

BASES de l'OPTIQUE ONDULATOIRE

1- Vitesse de propagation des ondes ?

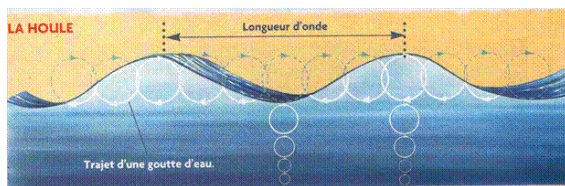
Ondes mécaniques

Houle : propagation d'une déformation de surface à la vitesse

$$c \approx \sqrt{gh} \approx 10 \text{ m.s}^{-1} \text{ au rivage.}$$

Longueur d'onde $\lambda \approx 30 \text{ m}$

Période $T \approx 3 \text{ s}$ avec $\lambda \approx c \times T$



Acoustique :

propagation d'une **variation de la pression** locale de l'air (milieu de propagation)

Vitesse du son $c \approx \sqrt{\gamma RT} \approx 20\sqrt{T} \approx 330 \text{ m.s}^{-1}$ pour de l'air ambiant.

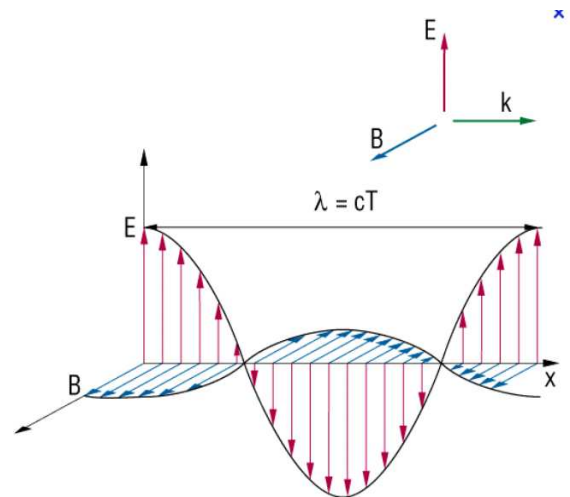
Ondes électromagnétiques

Propagation d'une **variation du champ électrique et du champ magnétique** local dans la direction de l'axe x.

Vitesse de la lumière dans le vide

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad c = 299\,792\,458 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \approx 300\,000 \text{ km.s}^{-1}$$

c/n : vitesse de la lumière dans un milieu d'indice optique n .



2- Ondes progressives

Signal $a(t, x)$ propagation 1D le long de l'axe Ox

- représentation réelle $a(t, x) = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0)$

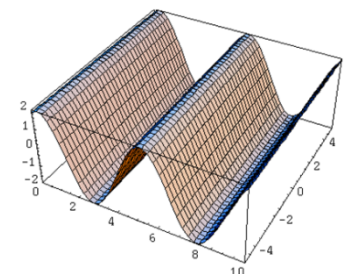
- représentation complexe $a(t, x) = A e^{j(\omega t - kx + \varphi_0)}$

(avec $j^2 = -1$)

L'argument (du sinus ou de l'exponentielle) est appelé la **phase** $\omega t - kx + \varphi_0$

Où φ_0 est la phase à l'origine (quand $x = 0$ et $t = 0$).

Si $A = \text{Cte}$ (donc indépendant de x !) alors l'onde est « **plane** » : même état de vibration dans un plan normal à l'axe de propagation.



Double périodicité : période spatiale (**longueur d'onde**) λ et **période** temporelle T avec $\lambda = cT$ où c est la vitesse de la lumière (de l'onde EM en général).

- **pulsation** ω , **fréquence** (temporelle) ν en $\text{Hz} \equiv \text{s}^{-1}$, période temporelle T avec $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$
- **vecteur d'onde** k , fréquence spatiale σ en m^{-1} , période spatiale λ avec $k = 2\pi\sigma = 2\pi/\lambda$

En physico-chimie, la fréquence spatiale σ est appelée « nombre d'onde ».

Q2- Interpréter la propagation spatiale des trois ondes (vis-à-vis de l'orientation de l'axe) :

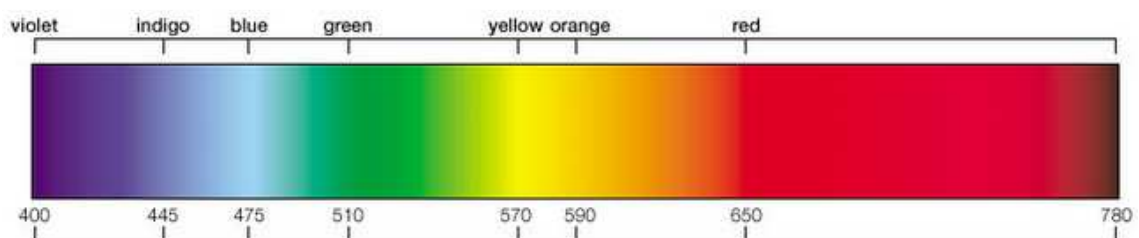
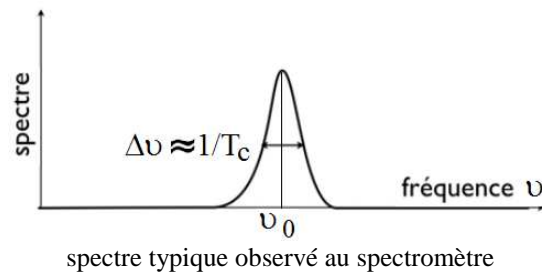
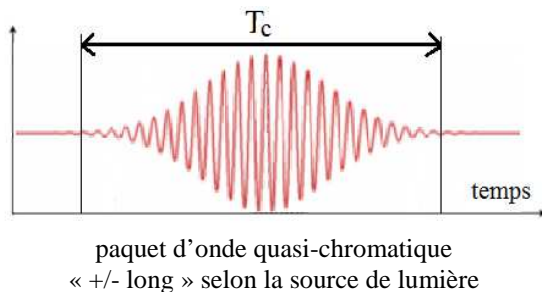
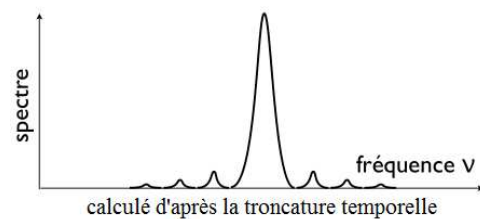
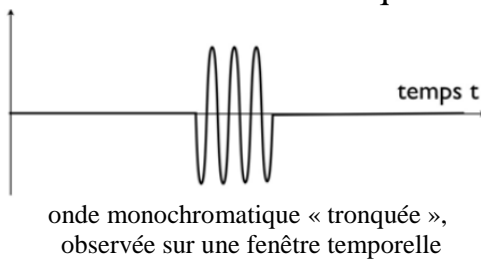
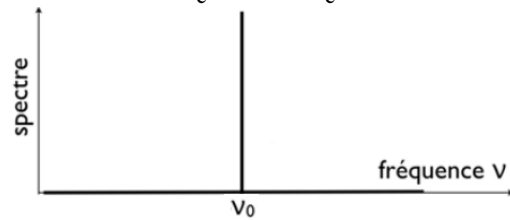
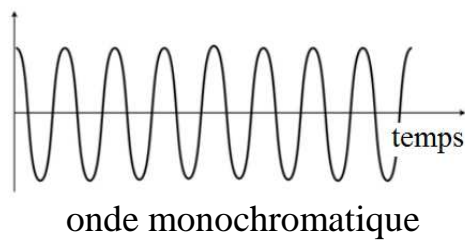
- * $a_1(t, x) = A \sin(\omega t - kx)$
- * $a_2(t, x) = A \sin(\omega t)$
- * $a_3(t, x) = A \sin(\omega t + kx)$

3- Trains d'onde émis par une source de lumière (longueur de cohérence L_c & durée de cohérence T_c)

Emission d'un photon
d'énergie $h\nu_0$

↔

émission d'un « train d'onde » à fréquence ν_0
durée d'émission $T_c \approx 1/\Delta\nu$
longueur du train $L_c \approx c \times T_c$

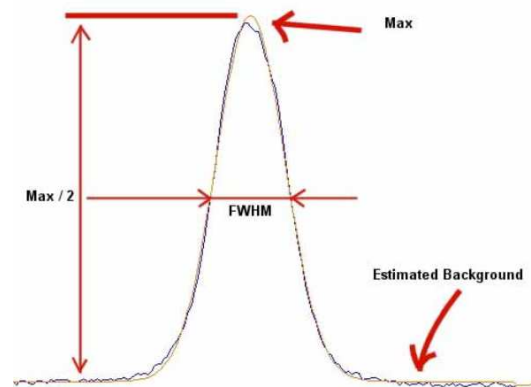


Q3a- Exprimer la fréquence ν en fonction de la longueur d'onde λ .
En déduire la plage de fréquence correspondant à la lumière visible.

Q3b- Obtenir par différentiation la relation entre $\Delta\nu$ et $\Delta\lambda$ d'une raie d'émission (« pleine largeur à mi-hauteur » en fréquence et en longueur d'onde : Full Width at Half Max FWHM).

Q3c- En déduire la durée de cohérence T_c , la longueur de cohérence L_c et le nombre de périodes N d'un train d'onde émis par les sources optiques suivantes :

- un laser He-Ne avec $\Delta\lambda = 1,9 \text{ pm}$ et $\lambda = 632,8 \text{ nm}$
- une diode laser avec $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ et $\lambda = 650 \text{ nm}$
- une lampe spectrale Na avec $\Delta\lambda = 0,2 \text{ nm}$ et $\lambda = 589 \text{ nm}$
- une lampe halogène blanche (limitée au visible)



4- Que voit-on sur un écran ? Que mesure un détecteur de lumière ?

Visible $400 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm} \leftrightarrow 1,3 \cdot 10^{-15} \text{ s} < T = \lambda/c < 2,5 \cdot 10^{-15} \text{ s}$

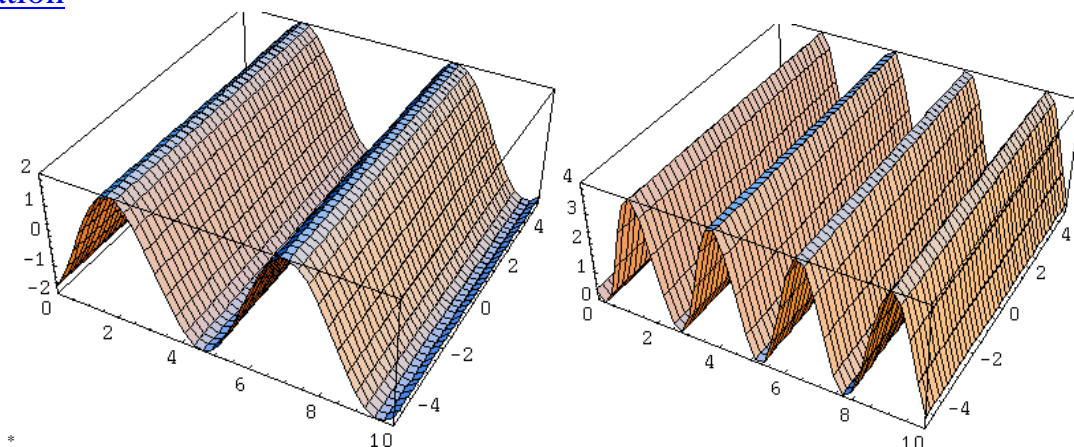
Les variations en fonction du temps sont très rapides !

Temps de réponse typique : œil humain t_r en $1/100^{\text{ième}}$ de s,
Détecteur rapide f_c en GHz $\rightarrow t_r$ en ns $\gg T_{\text{visible}}$

\rightarrow perception ou mesure de signaux optiques moyennés dans le temps

Le flux d'énergie reçu sur un écran perpendiculaire à la direction de propagation est proportionnel à la **moyenne temporelle du carré du module de l'amplitude** du signal $\propto \langle |a(t, x)|^2 \rangle$

[animation](#)



En utilisant la représentation $a(t, x) = A e^{j(\omega t - kx)}$, le flux détecté sur la surface S est $\propto \langle |a(t, x)|^2 \rangle$ donc :

$$F_{\text{détecté}} = S \times \frac{1}{t_{\text{dét}}} \int_0^{t_{\text{dét}}} K a \times a^* dt$$

$$F_{\text{détecté}} = S \times \frac{1}{t_{\text{dét}}} \int_0^{t_{\text{dét}}} K A e^{j(\omega t - kx + \varphi_0)} \times A e^{-j(\omega t - kx + \varphi_0)} dt$$

$$F_{\text{détecté}} = S \times \frac{1}{t_{\text{dét}}} \int_0^{t_{\text{dét}}} K A \times A dt = S \times K A^2 \times \frac{1}{t_{\text{dét}}} \int_0^{t_{\text{dét}}} dt$$

$$F_{\text{détecté}} = S \times K A^2 \times \frac{t_{\text{dét}} - 0}{t_{\text{dét}}} = S K A^2$$

Le flux détecté est $F_{\text{détecté}} = S \times K A^2$ et l'éclairement reçu est $E_{\text{détecté}} = K A^2$

Les détecteurs sont insensibles à la fréquence naturelle de la lumière (à 10^{14} Hz !).

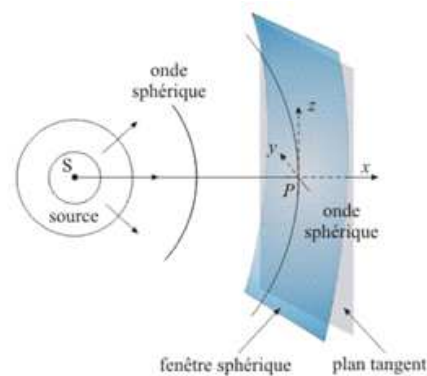
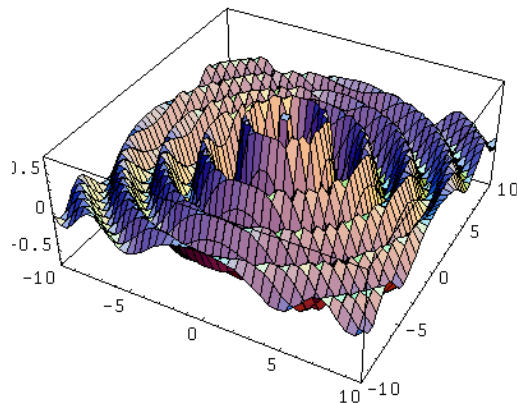
Il est possible de moduler plus « lentement » l'émission de lumière lorsque la source est alimentée électroniquement afin de transmettre des informations : fibre optique, télécommande IR etc.

Q4- Une source ponctuelle émet une onde sphérique isotrope

$a(t, r) = A(r) e^{j(\omega t - kr)}$ où l'amplitude $A(r)$ ne dépend que de la distance à la source sur un axe radial, notée r .

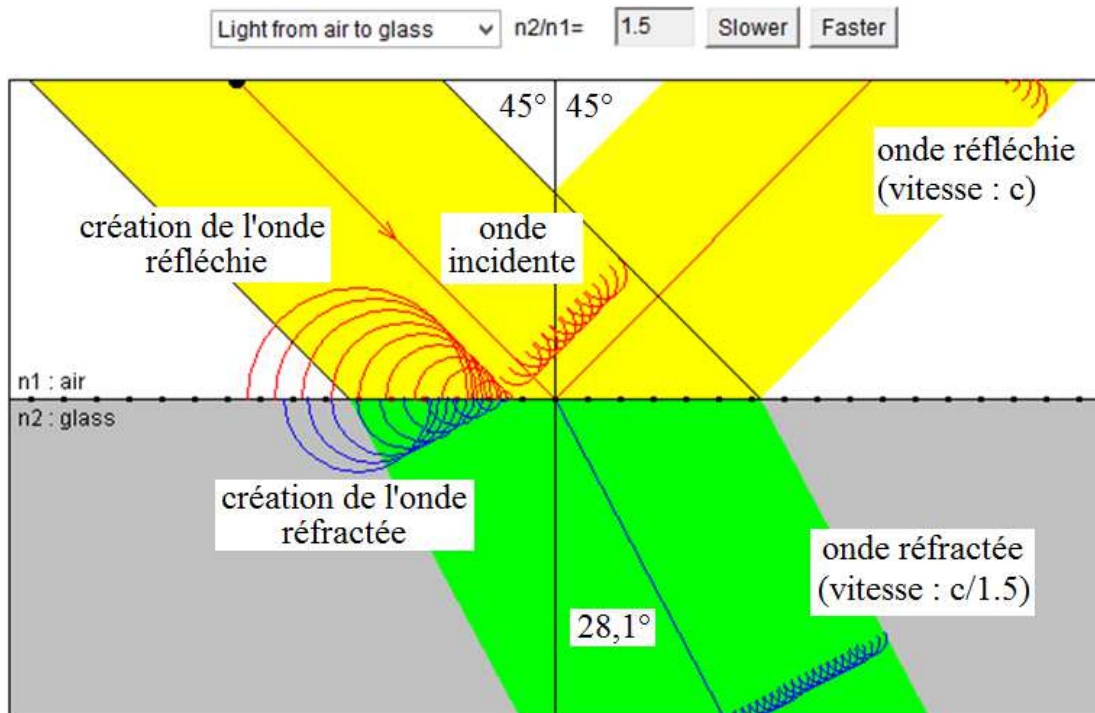
Le flux total émis par la source dans tout l'espace est noté F .

Montrer que l'amplitude peut alors s'écrire : $A(r) = \frac{B}{r}$.



Remarquer qu'une onde « sphérique » devient « plane » lorsqu'elle est loin de sa source : plan tangent aux sphères.

5- Ondes réfléchies et transmises sur un dioptre



Voir le simulateur

Construction des ondes propagées (incidente, réfractée et réfléchie) avec la **méthode de Huygens-Fresnel** :

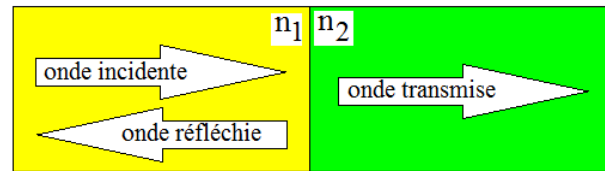
« Pour calculer l'amplitude d'une onde à l'extérieur d'une région délimitée par une surface S entourant les sources, il suffit de supposer que chaque point M de cette surface se comporte comme une source isotrope (appelée source secondaire) dont la phase et l'amplitude sont égales à celle de l'onde incidente au point M ».

Remarque : cette méthode se justifie à partir des lois de l'électromagnétisme, elle est particulièrement utile pour l'étude de la diffraction.

Onde incidente

$$a_{\text{incident}}(t, x) = A \sin(\omega t - kx)$$

$$\text{Flux incident } F_{\text{incident}} = KS A^2$$

**Onde transmise** (ou réfractée)

$$a_{\text{transmise}}(t, x) = t_{12} \times A \sin(\omega t - kx)$$

$$\text{avec } t_{12} = 2n_1 / (n_1 + n_2)$$

$$\text{Flux transmis } F_{\text{transmis}} = T \times F_{\text{incident}}$$

avec $T = t_{12}^2$ facteur de transmission énergétique.

Onde réfléchie

$$a_{\text{transmise}}(t, x) = r_{12} \times A \sin(\omega t - kx) \text{ si } n_1 > n_2$$

$$a_{\text{transmise}}(t, x) = r_{12} \times A \sin(\omega t - kx + \pi) \text{ si } n_1 < n_2$$

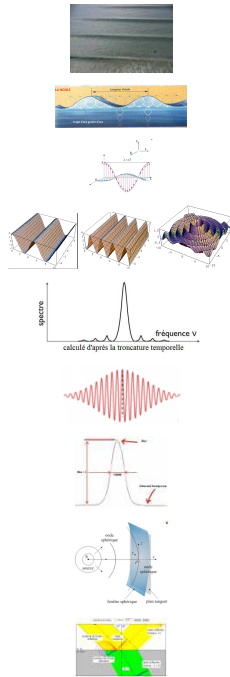
$$\text{avec } r_{12} = (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)$$

Attention : remarquer le déphasage supplémentaire de π quand l'onde se réfléchit sur **un milieu plus réfringent**

$$\text{Flux réfléchi } F_{\text{réfléchi}} = R \times F_{\text{incident}} \text{ avec } R = r_{12}^2 \text{ facteur de réflexion énergétique.}$$

T + R = 1 sur le dioptre : l'énergie est soit réfléchie, soit transmise.
pas de pertes d'énergie au niveau d'un dioptre.

Sources des illustrations et des simulations



<http://www.planete-powershot.net/photos/74621-houle.html>

<http://tpehoule.free.fr/page.php?page=def>

<http://chrisluck1.unblog.fr/la-microphonie-hf/>

<http://www.photo-lovers.org/waves-planar.shtml.fr>
<http://www.photo-lovers.org/waves-spherical.shtml.fr>

etc. <http://wiki.epfl.ch/houdre/documents/OptII%202011-2012/OptII.2%202012.pdf>

http://en.wikipedia.org/wiki/Coherence_%28physics%29

<http://www.astrosurf.com/vdesnoux/tutorial9.html>

http://www-lemm.univ-lille1.fr/physique/ondes_enligne/chapitre6/ch6_1_3.htm

<http://craq-astro.ca/phy1971/chap5/refraction/refraction.htm>

Simulations

- <http://www.photo-lovers.org/waves-planar.shtml.fr>
- <http://www.photo-lovers.org/waves-spherical.shtml.fr>
- <http://craq-astro.ca/phy1971/chap5/refraction/refraction.htm>

BASES de l'OPTIQUE ONDULATOIRE 1

1- Vitesse de propagation des ondes ? 1

2- Ondes progressives 1

3- Trains d'onde émis par une source de lumière (longueur de cohérence L_c & durée de cohérence T_c) 2

4- Que voit-on sur un écran ? Que mesure un détecteur de lumière ? 3

5- Ondes réfléchié et transmise sur un dioptre 5

Sources des illustrations et des simulations 7