

Interférences à deux ondes

Sommaire

I Superposition d'ondes planes sinusoïdales de mêmes fréquences	2
I/A Déphasage et différence de marche	2
I/B Somme de signaux	4
I/C Bilan	8
II Interférences lumineuses	9
II/A Condition d'interférences : cohérence d'ondes lumineuses	9
II/B Formule de FRESNEL	9
II/C Chemin optique et déphasage	10
II/D Expérience des trous d'YOUNG	10

☒ Capacités exigibles

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Interférences entre deux ondes acoustiques, mécaniques ou lumineuses de même fréquence. | <input type="checkbox"/> Déterminer l'amplitude de l'onde résultante en un point en fonction du déphasage. |
| <input type="checkbox"/> Différence de chemin optique. Conditions d'interférences constructives ou destructives. | <input type="checkbox"/> Relier le déphasage entre les deux ondes à la différence de chemin optique. |
| <input type="checkbox"/> Exemple du dispositif des trous d'YOUNG éclairé par une source monochromatique. | <input type="checkbox"/> Établir l'expression littérale de la différence de chemin optique entre les deux ondes. |
| <input type="checkbox"/> Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives. | <input type="checkbox"/> Exploiter la formule de FRESNEL fournie pour décrire la répartition d'intensité lumineuse. |

✓ L'essentiel

☰ Démonstrations

- | | |
|---|----|
| <input type="checkbox"/> ON2.1 : Différence de marche | 3 |
| <input type="checkbox"/> ON2.2 : ΔL particuliers | 4 |
| <input type="checkbox"/> ON2.3 : Signal somme de même amplitude | 5 |
| <input type="checkbox"/> ON2.4 : Cas extrêmes même amplitude | 5 |
| <input type="checkbox"/> ON2.5 : Signal somme amplitudes \neq | 6 |
| <input type="checkbox"/> ON2.6 : Cas extrêmes amplitudes \neq | 7 |
| <input type="checkbox"/> ON2.7 : Intensité lumineuse OPPS | 9 |
| <input type="checkbox"/> ON2.8 : Formule de FRESNEL | 10 |
| <input type="checkbox"/> ON2.9 : Chemin optique et différence de chemin | 10 |
| <input type="checkbox"/> ON2.10 : Intensité et interfange | 12 |

☒ Définitions

- | | |
|--|----|
| <input type="checkbox"/> ON2.1 : Fronts d'ondes | 2 |
| <input type="checkbox"/> ON2.2 : Phase spatiale et déphasage | 2 |
| <input type="checkbox"/> ON2.3 : Hypothèses de somme | 4 |
| <input type="checkbox"/> ON2.4 : Cohérence entre sources | 9 |
| <input type="checkbox"/> ON2.5 : Chemin optique | 10 |
| <input type="checkbox"/> ON2.6 : Description du résultat | 11 |
| <input type="checkbox"/> ON2.7 : Présentation trous d'YOUNG | 11 |

☒ Propriétés

- | | |
|---|----|
| <input type="checkbox"/> ON2.1 : Approximation par une onde plane | 2 |
| <input type="checkbox"/> ON2.2 : Déphasage et différence de marche | 3 |
| <input type="checkbox"/> ON2.3 : ΔL particuliers | 3 |
| <input type="checkbox"/> ON2.4 : Signal somme même amplitude | 5 |
| <input type="checkbox"/> ON2.5 : Cas extrêmes même amplitude | 5 |
| <input type="checkbox"/> ON2.6 : Signal somme amplitudes \neq | 6 |
| <input type="checkbox"/> ON2.7 : Cas extrêmes amplitudes \neq | 7 |
| <input type="checkbox"/> ON2.8 : Intensité lumineuse | 9 |
| <input type="checkbox"/> ON2.9 : Formule de FRESNEL | 10 |
| <input type="checkbox"/> ON2.10 : Déphasage et différence de chemin optique | 10 |
| <input type="checkbox"/> ON2.11 : Intensité et interfange | 12 |

☒ Applications

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> ON2.1 : Interférences sonores | 8 |
|--|---|

☒ Exemples

- | | |
|---|----|
| <input type="checkbox"/> ON2.1 : Superpositions sur une corde | 4 |
| <input type="checkbox"/> ON2.2 : Somme de signaux | 5 |
| <input type="checkbox"/> ON2.3 : Cas extrêmes amplitudes \neq | 7 |
| <input type="checkbox"/> ON2.4 : Cohérence | 9 |
| <input type="checkbox"/> ON2.5 : Interfrange | 12 |

♥ Points importants

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> ON2.1 : Analyse même amplitude | 6 |
| <input type="checkbox"/> ON2.2 : Analyse amplitudes différentes | 8 |
| <input type="checkbox"/> ON2.3 : Interférences (pour $\Delta\varphi_0 = 0$) | 8 |
| <input type="checkbox"/> ON2.4 : Condition d'interférence | 9 |

I Superposition d'ondes planes sinusoïdales de mêmes fréquences

I/A Déphasage et différence de marche

I/A) 1 Approximation par une onde plane

Soit une source en un point S, émettant une onde sinusoïdale. En toute généralité, et même sans atténuation, son amplitude A dépend du point considéré :

$$s(\vec{r},t) = A(r) \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi_0)$$

avec \vec{k} le vecteur d'onde et \vec{r} le vecteur position en 3 dimensions. En effet, l'énergie totale d'une perturbation se répartit selon l'espace disponible, donc A dépend de r . On les différencie alors selon les « vagues » qu'elles forment :

Définition ON2.1 : Fronts d'ondes

Si les fronts d'ondes dessinent :

- ◊ une **droite**, alors l'onde est **plane** ;
- ◊ un **cercle**, alors l'onde est **circulaire** ;
- ◊ une **sphère**, alors l'onde est **sphérique**.

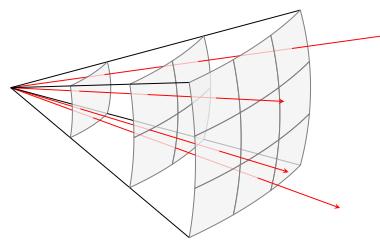


FIGURE ON2.1 – Front d'onde sphérique.

Pour obtenir de résultats simples, on se limite à des ondes planes avec l'approximation suivante :

♥ Propriété ON2.1 : Approximation par une onde plane

À des distances de la source S **suffisamment grandes devant la longueur d'onde λ** , on peut approximer la vibration $s(M,t)$ par une **onde plane** :

avec A constante au voisinage de M.

FIGURE ON2.2 –
Approximation par une onde plane

I/A) 2 Déphasage

♥ Définition ON2.2 : Phase spatiale et déphasage

Soit deux signaux sinusoïdaux, de **même fréquence, longueur d'onde et nature**, provenant de 2 sources S_1 et S_2 , se superposant en un point M. Avec $n \in [1; 2]$:

On introduit alors pour simplifier la **phase spatiale** :

et

FIGURE ON2.3

Ainsi, le **déphasage** entre s_2 et s_1 se réduit à leur **différence de phase spatiale** :

♥ Rappel ON2.1 : Déphasages particuliers

En phase

Deux signaux sont **en phase** si leur **déphasage** est **nul** (modulo 2π) :

Les signaux passent par leurs valeurs maximales et minimales aux mêmes instants, et s'annulent simultanément.

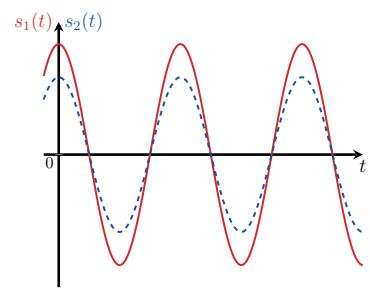


FIGURE ON2.4 – En phase.

En quadrature

Deux signaux sont en **quadrature phase** si leur déphasage est de $\pm\pi/2$ (modulo 2π) :

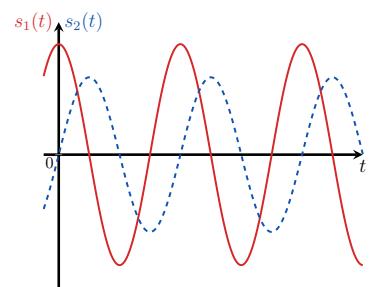


FIGURE ON2.5 – Quadrature.

En opposition

Deux signaux sont en **opposition de phase** si leur déphasage est de $\pm\pi$ (modulo 2π) :

Lorsqu'un signal passe par sa valeur maximale, l'autre est à sa valeur minimale, mais ils s'annulent simultanément.

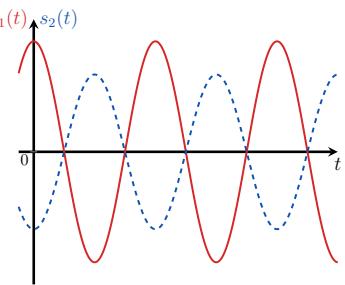


FIGURE ON2.6 – Opposition.

I/A) 3 Différence de marche

Démonstration ON2.1 : Différence de marche

Comme les fréquences sont les mêmes, le déphasage se réexprime par une différence de distances :

♥ Propriété ON2.2 : Déphasage et différence de marche

On a alors

$$\text{avec } k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Déphasage à l'origine

Déphasage à l'origine

Interprétation ON2.1 : Différence de marche

ΔL traduit la **distance supplémentaire** que doit parcourir une onde par rapport à une autre pour arriver au même point M. Comme elles vont à la même vitesse c , cela **introduit un retard**, c'est-à-dire un déphasage.

♥ Propriété ON2.3 : ΔL particuliers

Pour des sources de même phase à l'origine, on a $\Delta\varphi_0 = 0$. Les déphasages particuliers se réécrivent alors en termes de différence de marche, avec $p \in \mathbb{Z}$:

Type

En phase

En quadrature

En opposition

$\Delta L(M)$

♥ Démonstration ON2.2 : ΔL particuliers

On part du lien entre $\Delta\varphi$ et ΔL , avec $\Delta\varphi_0 = 0$, et de la définition du vecteur d'onde :

Comme $p \in \mathbb{Z}$, $-p \in \mathbb{Z}$, donc le signe – importe peu. Ainsi,

◊ En phase :

◊ En quadrature :

◊ En opposition :

Tout fonctionne comme si on remplaçait 2π par λ .

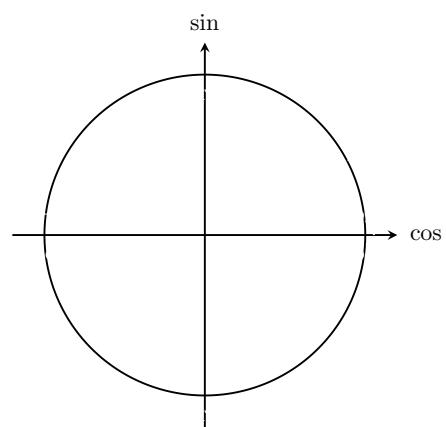


FIGURE ON2.7

I/B Somme de signaux

I/B) 1 Présentation

La plupart du temps, les ondes se croisent sans interagir particulièrement, et on ne voit que la somme des signaux. Voir cette [animation geogebra](#).

Exemple ON2.1 : Superpositions sur une corde

$t = 0$

$t = 0$

$t = \Delta t$

$t = \Delta t$

$t = 2\Delta t$

$t = 2\Delta t$

FIGURE ON2.8 – Mêmes amplitudes.

FIGURE ON2.9 – Amplitudes opposées.

Définition ON2.3 : Hypothèses de somme

Chaque source émet une Onde Plane Progressive Sinusoïdale (OPPS) **de même fréquence et même nature** depuis les points S_1 et S_2 :

et

et on s'intéresse à leur somme $s(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t)$ en un point M .

FIGURE ON2.10 – Schéma.

I/B) 2 Signaux de même amplitude : $A_1 = A_2 = A_0$

Outils ON2.1 : Somme de cosinus

On remplace la somme par un produit grâce à la relation

$$\cos p + \cos q = 2 \cos\left(\frac{p-q}{2}\right) \cos\left(\frac{p+q}{2}\right)$$

♥ Démonstration ON2.3 : Signal somme de même amplitude



♥ Propriété ON2.4 : Signal somme même amplitude

Ainsi,

avec

Amplitude

Phase



Exemple ON2.2 : Somme de signaux

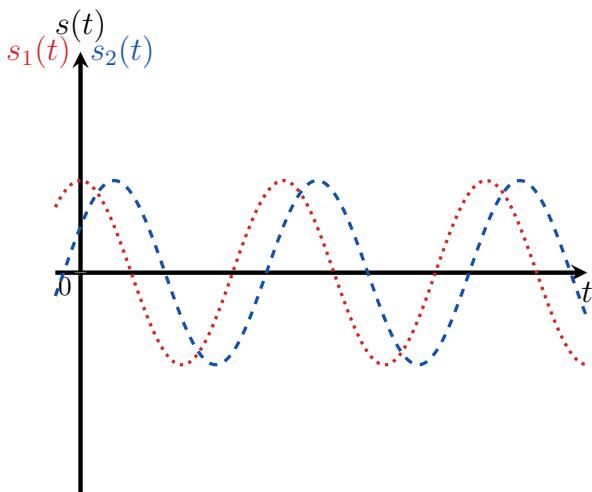


FIGURE ON2.11 –
Somme avec déphasage $\Delta\varphi_{2/1} = -\pi/3$.

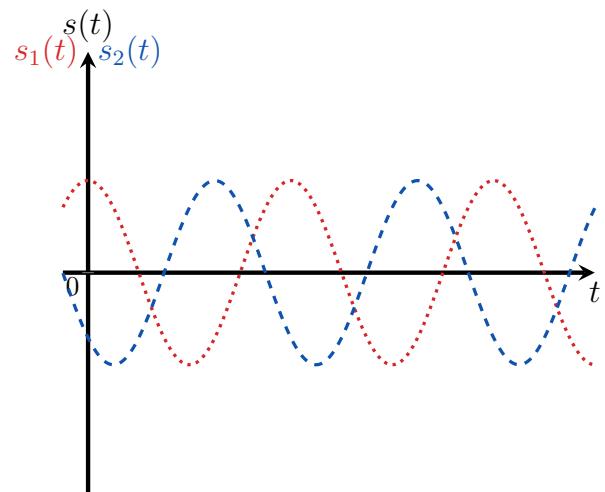


FIGURE ON2.12 –
Somme avec déphasage $\Delta\varphi_{2/1} = 3\pi/4$.



♥ Propriété ON2.5 : Cas extrêmes même amplitude



L'amplitude de $s(M,t)$ est **maximale** pour des signaux **en phase** et **minimale** pour des signaux en **opposition de phase**, avec :

En phase

En opposition

♥ Démonstration ON2.4 : Cas extrêmes même amplitude

Amplitude maximale

$A(M)$ est maximale pour

\Rightarrow

$p \in \mathbb{Z}$

Ce déphasage correspond à des **signaux en phase** : les maxima et minima de vibration se correspondent et donnent à chaque instant une amplitude **double**.

Amplitude minimale

$A(M)$ est minimale pour

\Rightarrow $p \in \mathbb{Z}$

Ce sont donc des **signaux en opposition de phase** : les maxima et minima de vibration s'opposent, et l'amplitude résultante est **nulle**.

Important ON2.1 : Analyse même amplitude

Le signal somme de deux OPPS de **même amplitude** A_0 et **même pulsation** ω est :

- 1) Un signal **sinusoïdal et de même pulsation** ω ;
- 2) D'amplitude **dépendante de M**, et

◊ **Maximale** $A_{\max} = 2A_0$ pour signaux **en phase** ($\Delta\varphi_{2/1} = 2p\pi, p \in \mathbb{Z}$);

◊ **Minimale** $A_{\min} = 0$ pour signaux **en opposition de phase** ($\Delta\varphi_{2/1} = (2p+1)\pi, p \in \mathbb{Z}$).

I/B) 3 Signaux d'amplitudes différentes : $A_1 \neq A_2$

On peut soit utiliser la trigonométrie classique, soit les complexes :

Outils ON2.2 : Trigonométrie

$$\cos(a+b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$$

$$\cos(a-b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b$$

$$\cos \theta = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2}$$

$$|\underline{z}|^2 = \underline{z} \cdot \underline{z}^* \quad \text{et} \quad \tan(\arg(\underline{z})) = \frac{\text{Im}(\underline{z})}{\text{Re}(\underline{z})}$$

Propriété ON2.6 : Signal somme amplitudes \neq

Alors,

avec

Démonstration ON2.5 : Signal somme amplitudes \neq

En réels

En complexes

En supposant directement que $s(M,t) = A(M) \cos(\omega t + \varphi(M))$ (par linéarité),

Dans tous les cas, on trouve

$$\begin{cases} A(M) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\Delta\varphi_{2/1}(M))} \\ \varphi(M) = \arctan\left(\frac{A_1 \sin \varphi_1(M) + A_2 \sin \varphi_2(M)}{A_1 \cos \varphi_1(M) + A_2 \cos \varphi_2(M)}\right) \end{cases}$$

♥ Propriété ON2.7 : Cas extrêmes amplitudes \neq

L'amplitude de $s(M,t)$ est **maximale** pour des signaux **en phase** et **minimale** pour des signaux en **opposition de phase**, avec :

En phase

En opposition

♥ Démonstration ON2.6 : Cas extrêmes amplitudes \neq

Amplitude maximale

Max pour

Or,

$p \in \mathbb{Z}$

Amplitude minimale

Min pour

Or,

$p \in \mathbb{Z}$

Exemple ON2.3 : Cas extrêmes amplitudes \neq

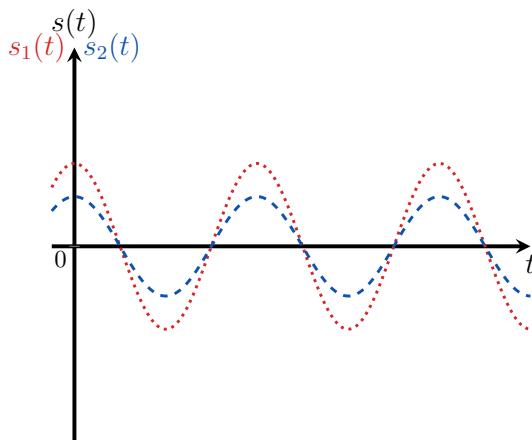


FIGURE ON2.13 – Signaux en phase.

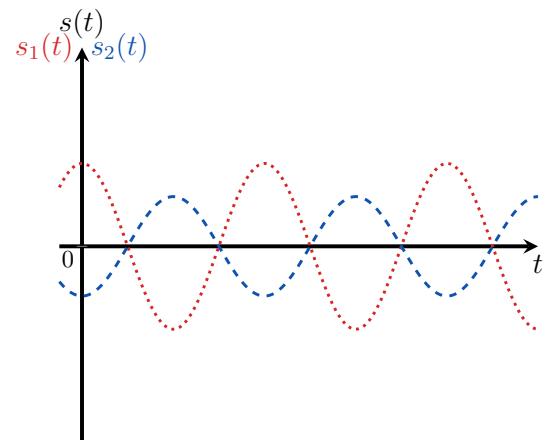


FIGURE ON2.14 – Signaux en opposition.

Important ON2.2 : Analyse amplitudes différentes

Le signal somme de deux OPPS d'amplitudes A_1 et A_2 de même pulsation ω est :

1) Un signal **sinusoïdal et de même pulsation ω** ;

2) D'amplitude **dépendante de M**, et

◇ **Maximale** $A_{\max} = A_1 + A_2$ pour signaux **en phase** ($\Delta\varphi_{2/1} = 2p\pi$) ;

◇ **Minimale** $A_{\min} = |A_1 - A_2|$ pour signaux **en opposition de phase** ($\Delta\varphi_{2/1} = (2p + 1)\pi$).

I/C Bilan

Important ON2.3 : Interférences (pour $\Delta\varphi_0 = 0$)

Pour deux OPPS de même fréquence, nature et phase à l'origine* se superposant en M :

L'amplitude de la somme est **maximale** si les signaux sont **en phase** :

$$\Delta\varphi_{2/1}(M) = 2p\pi \quad \Leftrightarrow \quad \Delta L_{2/1}(M) = p\lambda$$

On parle d'**interférences constructives**.

L'amplitude de la somme est **minimale** si les signaux sont **en opposition de phase** :

$$\Delta\varphi_{2/1}(M) = (2p + 1)\pi \quad \Leftrightarrow \quad \Delta L_{2/1}(M) = (2p + 1)\frac{\lambda}{2}$$

On parle d'**interférences destructives**.

$p \in \mathbb{Z}$ est appelé l'**ordre d'interférence**. Pour une animation et visualisation dans le plan, voir [ce site](#).

Application ON2.1 : Interférences sonores

Soient 2 émetteurs sonores envoyant une onde progressive sinusoïdale de même fréquence, même amplitude et **même phase à l'origine**. Le premier est fixé à l'origine du repère, l'émetteur 2 est mobile et à une distance d du premier, et un microphone est placé à une distance fixe $x_0 > d$ de l'émetteur 1 et est aligné avec les deux émetteurs. On néglige l'influence de l'émetteur 2 sur l'émetteur 1 et toute atténuation.



- 1 Lorsque $d = 0$, qu'enregistre-t-on au niveau du microphone ?
- 2 On part de $d = 0$ et on augmente d jusqu'à ce que le signal enregistré soit nul. Ceci se produit pour $d_1 = 6,0$ cm. Expliquer cette extinction.
- 3 En déduire la longueur d'onde puis la fréquence du son émis.
- 4 Pour $d_2 = 12,0$ cm, quelle sera l'amplitude du signal enregistré ?

1

2

3

4

II Interférences lumineuses

II/A Condition d'interférences : cohérence d'ondes lumineuses

Définition ON2.4 : Cohérence entre sources

La plupart des sources lumineuses ont une phase à l'origine qui **n'est pas constante**, mais prend une valeur aléatoire au bout d'un certain temps généralement très court : on dit qu'elles envoient des **trains d'ondes**, avec :

- ◊ **Temps de cohérence** :
- ◊ **Longueur de cohérence** :

Important ON2.4 : Condition d'interférence

Pour interférer, **deux sources doivent être cohérentes**, c'est-à-dire avoir $\Delta\varphi_0 = \text{cte}$; ceci n'est en général pas réalisable par manque de contrôle sur cette variation de phase à l'origine (désexcitation quantique aléatoire). Les interférences lumineuses se font donc **avec une unique source**, donnant forcément des **ondes cohérentes**.

Exemple ON2.4 : Cohérence

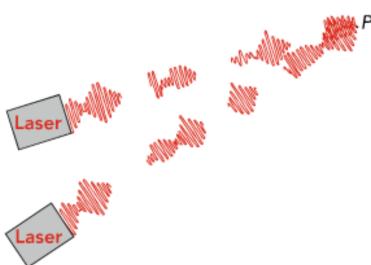


TABLEAU ON2.1 – Temps et longueurs de cohérence

Source	τ_c (s)	L_c (m)
Lumière du Soleil	2×10^{-15}	6×10^{-7}
Ampoule	3×10^{-14}	1×10^{-5}
Raie rouge hydrogène	1×10^{-11}	4×10^{-3}
Laser hélium-néon	1×10^{-9}	3×10^{-1}

II/B Formule de FRESNEL

♥ Propriété ON2.8 : Intensité lumineuse

En général

OPPS

Démonstration ON2.7 : Intensité lumineuse OPPS

La période (temporelle) typique d'une onde lumineuse est de l'ordre de 10^{-15} s, ou $\approx 1\text{ fs}$: c'est une échelle de temps infinitésimale **bien inférieure au temps de détection** de n'importe quel capteur optique : l'œil humain a un temps de réponse $\approx 10^{-1}$ s, un capteur CCD $\approx 10^{-6}$ s.

Ainsi, un récepteur optique n'est sensible **qu'à l'énergie moyenne du signal**. Cette énergie est proportionnelle au carré de la grandeur $s(M,t)$ propagée par l'onde (ici électromagnétique), d'où

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

Pour une OPPS (monochromatique), on a

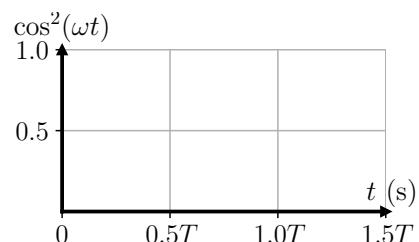


FIGURE ON2.15 – $\cos^2(\omega t)$ et sa moyenne.

cohérent avec sa représentation temporelle. On le démontre aussi par intégration (cf. Dm.E6.2).

♥ Propriété ON2.9 : Formule de FRESNEL

L'intensité lumineuse $I(M)$ résultant de l'interférence de 2 ondes monochromatiques en un point M de l'espace s'écrit :

ou

si $A_1 = A_2 = A_0$, c'est-à-dire $I_1 = I_2 = I_0$. On trouve alors

En phase

En opposition

Démonstration ON2.8 : Formule de FRESNEL

Soient 2 ondes lumineuses **cohérentes** et de même pulsation, d'amplitudes A_1 et A_2 , interférant en un point M. On a vu que le signal somme $s(M,t) = s_1(M,t) + s_2(M,t)$ avait une amplitude

$$A(M) = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi_{2/1}(M)}$$

On trouve donc l'intensité $I(M)$ en en prenant le carré et en multipliant par $\frac{1}{2}K$:

II/C Chemin optique et déphasage

La propagation des ondes lumineuses se fait dans des milieux avec des indices optiques n qui peuvent être différents, et donc avec des vitesses $v = c/n$ différentes. Pour continuer à travailler comme on le fait, il faudrait se ramener à une même vitesse, quitte à changer la longueur. On définit ainsi le **chemin optique** :

♥ Définition ON2.5 : Chemin optique

Le trajet d'un rayon lumineux dans un milieu d'indice n entre les points A et B s'écrit (AB) :

Démonstration ON2.9 : Chemin optique et différence de chemin

En effet, si l'onde 1 parcourt la distance AB dans le milieu n , elle le fait à la vitesse $v = c/n$. Pour considérer qu'elle va à la vitesse $c = nv$, il faut multiplier la distance par n :

Tout se passe comme si l'onde allait à la vitesse c mais parcourait une distance n fois plus grande : on retrouve alors Impl.O1.2 :

♥ Propriété ON2.10 : Déphasage et différence de chemin optique

Pour 2 ondes lumineuses de $\lambda_{\text{vide}} = \lambda_0$:

avec

Déphasage à l'origine

Déphasage à l'origine

II/D Expérience des trous d'YOUNG

II/D 1 Introduction

La nature de la lumière a été sujet à de grands débats durant de nombreux siècles, entre vision corpusculaire et ondulatoire. C'est en 1802 que l'expérience dite des « trous d'YOUNG » a permis de confirmer la nature ondulatoire

de la lumière en réalisant une figure d'interférences lumineuses¹. Une version moderne de cette expérience consiste à pointer un unique laser de longueur d'onde λ_0 sur deux fentes fines horizontales et parallèles : ces fentes diffractent la lumière et se comportent **comme deux sources cohérentes**.

Définition ON2.6 : Description du résultat

La zone de l'espace où les faisceaux se superposent est appelé **champ d'interférences**. Sur un écran, on observe alors des variations d'intensité lumineuse :

- ◊ au milieu des zones claires (**maximum local d'intensité**) on a des **interférences constructives** ;
- ◊ au milieu des zones sombres (**minimum local d'intensité**) on a des **interférences destructives**.
- ◊ on appelle **interfrange** et on le note i la **distance** séparant **deux milieux de franges brillantes** (ou sombres) consécutives.

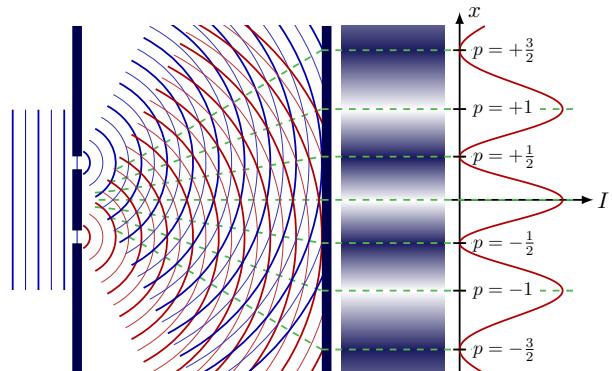


FIGURE ON2.16 – Figure d'interférence.

II/D) 2 Présentation

♥ Définition ON2.7 : Présentation trous d'YOUNG

Soit S une source lumineuse ponctuelle, monochromatique de longueur d'onde λ_0 , éclairant deux fentes fines horizontales F_1 et F_2 distantes de $2a$, avec O au milieu. S est situé sur un axe optique perpendiculaire à un écran placé à une distance D très supérieure à a (pour l'approximation en ondes planes). Le milieu de propagation est l'air, d'indice optique $n = 1$. On se limite au tracé de 2 rayons qui interfèrent au point $M(x)$, passant chacun par une des fentes.

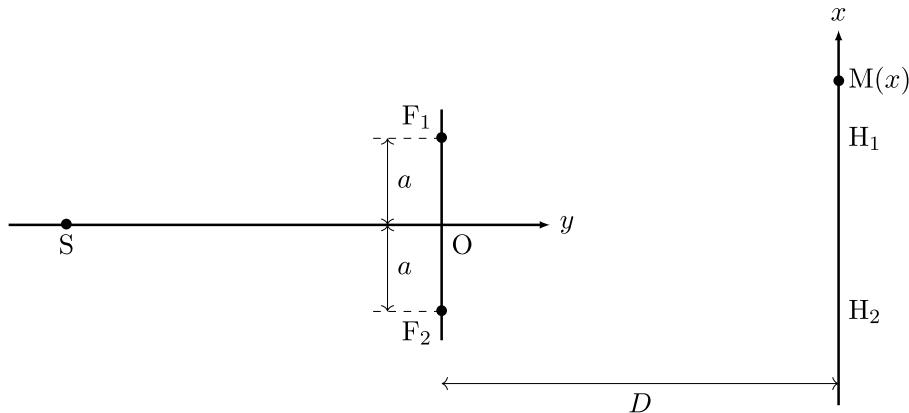


FIGURE ON2.17 – Schéma des trous d'YOUNG

♥ Interprétation ON2.2 : Expérience des trous d'YOUNG

On a alors successivement :

- ◊ **Diffraction** :

- ◊ **Interférences** : avec la formule de FRESNEL pour des intensités égales,

$$I(M) = 2I_0 (1 + \cos(\Delta\varphi_{2/1}(M)))$$

- ▷ **Constructives** :

- ▷ **Destructives** :

1. Voir la vidéo [La plus belle expérience de la Physique](#).

II/D) 3 Résolution
♥ Propriété ON2.11 : Intensité et interfrange

Pour $I_1 = I_2 = I_0$, on obtient

décrivant des franges, d'interfrange



FIGURE ON2.18 – Franges avec atténuation.

♥ Démonstration ON2.10 : Intensité et interfrange
Intensité

On cherche donc à exprimer F_1M et F_2M . Pour cela, on place les points H_1 et H_2 projetés orthogonaux de F_1 et F_2 sur l'écran, créant ainsi deux triangles rectangles : F_1H_1M et F_2H_2M .

et

et

et

Or, $\sqrt{1 + \varepsilon} \underset{\varepsilon \rightarrow 0}{\sim} 1 + \frac{\varepsilon}{2}$; comme $D \gg (x ; a) \Rightarrow \frac{x \pm a}{D} \ll 1$, alors avec $\varepsilon = \left(\frac{x \pm a}{D} \right)^2$ on a :

et

et

Ainsi,

Soit

Franges et interfrange

◊ **Franges claires :**

◊ **Franges sombres :**

◊ **Interfrange :**

Exemple ON2.5 : Interfrange

Voir une autre animation [ici](#). Avec $2a = 0,20 \text{ mm}$, $\lambda_0 = 632 \text{ nm}$ et $D = 1,0 \text{ m}$, on trouve