2
Interférences et diffraction

CONTENU DU PROGRAMME

— Interférences entre deux ondes de même fréquence

- **C8** Notion de déphasage
- **C9** Exprimer les conditions d'interférences constructives ou destructives.
- **C10** Mettre en œuvre un dispositif expérimental pour visualiser le phénomène d'interférences de deux ondes. **-TP-**

— Diffraction à l'infini.

- **C11** Connaître et savoir utiliserla relation entre l'échelle angulaire de la diffraction et la taille de l'ouverture $\theta \approx \dfrac{\lambda}{d}$
- **C12** Choisir les conditions expérimentales permettant de mettre en évidence le phénomène de diffraction en optique ou en mécanique. **-TP-**

2.1 Interférences entre deux ondes de même fréquence

2.1.1 Retour sur le déphasage

On considère une source (S) à l'origine de l'axe (Ox) émettant une onde sinusoïdale de la forme $u_S(t) = U_S \cos(\omega t)$. Elle crée aux points d'abscisse x_1 et x_2, deux ondes planes progressives sinusoïdales, notées $u(x_1, t)$ et $u(x_2, t)$ de même fréquence $f = \dfrac{\omega}{2\pi}$ et célérité c. Par définition, on peut écrire que :

$$\begin{aligned} u(x_1, t) &= U_m \cos(\omega t - kx_1) \\ u(x_2, t) &= U_m \cos(\omega t - kx_2) \end{aligned}$$

Déphasage de l'onde en x_1 par rapport à x_2 **Méthode (2.1)**

Le déphasage $\Delta\phi$ de l'onde en x_1, $u(x_1, t)$ par rapport à l'onde en x_2, $u(x_2, t)$ est :

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi(x_1, t) - \phi(x_2, t), & \forall\, t \\ &= \omega t - kx_1 - (\omega t - kx_2), & \forall\, t \\ &= \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) \end{aligned}$$

On retiendra : $\Delta\phi = \dfrac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1)$, ainsi :

- Si $\Delta\phi > 0$ l'onde en x_1 est en avance et x_1 est en amont par rapport à x_2 ($x_2 - x_1 > 0$ pour une onde progressive)
- Si $\Delta\phi < 0$ l'onde en x_1 est en retard et x_1 est en aval par rapport à x_2 ($x_2 - x_1 < 0$ pour une onde progressive)

♦ Les deux points x_1 et x_2 sont en phase si ils sont dans le même état vibratoire : $\Delta\phi = 0$ et

$$x_2 - x_1 = n\lambda, n \in \mathbb{N}$$

♦ Les deux points x_1 et x_2 sont en opposition de phase si il sont dans un état vibratoire opposé : $\Delta\phi = \pi$ et

$$x_2 - x_1 = \frac{\lambda}{2} + n\lambda = \left(\frac{1}{2} + n\right)\lambda, n \in \mathbb{N}$$

♦ Les deux points x_1 et x_2 sont en quadrature de phase si $\Delta\phi = \dfrac{\pi}{2}$ et

$$x_2 - x_1 = \frac{\lambda}{4} + n\lambda = \lambda\left(\frac{1}{4} + n\right), n \in \mathbb{N}$$

Q. 1 On considère une corde tendue sur laquelle se propage une perturbation sinusoïdale de gauche à droite d'amplitude H. On considère les points $M_{1...5}$ situés à l'altitude $h < H$ et les points $N_{1...5}$ situés à l'altitude h. Quelle distance sépare les points M_i les uns des autres ? Et les points N_i ? Et les points M_i des points N_i ?

Aidez vous d'un schéma pour représenter l'onde et les points M_i, N_i

Q. 2 Quels sont les points en phase ? En opposition de phase ? Que peut-on dire des points P, Q et R ?

On introduira les points P, Q et S en classe

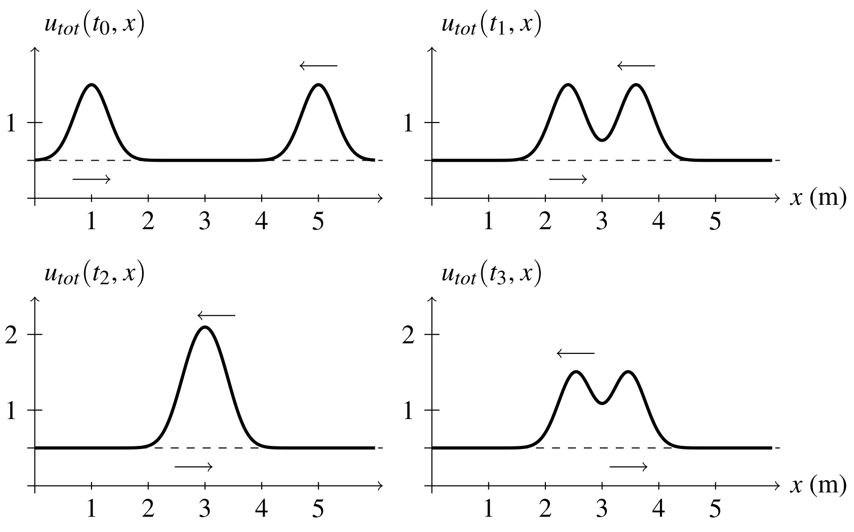
2.1.2 Superposition de deux ondes

PRINCIPE DE SUPERPOSITION **Théorème (2.1)**

Lorsque deux ondes planes progessives u_1 et u_2 se rencontrent, **si** leurs amplitudes est suffisamment faibles pour considérer le phénomène comme *linéaire*, **alors** les perturbations s'ajoutent et on peut écrire :

$$u_{tot}(x,t) = u_1(x,t) + u_2(x,t)$$

Par exemple, on peut considérer deux ondes se dirigeant l'une vers l'autre à 4 instants succéssifs : t_0, t_1, t_2, t_3 :



Les flèches représentent la direction de l'onde et sont centrée avec le maximum de l'onde.

Q. 3 On considère sur une corde les deux ondes progressives, de même vitesse, représentées en figure 2.1 ci-dessous. Tracez l'allure de la corde à différents instants, avant que, pendant que et après que les deux signaux se superposent.

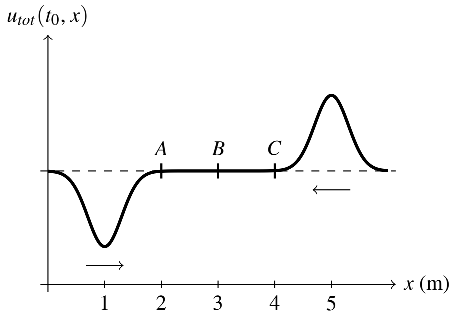


FIGURE 2.1: Deux perturbations en sens inverse

Q. 4 Que dire de l'aspect de la corde quand les signaux se superposent exactement ? Quelle différence avec une corde au repos ?

Q. 5 Représentez l'allure des altitudes des points A, B et C en fonction du temps.

ON OBSERVE que la superposition de deux perturbations vibratoires $u_1(x,t)$ et $u_2(x,t)$ peut conduire à une pertubation importante, par exemple les points A et C mais également à une interaction destructive conduisant à une absence de pertubation en certains points (par exemple, le point B).

2.1.3 Observations expérimentales

L'OBSERVATION la plus simple de la superposition de deux ondes peut se faire à l'aide d'une cuve à onde. Cela permet de produire deux ondes de même fréquences à la surface de l'eau. La figure 2.3 est une photographie (vue de dessus) d'une cuve à onde, montrant la superposition de deux ondes de même fréquence.

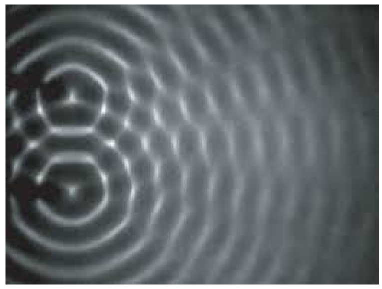


FIGURE 2.2: Observation de la superposition de deux ondes à la surface de l'eau.

Q. 6 Identifiez le point source des deux ondes. A quoi correspondent les cercles brillants et les cercles sombres ?

LE PHÉNOMÈNE de MOIRÉ un effet d'optique construit par la superposition de deux maillages créant alors une succéssion de zone sombres et zone claires. Les zones sombres correspondent à un rapprochement de deux lignes alors que les zones claires correspondent à une **superposition** des lignes.

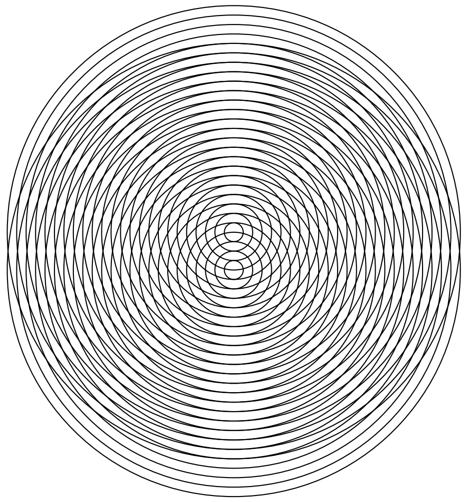


FIGURE 2.3: Observation du phénomène de MOIRÉ avec deux maillages circulaire.

Q. 7 A l'aide du phénomène de MOIRÉ commentez la photographie de la cuve à onde.

2.1.4 Interprétation : les conditions d'interférences

INTERFÉRENCES **Définition (2.1)**

En mécanique ondulatoire, le phénomène d'interférences résulte de la superposition de deux ondes et se manifeste par une succesion d'état vibratoire opposés :

- Lorsque les deux ondes s'ajoutent en un point A de l'espace, on parle d'interférences constructives. Pour cela, les deux signaux doivent être **en phase** au point A. L'état vibratoire en ce point possède les plus grandes amplitudes.
- Lorsque les deux ondes s'annulent en un point B de l'espace, on parle d'interférences destructives. Pour cela, les deux signaux doivent être **en opposition de phase** au point B. L'état vibratoire en ce point est nul.

Ce phénomène intervient dans toute la physique des ondes :

— Avec des ondes électromagnétiques : interférence optique (cf TP), micro-ondes.

— Avec des ondes acoustiques : les casque anti-bruit utilisent les interférences destructives pour limiter les bruits parasites.

— En mécanique des fluides : les vagues scélérates résultent par exemple d'interférences constructives de plusieurs vagues.

CONDITIONS D'INTERFÉRENCES **Méthode (2.2)**

Pour que deux sources d'ondes interfèrent elle doivent être **cohérentes** :

- de même fréquence. On parle d'onde **synchrone**
- de déphasage constant. Les vibrations émises ont toujours le même décalage temporel.

Q. 8 Représentez graphiquement deux signaux sinusoïdaux déphasés de $\Delta\phi = 0$. Représentez ensuite la somme de ces deux signaux. Même question pour $\Delta\phi = \pi$

DÉTERMINATION DES LIEUX D'INTERFÉRENCES **Méthode (2.3)**

Soit deux sources d'ondes sinusoïdales (S_1) et (S_2). On considère :

— les deux sources sont cohérentes, en phase et de même amplitude : $u_1^S(t) = U_m \cos(\omega t)$ et $u_2^S(t) = U_m \cos(\omega t)$

— la vibration totale reçue en un point M est la somme des deux ondes $u_1(M,t) + u_2(M,t)$.

Du fait de la propagation, la vibration reçue au point M est déphasée et peut alors s'écrire :

$$\begin{aligned} u_1(M,t) &= U_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \times |S_1 M|\right) \\ u_2(M,t) &= U_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \times |S_2 M|\right) \end{aligned}$$

Le déphasage entre les deux vibrations peut alors s'écrire :

$$\phi_1(M,t) - \phi_2(M,t) = \frac{2\pi}{\lambda} \times \left(|S_2 M| - |S_1 M|\right)$$

On appelle **différence de marche** δ la différence des chemins parcourus par les deux ondes : $\delta = |S_2 M| - |S1M|$. Cette grandeur physique permet de déterminer facilement si le point M est le support d'interférences constructives ou destructives :

- Si $\delta = n\lambda, n \in \mathbb{N}$ Alors M est le support d'interférences constructives.
- Si $\delta = (n + \frac{1}{2})\lambda, n \in \mathbb{N}$ Alors M est le support d'interférences destructives.

Q. 9 Expliquez pourquoi le déphasage dû à la propagation de (S_1) à M peut s'écrire $\Delta\phi = \dfrac{2\pi}{\lambda} \times |S_1 M|$. On notera la célérité de l'onde c.

Q. 10 Expliquez pourquoi le point M est le support d'interférences constructives lorsque $\delta = n\lambda$

Q. 11 Expliquez pourquoi le point M est le support d'interférences destructives lorsque $\delta = (n + \dfrac{1}{2})\lambda$

Calcul de déphasage et interférence **Exercice (2.1)**

On considère deux sources sinusoïdales (S_1) et (S_2) émettant deux ondes de même fréquence $f = \dfrac{\omega}{2\pi}$.

Pour la source (S_1) les traits pleins représentent les maximums de vibrations, et les tirets représentent les minimums de vibrations. Pour la source (S_2) les pointillés représentent les maximums de vibrations, et les tirets représentent les minimums de vibrations.

1. Donnez l'expression mathématiques de la vibration aux niveaux des sources (S_1) et (S_2). On notera u_1 et u_2 ces vibrations des sources (respectivement) (S_1) et (S_2).

2. Quel est le déphasage de la vibration u_1 due à la propagation de (S_1) à A.

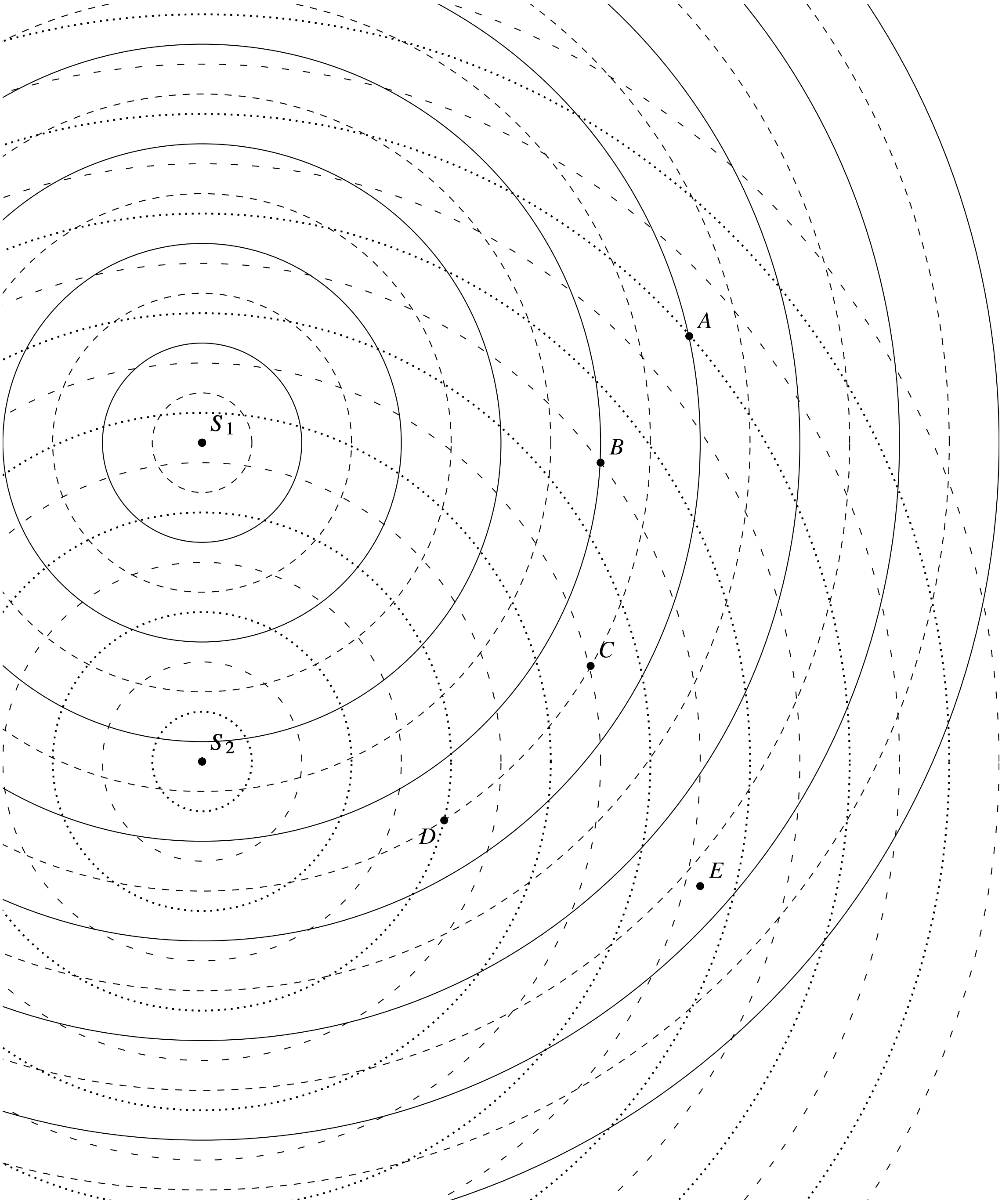
3. Quel est le déphasage de la vibration u_2 due à la propagation de (S_2) à A.

4. En déduire le déphasage entre $u_1(A,t)$ et $u_2(A,t)$.

5. Calculez le déphasage entre $u_1(B,t)$ et $u_2(B,t)$, $u_1(C,t)$ et $u_2(C,t)$, $u_1(D,t)$ et $u_2(D,t)$.

6. Déterminez la différence de marche δ au point A, B, C et D

7. En quel(s) point(s) les interférences entres les deux vibrations u_1 et u_2 sont-elles constructives ? destructives ?

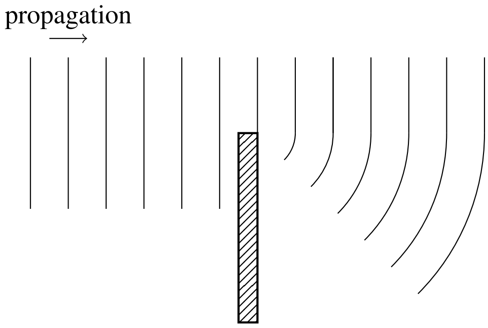


2.2 *Diffraction à l'infini*

2.2.1 *Observations expérimentales*

En analysant le comportement de vagues à proximité d'obstacles on peut observer un contournement permettant à l'onde d'atteindre des points situés derrière l'obstacle. A la traversée d'un obstacle, l'onde subit un changement de direction de propagation.

On peut schématiser ce phénomène ainsi : une onde plane progressive se dirige vers un obstacle et change de direction de propagation après l'obstacle.



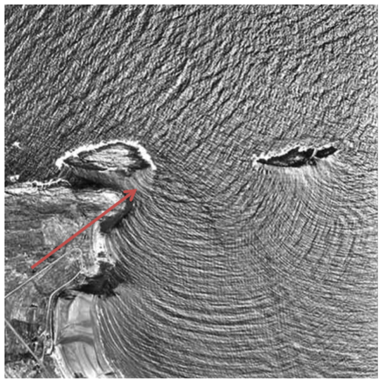
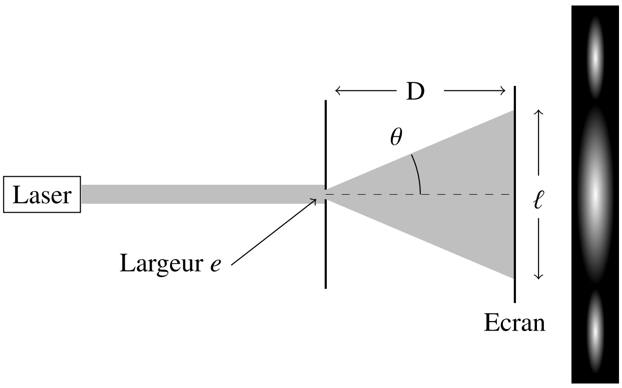


Figure 2.4: Diffraction d'une onde à la surface de l'eau. Au contact du rocher, l'onde change de direction de propagation.

Q. 12 Que représente la distance entre deux traits dans le schéma ci-dessus ?

Le même phénomène peut s'observer dans toutes la physique des ondes. Par exemple, en optique, lorsqu'un laser monochromatique traverse une fente, le point lumineux du laser forme sur un écran éloigné une figure lumineuse complexe composée d'une tache centrale et de plusieurs taches alignées plus petites.



Q. 13 Donnez une relation mathématiques liant la distance D, la taille de la tache de diffraction ℓ et l'angle θ. Que devient cette relation lorsque θ est très petit.

2.2.2 *Caractérisation de la diffraction à l'infini*

DIFFRACTION **Définition (2.2)**

On observe un phénomène de diffraction lorsqu'une onde plane progressive de longueur d'onde λ rencontre un obstacle. Lors de la diffraction, l'onde subit un **changement de direction de propagation sans modification de sa longueur d'onde**.

Ainsi, une fente se comportera comme une source quasi ponctuelle émettant une onde diffractée circulaire.

On observera souvent le phénomène au travers d'une fente de largeur e faible. En effet, plus la fente est de taille réduite plus le phénomène de diffraction est amplifié :
• Si $e \gg \lambda$ il n'y pas de phénomène de diffraction, l'onde est simplement diaphragmée.
• Si $e \approx \lambda$ l'onde est diffractée et se propage dans toutes les directions après avoir traversée la fente.

DIFFRACTION À L'INFINI PAR UNE FENTE **Définition (2.3)**

Nous nous concentrons à la diffraction à l'infini, c'est-à-dire à une très grande distance d'une fente de largeur e

Pour cela, on peut observer la figure de diffraction à une distance $D \gg \lambda$ et $D \gg e$. En optique, on pourra utiliser une lentille convergente judicieusement positionnée afin d'imager sur un écran les rayons partant à l'infini.

L'onde diffractée est alors très majoritairement confinée dans un cône dont le demi-angle au sommet θ vérifie :

$$\theta = \frac{\lambda}{e}$$

• λ est la longueur d'onde exprimée en m
• e est la taille de la fente
• θ est le demi-angle au sommet du cône de diffraction.

Q. 14 Expliquez pourquoi le faisceau d'une onde acoustique ultrasonore est plus directif que celui d'une onde sonore audible ?

Q. 15 Un laser de longueur d'onde $\lambda = 632,8$ nm traverse un cheveu et produit ainsi une tache de diffraction de longueur $\ell = 2,1$ cm sur un écran distant de $1,5$m du cheveu. Déterminez la taille du cheveu.