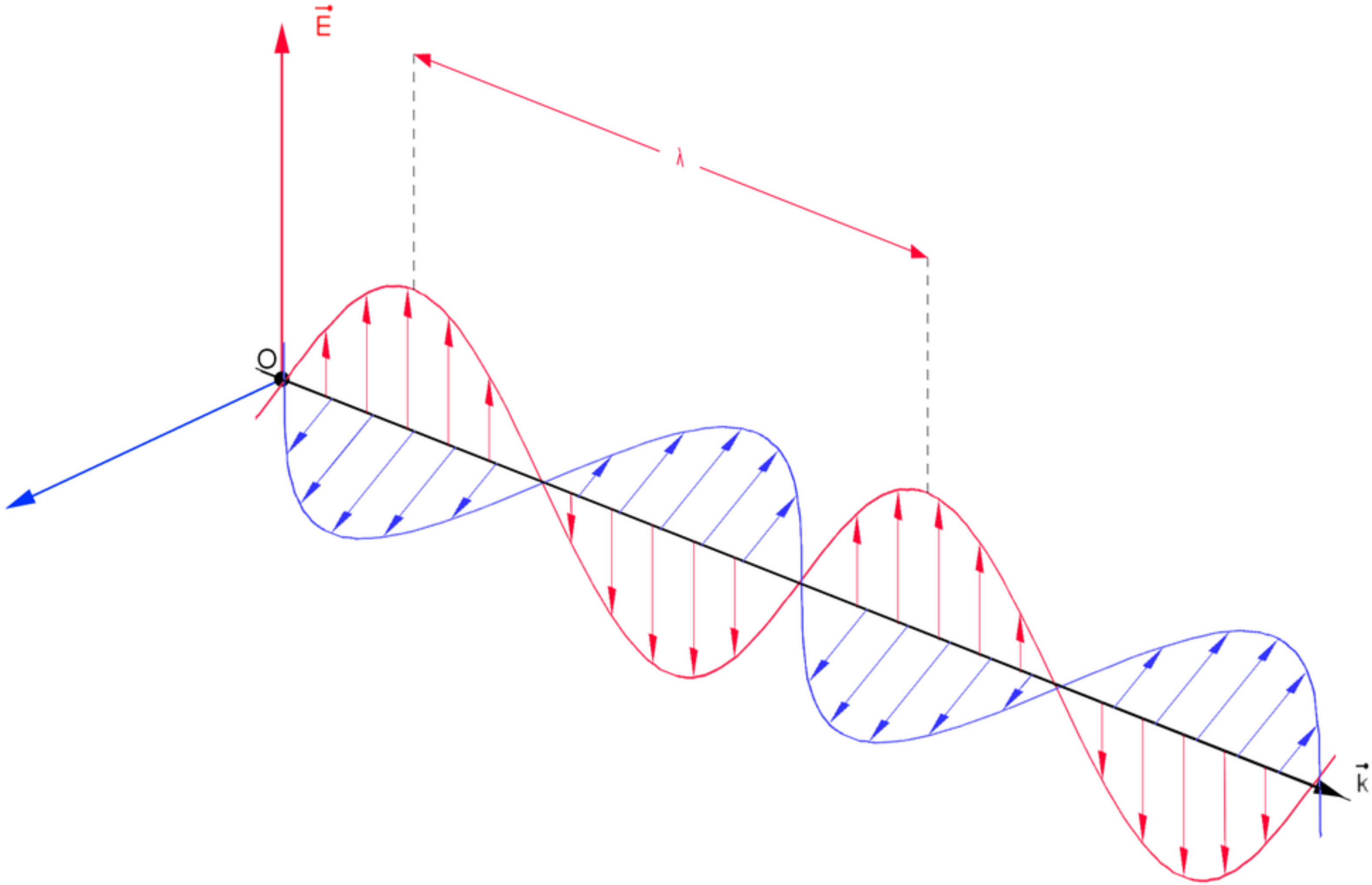
MODÈLE SCALAIRE DE LA LUMIÈRE

I.1. Ondes électromagnétiques planes progressives

Conditions d'observation:

- **Observations dans l'air**: propriétés électromagnétiques identiques à celles du vide
- Si l'onde rencontre différents **milieux**, on suppose qu'ils sont **isotropes** (indice de réfraction n)
- Sources lumineuses suffisamment éloignées de l'observateur pour que les **ondes reçues soient assimilables à des ondes planes**

I.1.1. Structure d'une onde, notion de rayon lumineux

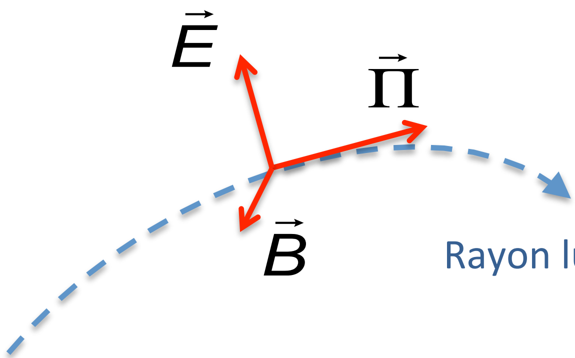


I.1.1. Structure d'une onde, notion de rayon lumineux

Vecteur densité de flux de puissance électromagnétique (vecteur de Poynting), pour une onde quasi plane se propageant selon $\vec{u}$:

$$\vec{\Pi} = n(\vec{r})\varepsilon_0 c \left\| \vec{E}(\vec{r},t) \right\|^2 \vec{u}$$

Soient c	célérité de la lumière dans le vide
ε_0	permittivité diélectrique du vide
$\vec{E}(\vec{r},t)$	champ électrique de l'onde au point de l'espace $\vec{r}$, à l'instant t
$n(\vec{r})$	indice du milieu localement homogène et isotrope



Milieu isotrope:

- $\vec{k}$ et $\vec{\Pi}$ sont colinéaires
- Les rayons lumineux indiquent la direction de propagation de l'énergie

$$\vec{k} = \frac{\omega}{c} n(\vec{r})\vec{u}$$

Soient $\vec{k}$ vecteur d'onde

$n\vec{u}$ vecteur indice

Rayon lumineux

Un rayon lumineux est une ligne de champ du vecteur d'onde

iStockphoto

I.1.2. Eclairement

- Un capteur optique (ex: œil humain) est sensible à la **puissance moyenne reçue**.
- Fréquence d'une onde lumineuse dans le visible ≈ 10^{15}Hz: variation trop rapide pour l'œil humain => on ne voit pas de scintillement.
- Grandeur pertinente quand on s'intéresse à la puissance lumineuse reçue en un point M de l'écran => éclairement $\mathcal{E}$

$$\mathcal{E}(M) = \langle \|\vec{\Pi}\| \rangle = \varepsilon_0 c \langle \|\vec{E}\|^2 \rangle$$

On a donc $\boxed{\mathcal{E}(M) \propto \langle \|\vec{E}\|^2 \rangle}$

NB: l'intensité lumineuse est proportionnelle à l'éclairement

I.2. Superposition de deux ondes lumineuses

I.2.1. Conditions d'interférences

Soient 2 ondes localement assimilables à des ondes planes progressives, monochromatiques de pulsations ω_1 et ω_2.

En un point M repéré par $\vec{r}$:

$$\vec{E}_1(\vec{r},t) = \vec{E}_{01}(\vec{r},t)\cos(\omega_1 t - \varphi_1(\vec{r}))$$

$$\vec{E}_2(\vec{r},t) = \vec{E}_{02}(\vec{r},t)\cos(\omega_2 t - \varphi_2(\vec{r}))$$

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_1(\vec{r},t) + \vec{E}_2(\vec{r},t)$$

$$\mathcal{E} = \varepsilon_0 c < \left\|\vec{E}\right\|^2 >$$

$$\mathcal{E} = \varepsilon_0 c(E_{01}^2 < \cos^2(\omega_1 t - \varphi_1) > + E_{02}^2 < \cos^2(\omega_2 t - \varphi_2) > + 2\vec{E}_{01}\vec{E}_{02} < \cos(\omega_1 t - \varphi_1)\cos(\omega_2 t - \varphi_2) >)$$

On a donc, si $\omega_1 = \omega_2$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \varepsilon_0 c.\vec{E}_{01}\vec{E}_{02} < \cos(\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_1 - \varphi_2) >$$

1/ Démontrer que si $\omega_1 = \omega_2$, on a:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \varepsilon_0 c.\vec{E}_{01}\vec{E}_{02} < \cos(\omega_1 - \omega_2)t - (\varphi_1 - \varphi_2) >$$

2/ Identifier les termes $\mathcal{E}_1$ et $\mathcal{E}_2$. $\mathcal{E}_1$ représente l'éclairement dû à la 1ière onde si elle était seule et $\mathcal{E}_2$ l'éclairement dû à la 2ième onde si elle était seule.

3/ Que se passe-t-il si $\omega_1 \neq \omega_2$.

Interférences

Il y a phénomène d'interférence quand l'éclairement résultant de la superposition de plusieurs ondes n'est pas la somme de l'éclairement de chaque onde

Conditions d'interférences

- Les ondes doivent avoir la même pulsation, l'éclairement est alors:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \varepsilon_0 c.\vec{E}_{01}\vec{E}_{02} < \cos(\varphi_2 - \varphi_1) >$$

- Les directions de polarisation des ondes ne doivent pas être orthogonales:

$$\vec{E}_{01}.\vec{E}_{02} \neq 0$$

I.2.2. Représentation scalaire d'une onde lumineuse

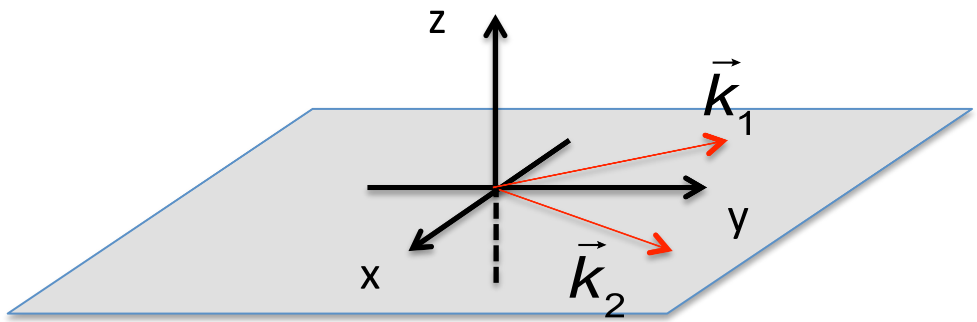
Ondes lumineuses considérées ici ne sont pas polarisées (lampes spectrales, laser de labo…) => direction de polarisation varie aléatoirement dans l'espace

De plus, Les ondes qui se superposent auront des directions de propagation voisines:

- Observation des phénomènes à grande distance de la source (observation à l'infini=directions identiques)
- Systèmes optiques utilisés dans les conditions de Gauss pour limiter les aberrations (notamment rayons peu inclinés par rapport à l'axe optique)

<u>Conséquences</u>

- On néglige l'ordre 2 concernant les angles
- $\vec{E}_1$ et $\vec{E}_2$ sont transverses => pas de composante selon z



$$\mathcal{E}(M) \propto < \left\|\vec{E}\right\|^2 > = < (E_{1x} + E_{2x})^2 + (E_{1y} + E_{2y})^2 >$$

Les directions x et y sont statistiquement équivalentes donc:

$$< (E_{1x} + E_{2x})^2 > = < (E_{1y} + E_{2y})^2 >$$

Plus besoin de conserver la nature vectorielle des ondes.

$$< \left\|\vec{E}\right\|^2 > = 2 < (E_{1x} + E_{2x})^2 > = 2 < (E_{1y} + E_{2y})^2 >$$

$$\mathcal{E}(M) = 2 < (S_1 + S_2)^2 >$$

avec $S_1(\vec{r},t) = \sqrt{\varepsilon_0 c} E_{1x}(\vec{r},t)$

$S_2(\vec{r},t) = \sqrt{\varepsilon_0 c} E_{2x}(\vec{r},t)$

Onde scalaire ou vibration scalaire

Pour une onde monochromatique de pulsation ω, l'amplitude scalaire instantanée s'écrit:

$$S(\vec{r},t) = S_0 \cos(\omega t - \varphi(\vec{r}))$$

- Permet l'étude des phénomènes optiques (éclairement)
- Simplifie l'étude

II.1. Chemin optique

II.1.1. Retard de phase en un point

Supposons un milieu de propagation homogène et une onde monochromatique localement plane:

$$S(\vec{r},t) = \underbrace{S_0(\vec{r})}_{\text{Varie très lentement sur quelques longueurs d'onde}}\cos(\omega t - \underbrace{\varphi(\vec{r})}_{\text{Varie très rapidement sur une distance de l'ordre de la longueur d'onde}})$$

Pour une onde plane dans un milieu homogène: $\varphi(\vec{r}) = \vec{k}.\vec{r} + cte$

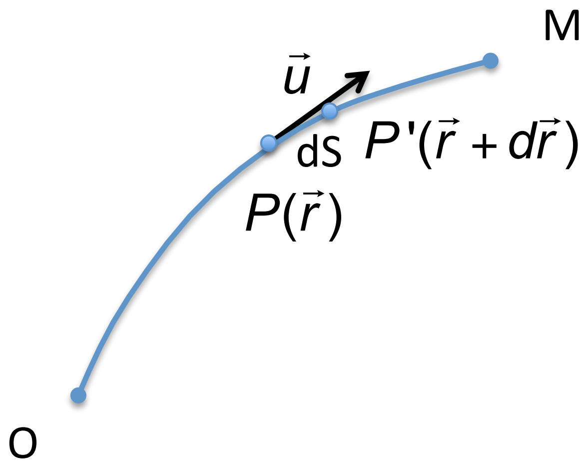
Dans un milieu hétérogène pouvant être considéré comme localement homogène:

$$d\varphi = \vec{k}.d\vec{r}$$

Intègre depuis l'origine du rayon lumineux (O)

Retard de phase en M: $\varphi(\vec{r}) = \int \vec{k}.d\vec{r} + \underbrace{\varphi_0}_{\text{Retard à l'origine}}$

II.1.2. Vers le chemin optique



S: abscisse curviligne

$$\overrightarrow{PP'} = d\vec{r} = dS.\vec{u}$$

$$\varphi(M)-\varphi_0 = \varphi(M)-\varphi(0) = k_0 \underbrace{\int_0^M n(S)\,dS}_{\text{Chemin optique}}$$

Chemin optique

Le chemin optique, le long d'une courbe quelconque repérée par l'abscisse curviligne S, entre 2 points A et B est l'intégrale:

$$L = (AB) = \int_A^B n(S)\,dS$$

Quand le trajet est fixé: (AB)=(BA)

II.1.3. Interprétation du chemin optique le long d'un rayon lumineux

Supposons un rayon lumineux reliant A et B

Indice au point P: $n(P) = \dfrac{c}{v_\varphi(P)}$

$dS = v_\varphi(P)dt$ où v_φ: vitesse de phase

dt: temps mis pour parcourir dS

Il en résulte $L = (AB) = \int_A^B c\,dt = c.t_{AB}$

où c : vitesse de la lumière dans le vide

t_{AB}: temps mis par la lumière pour aller de A vers B dans le milieu

> **Chemin optique** le long d'un rayon lumineux reliant A et B
>
> Longueur parcourue par la lumière dans le vide pendant t_{AB}

Retard de phase en M à l'origine des temps:

$$\varphi(M) - \varphi(0) = k_0 \int_0^M n(S)\,dS = k_0.(OM)$$

II.1.4. Cas particuliers de discontinuité de phase

- La phase d'une onde lumineuse est continue pour:
  - Une réfraction
  - Une réflexion sur un dioptre quand le rayon incident se propage dans le milieu d'indice le plus élevé
- La phase subit une discontinuité de π (= variation de chemin optique de $\lambda_0/2$) pour:
  - Une réflexion sur un dioptre quand le rayon incident se propage dans le milieu d'indice le moins élevé (réflexion vitreuse)
  - Une réflexion sur un métal conducteur parfait
  - Le passage des rayons par un point de convergence (ex: rayons provenant de l'infini et se focalisant sur le foyer image d'une lentille. Le foyer est alors le point de convergence des rayons).

II.2. Surface d'ondes, théorème de Malus et chemin optique

II.2.1. Surface d'onde

On cherche le retard de phase à l'origine des temps.

Surface d'onde ou surface équiphase

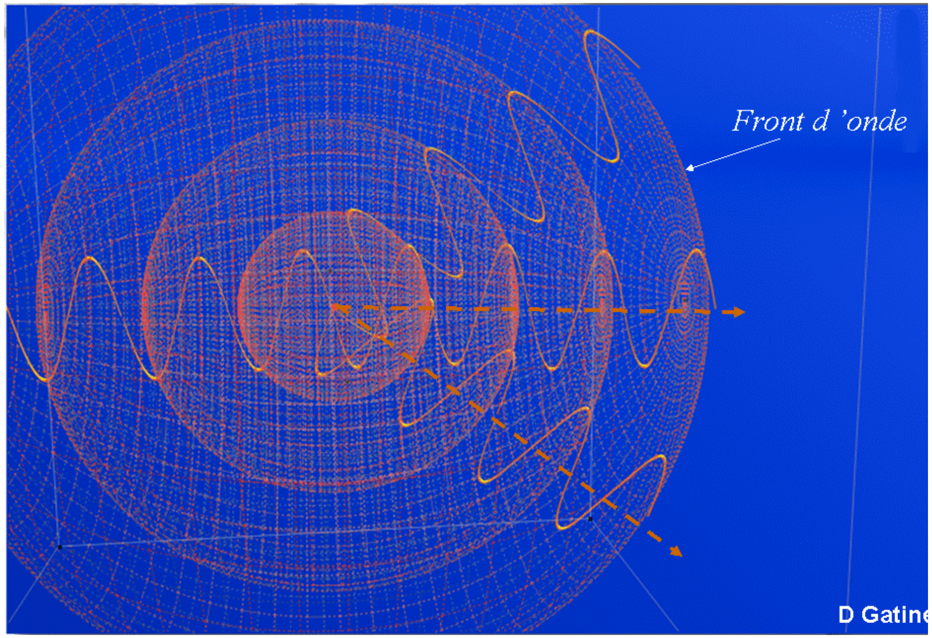
Une surface d'onde est une surface de fonction de phase (retard de phase à l'origine des temps) uniforme.

Le retard de phase à l'origine des temps est proportionnel au chemin optique.

Surface d'onde

Une surface d'onde relative à une origine ponctuelle O est l'ensemble des points M tels que les chemins optiques (OM) calculés le long des rayons lumineux soient identiques.

- Ondes sphériques



http://www.gatinel.com/recherche-formation/aberrometrie/theorie-du-front-donde/

On considère une source lumineuse ponctuelle monochromatique e un point O de l'espace supposé homogène d'indice n.

D'après le principe de Fermat, la lumière se déplace en ligne droite

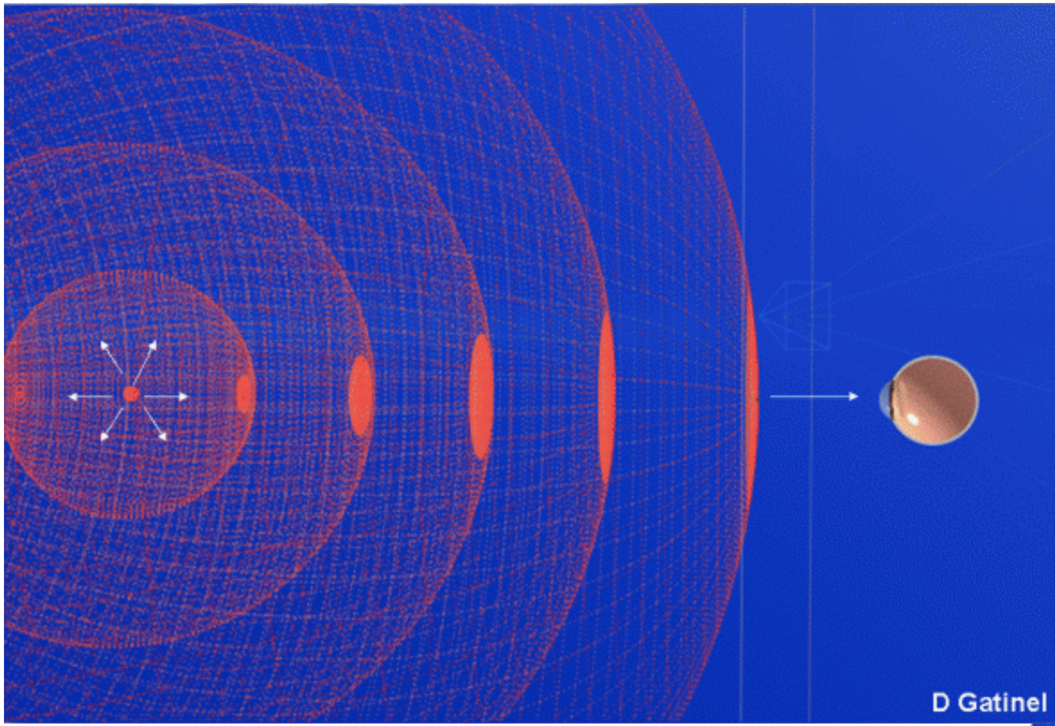
Chemin optique entre O et M:
(OM)=n.r

Surface d'onde

Ensemble des points tels que (OM):cte

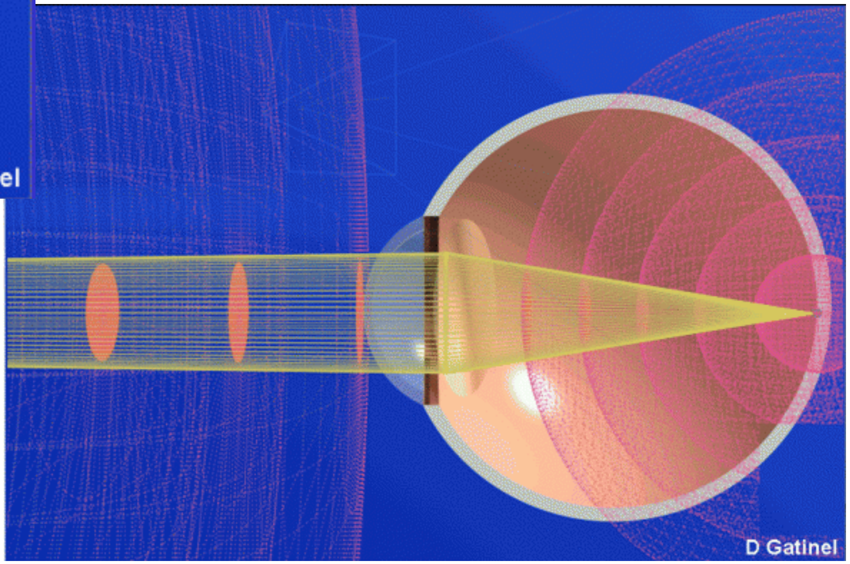
=> Sphères de centre O

- Ondes planes



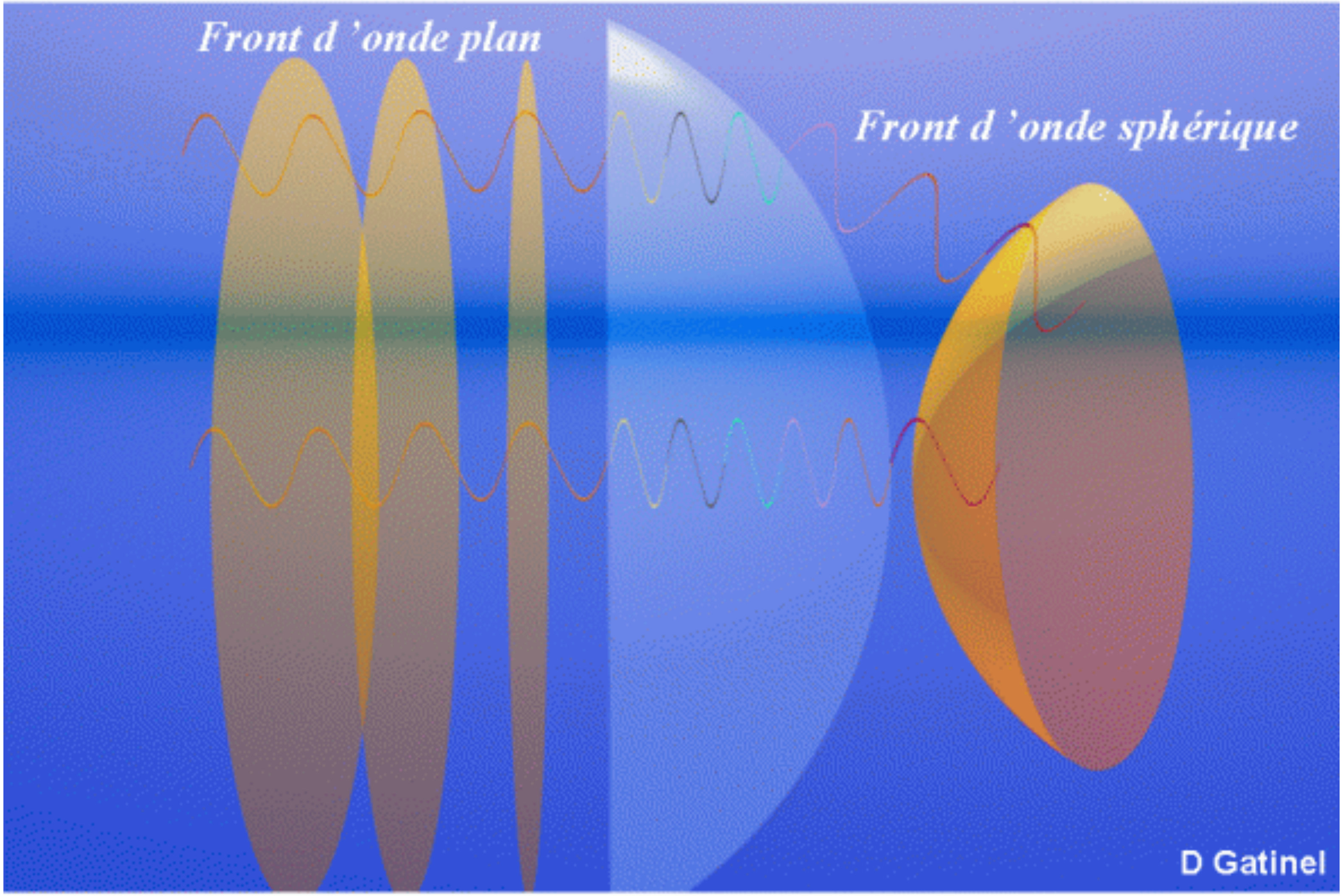
Zone d'observation très loin de l'origine O (ex: œil ou écran).

- ➢ L'onde a une structure d'onde plane localement.
- ➢ Surfaces d'ondes localement assimilables à des plans.



http://www.gatinel.com/recherche-formation/aberrometrie/theorie-du-front-donde/

II. CHEMIN OPTIQUE – THÉORÈME DE MALUS



Théorème de Malus

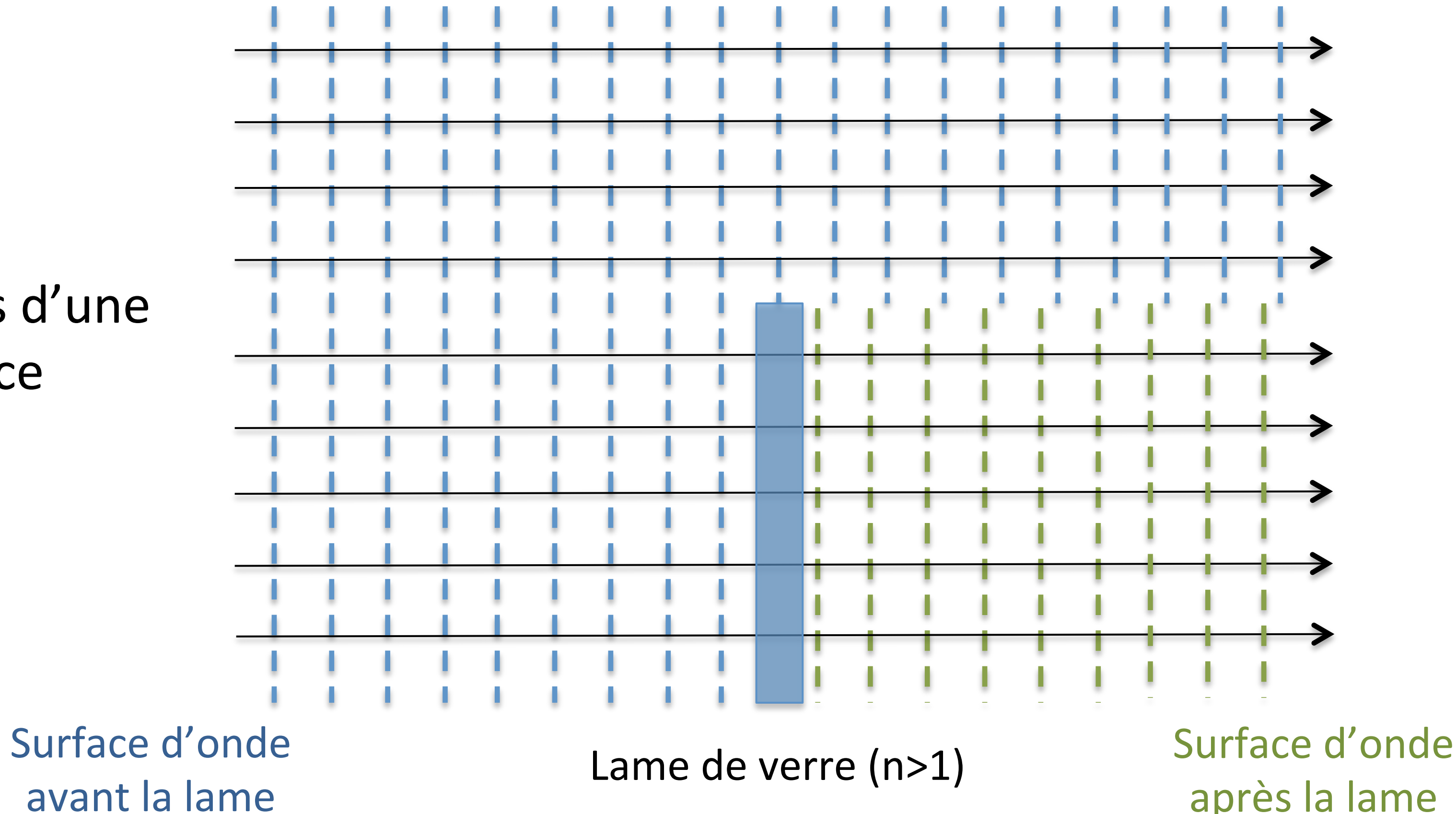
Les rayons d'un faisceau continu issu d'une même origine (ponctuelle) sont orthogonaux aux surfaces d'ondes

- Ne s'applique qu'à des rayons issus d'une même source et appartenant à un faisceau continu
- Pour l'étude des interférences entre deux ondes, nous considèrerons la superposition de faisceaux (pouvant être issus initialement d'une même origine mais suivant des chemins différents)

  => théorème de Malus alors applicable qu'à l'un ou l'autre des faisceaux

Exemple

rayons issus d'une même source



Discontinuité d'un faisceau de rayons

Entre 2 surfaces équiphases, le long de tout rayon lumineux, la différence de phase est la même. Il en est donc de même du chemin optique.

II.2.3. Principe de retour inverse de la lumière

Principe Fermat

Le trajet suivi par la lumière pour aller d'un point A à un point B correspond à une valeur extrêmale du chemin optique par rapport aux chemins fictifs voisins allant de A à B.

(AB)=(BA) donc si (AB) extrêmal, (BA) aussi.

La lumière emprunte le même chemin pour aller de A vers B que pour aller de B vers A.

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.

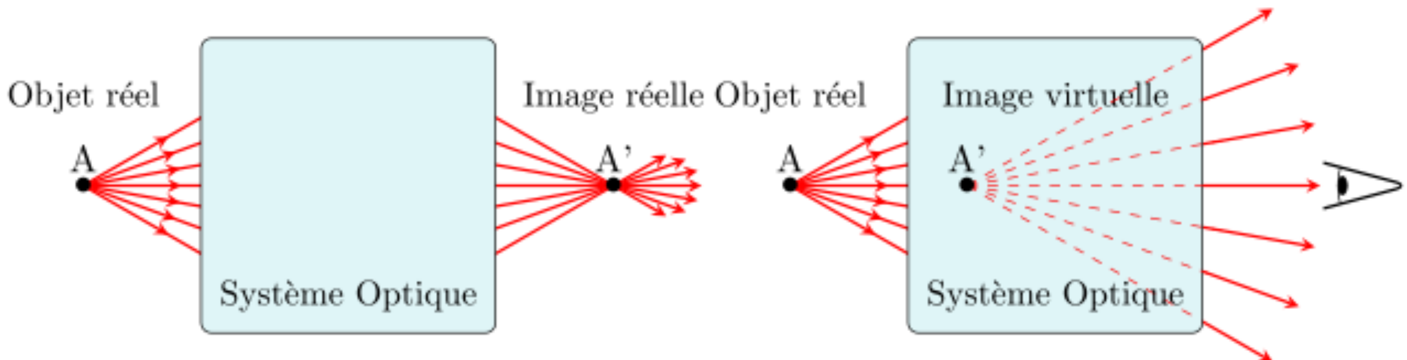
II.2.4. Stigmatisme et chemin optique

Stigmatisme rigoureux

Un système optique est rigoureusement stigmatique pour un couple de points (A,A’) si tout rayon incident sur le système optique, passant par A, passe par A’, après avoir traversé le système optique.

Conditions de stigmatisme rigoureux

Un système optique est rigoureusement stigmatique pour un couple de points (A,A’) si le chemin optique (AA’) est indépendant du rayon lumineux particulier choisi pour aller de A à A’, c.à.d. que (AA’)=cte.



http://femto-physique.fr/optique_geometrique/opt_C2.php

II.2.5. Chemin optique le long d'un rayon virtuel, algébrisation

- Un rayon virtuel se propageant dans la direction du rayon réel dont il est le prolongement appartient au milieu dans lequel se propage le rayon réel et est affecté de la même vitesse, donc du même indice
- Le chemin optique compté positivement le long d'un rayon pour un déplacement dans le sens de propagation de la lumière et négativement dans le sens contraire