

CHAPITRE 1 - ONDES LUMINEUSES

PCSI : optique géométrique, rayons lumineux

Mais : interférences, diffraction

PC* : optique ondulatoire (Huygens, Fresnel)

I. Ondes lumineuses et rayons lumineux

1. Scalaire optique

Exemples d'ondes :

- acoustique $p(x, t)$
- vagues $h(x, t)$
- lumière $s(x, t)$

↓

scalaire optique ou vibration lumineuse

Pour Fresnel, la nature physique du scalaire optique est mystérieuse, mais il est inutile de la connaître.

En fait, la lumière est une onde de champ électrique $\vec{E}(x, t)$.

Représenter \vec{E} par s constitue l'approximation scalaire.

s désigne, par exemple, une composante de \vec{E} .

On néglige ainsi les phénomènes de polarisation.

2. Ondes monochromatiques

monochromatique :

une seule radiation
(un seul λ)

Onde monochromatique : variation sinusoïdale de fréquence ν
(en Hz ou s^{-1})

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

visible $\lambda \approx 0,6 \mu\text{m}$ donc $\nu \approx 5 \cdot 10^{14}$ Hz

$$s(x, t) = \overset{\text{amplitude}}{s_0(x)} \cos(\underbrace{\psi(x) - \omega t}_{\text{phase } \psi(x, t)})$$

$$\omega = 2\nu\pi$$

En notation \mathbb{C} :

$$s = \text{Re}(z)$$

$$z(x, t) = s_0(x) e^{i(\psi(x) - \omega t)}$$

Convention de signe: $e^{-i\omega t}$

⊕ ψ est grand

⊕ l'onde est en retard

(contraire en électricité)

3. Surfaces d'ondes



Définition : On appelle surface d'onde un ensemble de points M tels que $\psi(x)$ soit constant.

* ondes sphériques : les surfaces d'ondes sont des sphères.

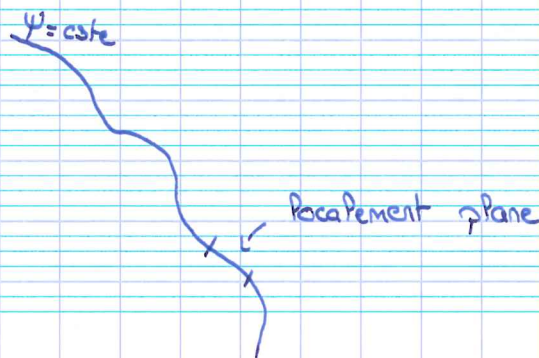
* ondes planes : les surfaces d'ondes sont des plans.

cf. figure 1

4. Ondes localement planes

a : distance typique sur laquelle s_0 varie

Si $\lambda \ll a$, la lumière possède localement les propriétés d'une onde plane.

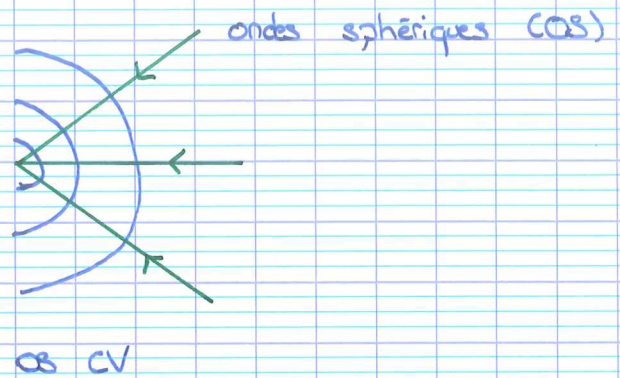
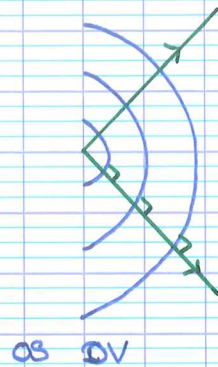


5. Rayons lumineux et théorème de Malus

On suppose $\lambda \ll a$. \rightarrow on traite l'onde comme une onde plane
 En électromagnétisme, on démontre que pour une onde plane
 l'énergie se propage perpendiculairement au plan d'onde.
 Cette direction définit les rayons lumineux.



Théorème de Malus : les rayons lumineux sont perpendiculaires
 aux surfaces d'onde.



ce th. fait le lien
 entre opt. géo.
 et opt. ondulatoire.

6. Les lentilles comme transformateurs de phase

cf. figures 2, 3 et 4

II. Déphasage et chemin optique

1. Cas d'une onde plane

$$n = \frac{c}{v}$$

cf. figure 5

l'onde se propage de O à M entre les instants t et t' .

i.e. $\varphi(O, t) = \varphi(M, t')$

$$t' = t + \Delta t \quad \text{avec} \quad \Delta t = \frac{\alpha}{v} = \frac{\alpha}{c/n}$$

$$\text{donc} \quad \varphi(O) - \omega t = \varphi(M) - \omega t'$$

$$\begin{aligned} \text{donc } \psi(M) &= \psi(O) + \omega(t' - t) \\ &= \psi(O) + \omega \Delta t \end{aligned}$$

→

$$\text{d'où } \psi(M) = \psi(O) + \omega \Delta t$$

$$\omega \Delta t = 2\pi \nu \frac{x}{c} n$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \text{ dans le vide}$$

$$\text{donc } \omega \Delta t = \frac{2\pi}{\lambda} n x$$

→

$$\begin{aligned} \text{d'où } \psi(M) &= \psi(O) + \frac{2\pi}{\lambda} n x \\ &= \psi(O) + k x \\ \text{avec } k &= \frac{2\pi}{\lambda} n \end{aligned}$$

d'où la forme d'une onde plane :

→

$$s = s_0 \cos(\psi(O) + kx - \omega t)$$

Déphasage :

→

$$\begin{aligned} \psi(M) - \psi(M') &= \frac{2\pi}{\lambda} n (a' - a) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} n d \end{aligned}$$

2. Cas d'une onde oblique sur les axes de coordonnées

cf. figure 6

En adoptant 1., on a ici :

$$\psi(M) = \psi(O) + \frac{2\pi}{\lambda} n \overline{OH}$$

$$\overline{OM} = \overline{OH} + \overline{HM}$$

$$\begin{aligned} \overline{OM} \cdot \vec{u} &= (\overline{OH} \cdot \vec{u}) + (\overline{HM} \cdot \vec{u}) \\ &= \overline{OH} \end{aligned}$$

$$\text{donc } \psi(M) = \psi(O) + \frac{2\pi}{\lambda} n \vec{u} \cdot \overline{OM}$$

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

$$\psi(M) = \psi(O) + \vec{k} \cdot \overline{OM}$$

→

$$\text{d'où } s = s_0 \cos(\psi(O) + \vec{k} \cdot \overline{OM} - \omega t)$$

3. Cas d'une onde sphérique divergente

cf. figure 7

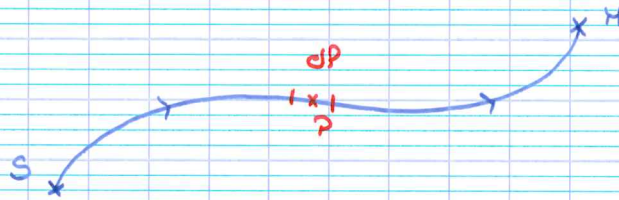
idem, mais $\Delta t = \frac{r}{v}$

$$s = s_0 \cos(\psi(O) + kr - \omega t)$$

$$\begin{aligned} \text{et } \psi(O') - \psi(O) &= \frac{2\pi}{\lambda} n (r' - r) \\ &= \frac{2\pi}{\lambda} nd \end{aligned}$$

4. Onde localement plane

$n(P)$ non uniforme



$$\psi(M) = \psi(S) + \omega \Delta t$$

$$dt = \frac{dP}{v(P)} = \frac{n(P) dP}{c}$$

donc
$$\Delta t = \int_S^M \frac{n(P)}{c} dP$$

$$\psi(M) = \psi(S) + \frac{\omega}{c} \int_S^M n(P) dP$$

Chemine optique de S à M :

$$\mathcal{L}_{SM} = \int_S^M n(P) dP$$

d'où
$$\psi(M) = \psi(S) + \frac{2\pi}{\lambda} \mathcal{L}_{SM}$$

$$\Delta t = \frac{1}{c} \mathcal{L}_{SM}$$

\mathcal{L}_{SM} exprime à $\frac{1}{c}$ près le temps de parcours de S à M.

Exemple : cf. figure 8 .

$$\mathcal{L}_{AB} = 1 \times AI + 1,5 IJ + 1,3 JB .$$

5. Chemin optique associé à des rayons virtuels

Sur les rayons virtuels, on définit le chemin optique de manière à étendre la relation de Chasles.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{AM} &= \mathcal{L}_{AI} + \mathcal{L}_{IM} \\ &= \mathcal{L}_{AI} + n' IM \\ &= \mathcal{L}_{AI} - n' AI + \underbrace{n' AI + n' IM}_{n' AM} . \end{aligned}$$

On pose :

$$\mathcal{L}_{AA'} = \mathcal{L}_{AI} - n' AI$$

$$\mathcal{L}_{A'M} = n' A'M .$$

$$A \curvearrowright A' \curvearrowright M .$$

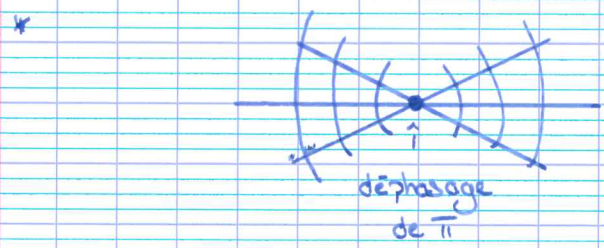
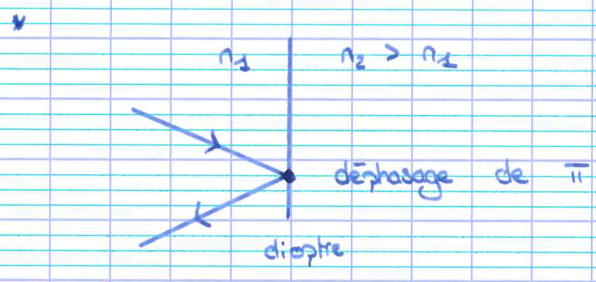
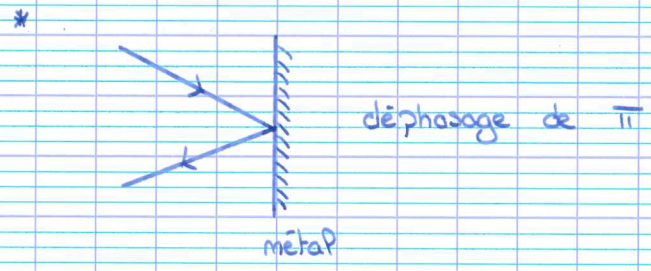
$$\mathcal{L}_{AM} = \mathcal{L}_{AA'} + \mathcal{L}_{A'M} .$$

On donne aux rayons virtuels l'indice de leur prolongement réel.

ad la par. va d'un
endroit à un autre
P change.

6. Déphasages exceptionnels

Certains déphasages se font sur place.



Certains traitements de surface de certains verres provoquent un déphasage.

III. Stigmatisme et chemin optique

(par rapport à une Penti Pte)



↑
Définition : On dit que deux points A et A' sont en stigmatisme lorsque tout rayon passant par A ressort en passant par A'.

1. Cas d'une image à l'infini

cf. figure 10

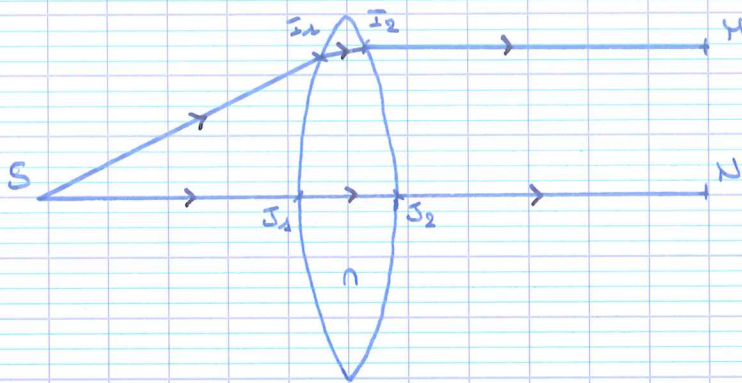
A cause du plan d'onde : $\psi(CM) = \psi(CN)$

donc $\psi(CM) - \psi(CS) = \psi(CN) - \psi(CS)$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \mathcal{L}_{SM} = \frac{2\pi}{\lambda} \mathcal{L}_{SN}$$

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{SN} \quad \text{ou} \quad \Delta t_{SM} = \Delta t_{SN}$$

Cela s'explique par l'épaisseur de verre :



$$SI_1 + n I_1 I_2 + I_2 M = SJ_1 + n J_1 J_2 + J_2 N$$

l'épaisseur de la lentille doit être soigneusement ajustée.

2. Couple objet-image à distance finie

cf. figure 11

-> Si les points A et B sont sur une même surface d'onde :
 $\psi(A) = \psi(B)$

$$\mathcal{L}_{AH_1H_2A'} = r + \mathcal{L}_{H_1H_2} + r'$$

$$\mathcal{L}_{AN_2N_2A'} = r + \mathcal{L}_{N_2N_2} + r'$$

$$\text{or, } |\psi(CM_2)| - |\psi(CM_1)| = \frac{2\pi}{\lambda} \mathcal{L}_{H_1H_2}$$

$$\text{et } |\psi(CN_2)| - |\psi(CN_1)| = \frac{2\pi}{\lambda} \mathcal{L}_{N_2N_2}$$

égaux

égaux

grâce aux surfaces d'ondes

$$\text{donc } \mathcal{L}_{H_1H_2} = \mathcal{L}_{N_2N_2}$$

$$d'o\grave{u} \quad \mathcal{L}_{AM_2M_2A'} = \mathcal{L}_{AN_2N_2A'}$$



Théorème de stigmatisme : Entre un objet et son image, le chemin optique est indépendant du rayon lumineux suivi.

3. Cas du miroir plan

cf. figure 13

pendante

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{AH} &= \mathcal{L}_{AA'} + \mathcal{L}_{A'M} \\ &= \underbrace{AI - IA'}_0 + \mathcal{L}_{A'M} \\ &= \mathcal{L}_{A'M} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{AH} &= AI + IM \\ &= A'I + IM \\ &= A'M \end{aligned}$$

(astuce qui simplifie les calculs)

IV. Lumière naturelle

1. Modèle rayonnement émis par une source

Description de la lumière naturelle : cf. polycopié

Au début : monochromatique, ω

$$s = s_0 \cos(\varphi(CH) - \omega t)$$

Modèle de l'onde :

$$s(CH, t) = s_0(CH) \cos(\underbrace{\varphi(CH, t)}_{\text{présente des fluctuations aléatoires}} - \omega t)$$

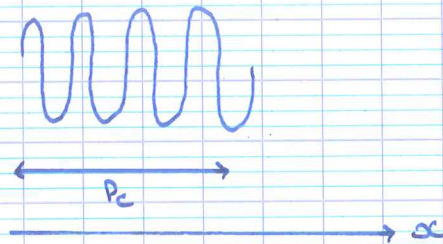
présente des
fluctuations
aléatoires

2. Temps et Longueur de cohérence

Temps de cohérence : On appelle temps de cohérence τ_c d'une source ou d'une onde lumineuse la durée pendant laquelle la phase $\psi(M, t)$ reste « relativement » stable en un point donné.

$\Delta t \ll \tau_c$, donc entre t_0 et $t_0 + \Delta t$: $\psi(M, t_0) \approx \psi(M, t_0 + \Delta t)$.
 $\tau \ll \tau_c$.

Longueur de cohérence : $l_c = c \tau_c$
 (ou longueur des trains d'onde)



3. Densité spectrale

Au laboratoire, on peut mesurer le spectre d'une source lumineuse qui donne la répartition de la puissance en fonction de la longueur d'onde.

Il existe deux types de spectres :

- spectre de raies (cf. figure 14)
- spectre continu (cf. figure 15)

$$\begin{aligned}
 dI &= I_\lambda(\lambda) d\lambda \\
 &= I_\nu(\nu) d\nu \\
 &= \underbrace{I_\sigma(\sigma)}_{\text{densités spectrales}} d\sigma
 \end{aligned}$$

En réalité, aucun raie n'est un parfaitement monochromatique.

(cf. figure 16)

La raie présente une largeur $\Delta\lambda$ (ou $\Delta\nu$ ou $\Delta\sigma$).

$$\Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_A$$

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

$$= \frac{c}{\nu_B} - \frac{c}{\nu_A}$$

$$= \frac{c(\nu_A - \nu_B)}{\nu_A \nu_B}$$

$$\text{donc } \Delta\lambda \approx c \frac{\Delta\nu}{\nu^2}$$



cas $\Delta\lambda \ll \lambda_A$

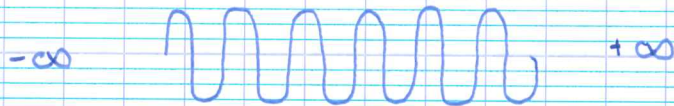
et $\Delta\lambda \ll \lambda_B$

$$\Delta\nu = \frac{\nu^2}{c} \Delta\lambda$$

$$\text{donc } \Delta\nu = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda^2}$$

4. Largeur des raies et temps de cohérence

Cas idéal : ω est unique, ν et λ également.



$\tau_c \rightarrow \infty$

donc $\Delta\nu \rightarrow 0$

Dans le cas réel, τ_c est fini (borné), $\Delta\nu$ est non nul.

On admet :

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau_c}$$



$$\text{et } \rho_c = c \tau_c \approx \frac{c}{\Delta\nu}$$

Concept très important pour les expériences.

V. Récepteurs et intensité lumineuse

1. Intensité

La lumière est détectée par des photorécepteurs.

(œil, photodiode, phototransistor, capteur CCD ...)

Ces détecteurs ont tous un certain temps de détection ou temps de réponse \bar{T}_d .

$$\bar{T}_d (\text{œil}) \approx 99 \frac{1}{100} \text{ s}$$

$$\bar{T}_d (\text{photodiode}) \approx 1 \mu\text{s}$$

$$\bar{T}_d (\text{phototransistor}) \approx 1 \mu\text{s}$$

$$\bar{T}_d (\text{capteur CCD}) \approx 1 \text{ ms}$$

Peu importe le détecteur, $\bar{T}_d \gg \tau$.

La réponse du capteur est proportionnelle à :

$$\int_{t_0}^{t_0 + \bar{T}_d} P(t) dt$$

proportionnel

$$= \bar{T}_d \langle P \rangle$$

Or $P \propto E^2$

donc réponse $\propto \langle E^2 \rangle$

D'où la définition :

l'intensité lumineuse en un point M est définie par :

$$I(M) = \langle s^2(M, t) \rangle$$

(à un facteur près).

→ ou "éclairage"

2. Intensité et notation complexe

Notation \underline{e} :

$$s = s_0 \cos(\psi - \omega t)$$

$$\underline{s} = s_0 e^{j(\psi - \omega t)}$$

$$I = \langle s_0^2 \cos^2(\psi - \omega t) \rangle = \frac{1}{2} s_0^2$$

$$I = \frac{1}{2} \underline{s} \underline{s}^* = \frac{1}{2} |\underline{s}|^2 \quad \text{complexe conjugué.} \quad \text{Ⓢ}$$

⚠ $\underline{s}^2 = \text{bêtise !!}$

3. Sensibilité d'un détecteur (hors-programme)

Exemple : photodiode

Lumière $P \rightarrow$ intensité électrique i

$$* \quad i = S P \quad \text{ou} \quad S = \frac{i}{P}$$

On appelle S la « sensibilité »

$$* \quad Q = \frac{N_e}{N_{\text{photons}}} \quad \begin{array}{l} \text{(produits)} \\ \text{(regus)} \end{array}$$

On appelle Q P' « efficacité quantique » ou « rendement quantique »

En pratique : $Q \leq 0,5$

lien entre S et Q :

Pendant T_d , N_{ph} photons arrivent.

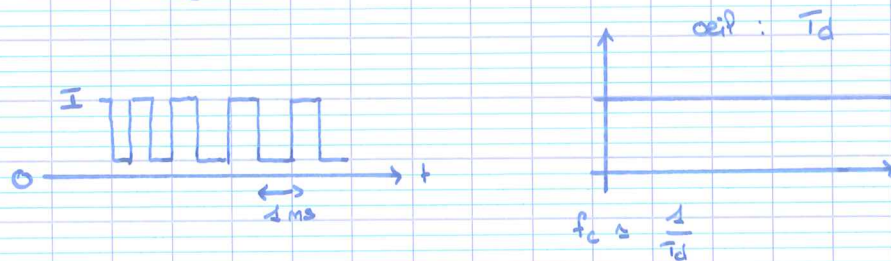
$$P = \frac{N_{ph} \times h\nu}{T_d} \quad \text{et} \quad i = \frac{N_e \cdot e}{T_d}$$

$$S = \frac{i}{P} = \frac{N_e \cdot e}{N_{ph} \times h\nu} = Q \frac{e}{h\nu} \quad \text{donc} \quad S \leq 0,4 \text{ A.W}^{-1}$$

4. Rôle du temps de réponse

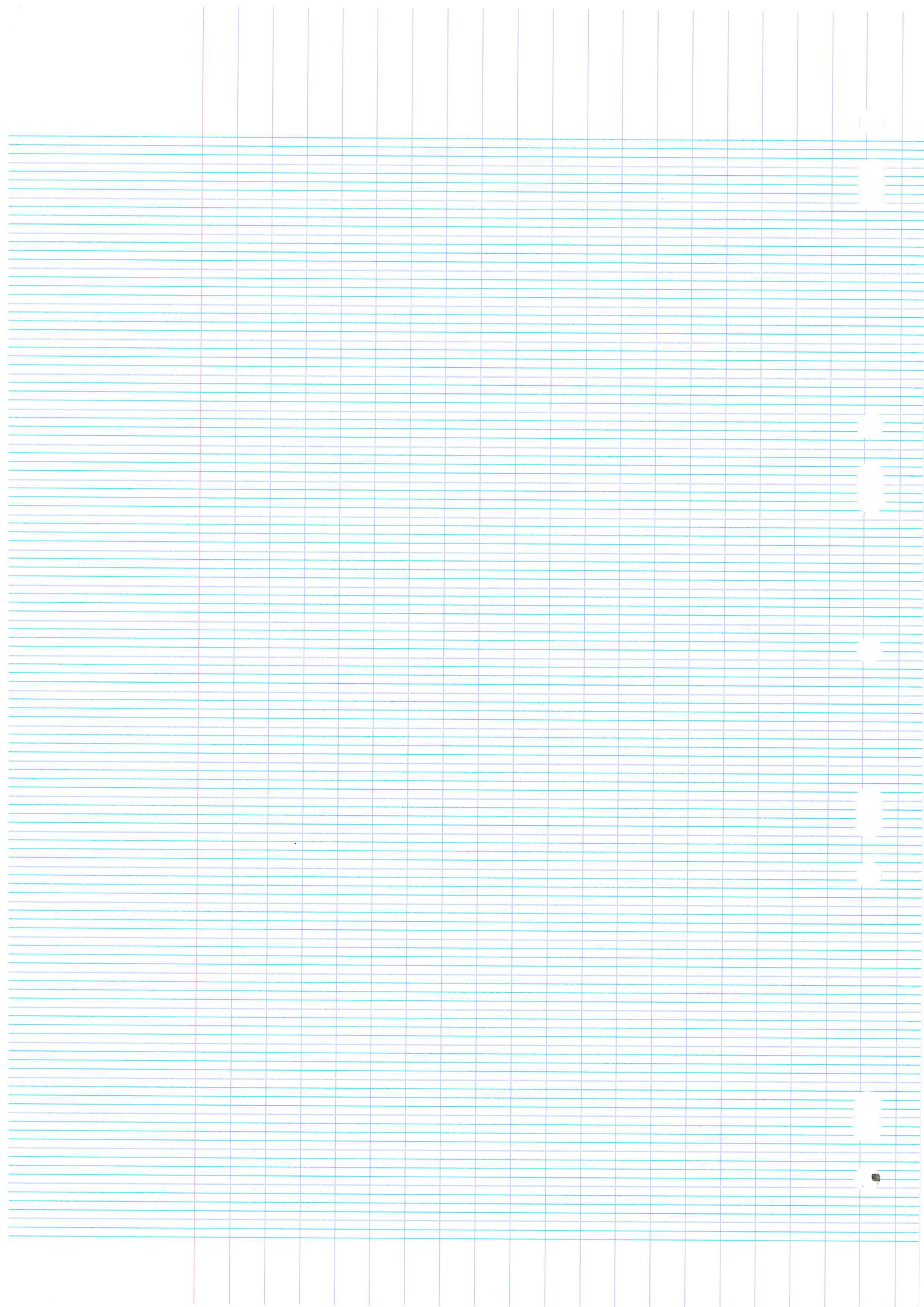
Un temps de réponse T_d trop long empêche d'enregistrer des phénomènes trop rapides.

Exemple : clignotement rapide



On a un effet « passe-bas » ou « moyenneur ».

Pour enregistrer des variations rapides, il faut un capteur plus rapide.

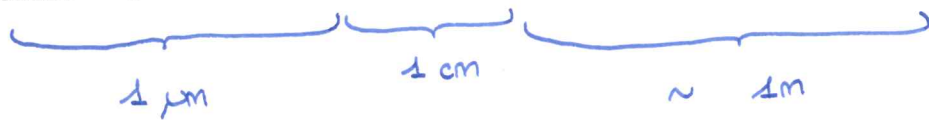


Pour passer une seule bande de 10 nm.

(une raie)

	Lumière blanche	filtre interférentiel	Lampe spectrale	Laser He-Ne	Laser monomode
$\Delta\lambda$ nm	400	10	0,1	10^{-3}	10^{-6}
$\Delta\nu$ Hz	$3 \cdot 10^{14}$	10^{13}	10^{11}	10^9	10^6
L_c	$1 \mu\text{m}$	$30 \mu\text{m}$	3 mm	30 cm	300 m

TABLE 1 - Ordre de grandeur des longueurs de cohérences de quelques sources usuelles.



Description de la lumière naturelle

Nous avons jusqu'ici considéré que la lumière comme une onde avec une variation temporelle parfaitement sinusoïdale, sa phase évoluant donc de manière déterministe au cours du temps. Une telle représentation peut sans doute convenir pour une onde radio émise par une antenne, mais malheureusement elle n'est guère réaliste pour la lumière. Dans une source lumineuse classique, la lumière n'est en effet pas rayonnée par une « antenne » unique, mais par une foule d'atomes subissant des excitations et désexcitations radiatives. L'onde lumineuse résulte donc de la superposition d'une multitude d'ondes très petites émises sans concertation avec des phases relatives aléatoires. Si les différents atomes émettent des fréquences distinctes, la lumière ainsi produite n'est évidemment pas monochromatique. Mais même dans le cas où tous émettraient à la même pulsation ω , elle ne le serait pas.

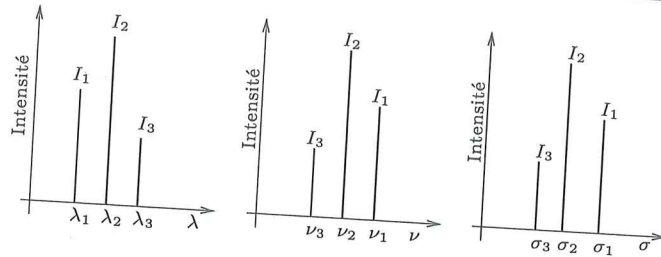


FIGURE 14 - Allure schématique d'un spectre de raie. On peut repérer chaque raie par sa longueur d'onde λ , par sa fréquence ν ou par son nombre d'onde σ

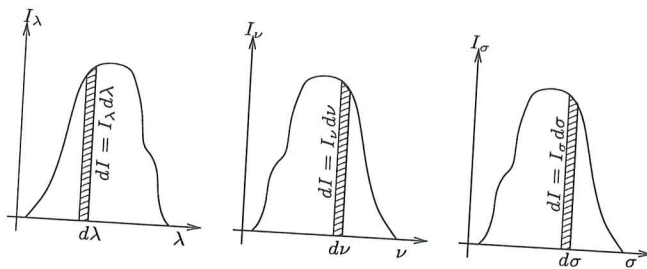


FIGURE 15 - Allure schématique d'un spectre continu. On peut utiliser en abscisse la longueur d'onde λ , la fréquence ν ou le nombre d'onde σ . Un intervalle infinitésimal équivaut à une raie d'intensité $dI = I_\lambda d\lambda$ ou $dI = I_\nu d\nu$ ou encore $dI = I_\sigma d\sigma$. Les fonctions I_λ , I_ν et I_σ s'appellent densité spectrale.

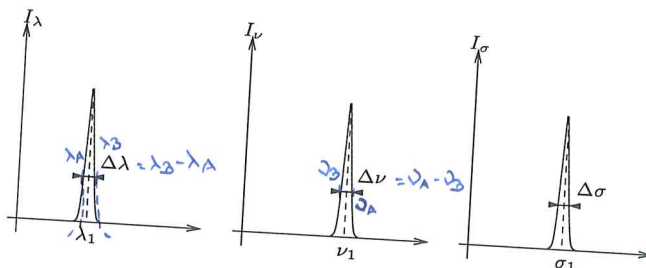


FIGURE 16 - Vue resserrée d'une raie : on voit apparaître sa largeur spectrale $\Delta\lambda$, $\Delta\nu$ ou $\Delta\sigma$ selon la représentation choisie.

Temps de cohérence

On appelle temps de cohérence τ_c d'une source ou d'une onde lumineuse la durée pendant laquelle la phase $\Psi(M, t)$ reste « relativement » stable en un point donné. Il est toujours très supérieur à la période $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

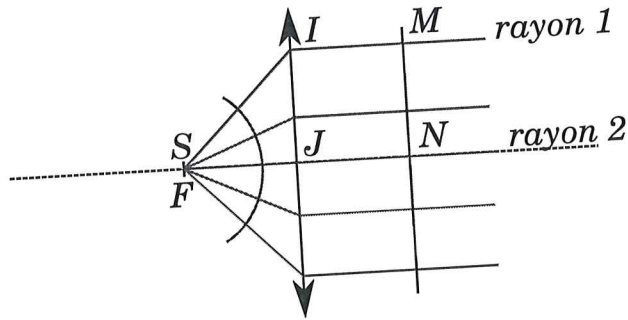


FIGURE 10 – Analyse du chemin optique dans le cas d'une image à l'infini.

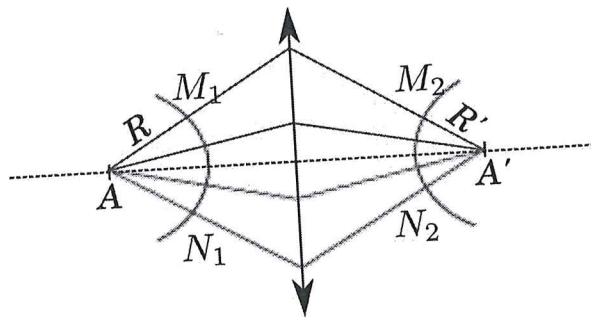


FIGURE 11 – Analyse du chemin optique entre un objet et une image à distance finie.

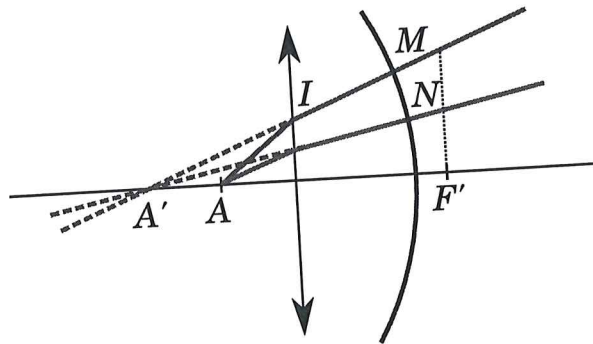


FIGURE 12 – Analyse du chemin optique entre un objet réel et une image virtuelle.

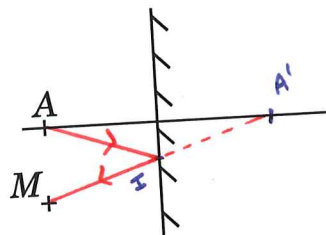


FIGURE 13 – Analyse du chemin optique entre un objet réel et son image dans un miroir plan.

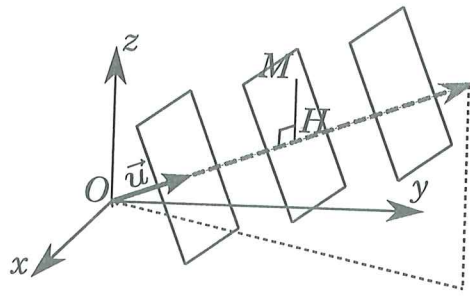


FIGURE 6 – Onde plane oblique sur les axes de coordonnées.

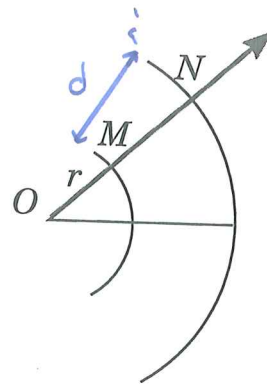


FIGURE 7 – Phase et retard dans une onde sphérique.

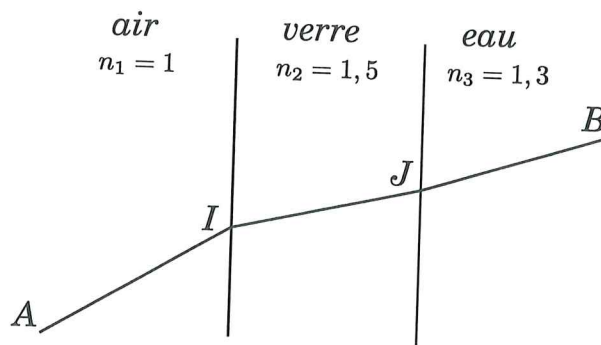


FIGURE 8 – Exemple de chemin optique dans une succession de trois milieux homogènes.

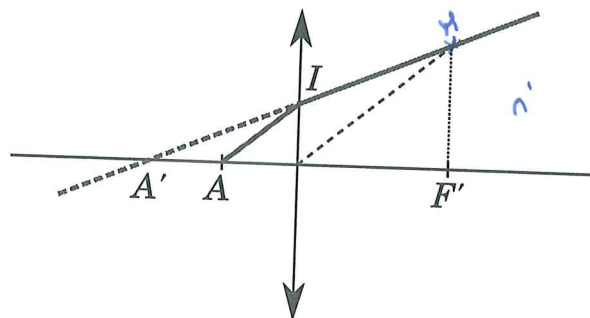


FIGURE 9 – Exemple de chemin optique pour un rayon virtuel.

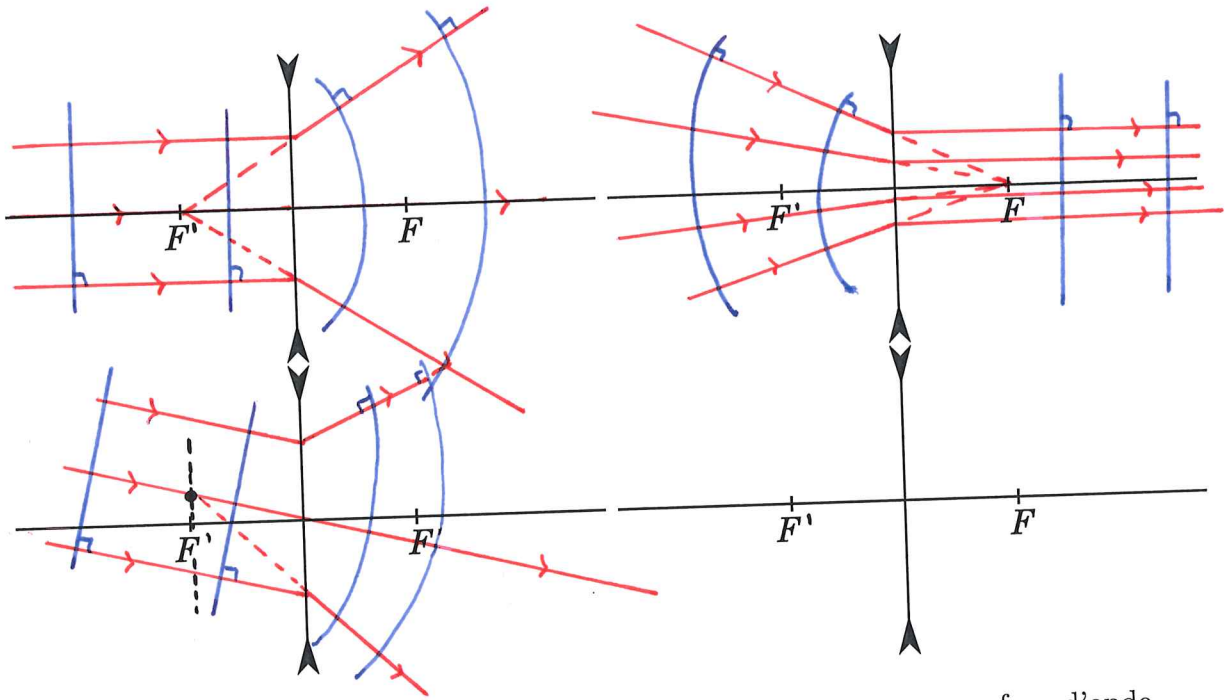


FIGURE 3 – Exemples d'action d'une lentille divergente sur une surface d'onde.

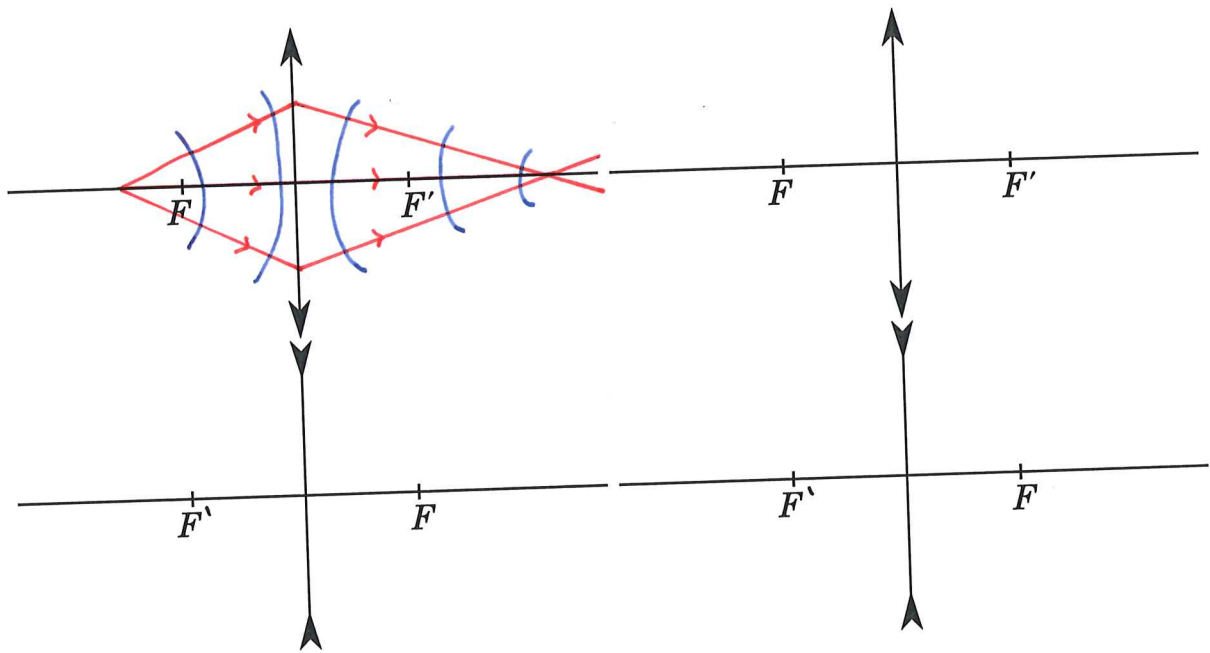


FIGURE 4 – Exemples de transformation d'une onde sphérique en une autre par une lentille

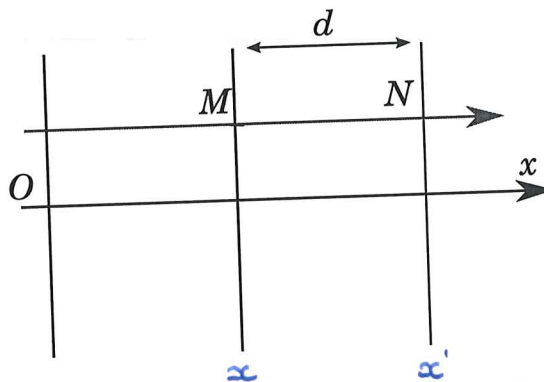


FIGURE 5 – Phase et retard dans une onde plane

Définition

On appelle onde un phénomène dans lequel les variations temporelles d'une grandeur se propagent dans l'espace au cours du temps.

Définition

On appelle surface d'onde un ensemble de points M tels que $\Psi(M)$ soit constant.

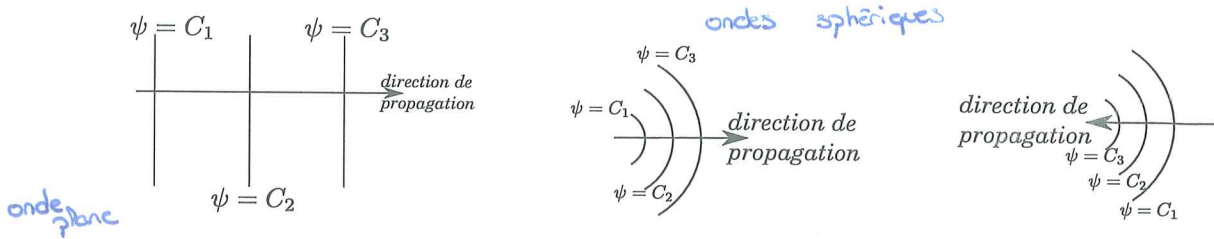


FIGURE 1 – Types d'ondes fréquents en optique : onde plane, onde sphérique divergente, onde sphérique convergente

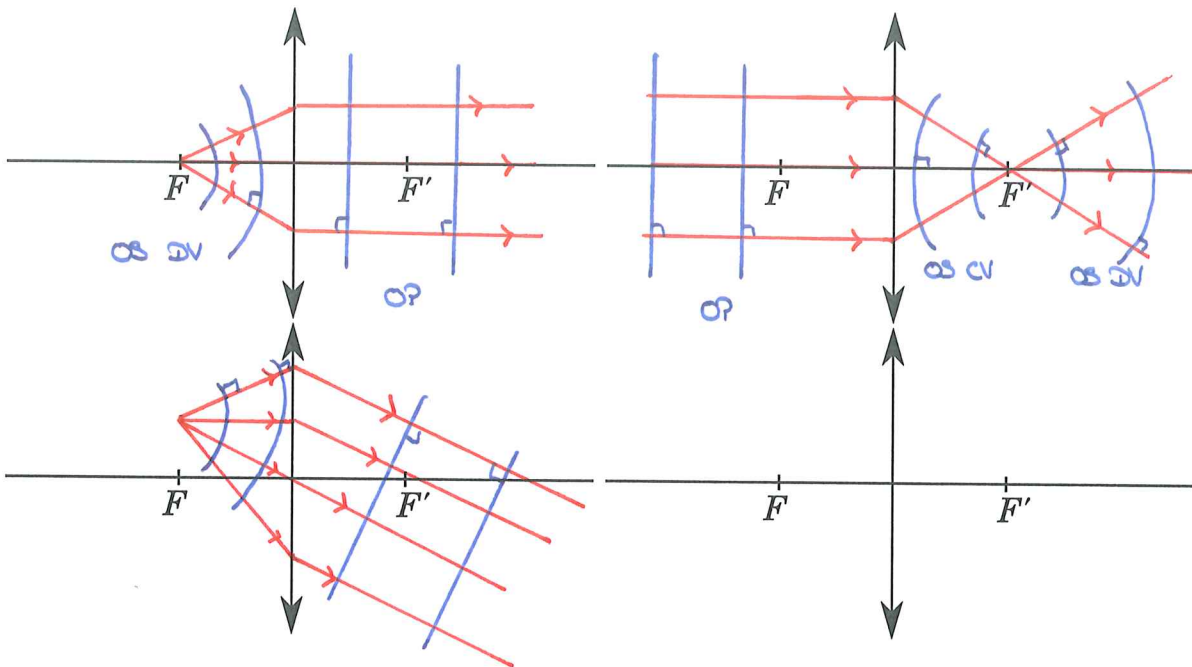


FIGURE 2 – Exemples d'action d'une lentille convergente sur une surface d'onde.

Théorème de Malus

Les rayons lumineux sont perpendiculaires aux surfaces d'onde.

Théorème de stigmatisme

Entre un point objet et son image, le chemin optique est indépendant du rayon lumineux suivi.

Ondes lumineuses

I Ondes lumineuses et rayons lumineux

1. Scalaire optique
2. Ondes monochromatiques
3. Surfaces d'ondes
4. Ondes localement planes
5. Rayons lumineux et théorème de Malus
6. Les lentilles comme transformateurs de phase

II Déphasage et chemin optique

1. Cas d'une onde plane
2. Cas d'une onde plane oblique sur les axes de coordonnées
3. Cas d'une onde sphérique divergente
4. Onde localement plane
5. Chemin optique associé à des rayons virtuels (HP ?)
6. Déphasages exceptionnels

III Stigmatisme et chemin optique

1. Cas d'une image à l'infini
2. Couple objet-image à distance finie
3. Cas du miroir plan

IV Lumière naturelle

1. Modèle rayonnement émis par une source
2. Temps et longueur de cohérence
3. Densité spectrale
4. Largeur des raies et temps de cohérence

V Récepteurs et intensité lumineuse

1. Intensité
2. Intensité et notation complexe
3. Sensibilité d'un détecteur
4. Rôle du temps de réponse