

# Phénomènes ondulatoires

## I Ondes et propagation

### 1 - Introduction

**Onde** = propagation d'une perturbation de proche en proche

cas particulier

### 2 - Ondes progressives

**Onde progressive** = se propage sans se déformer

$$f(x \pm ct)$$

cas particulier

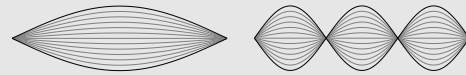
### 3 - Ondes progressives sinusoïdales

$$s(x, t) = s_0 \cos(\omega t \pm kx + \varphi_0)$$

double périodicité  $\lambda$  et  $T$   
déphasage  
 $c = \lambda f = \omega/k$

cas particulier

## II Ondes stationnaires

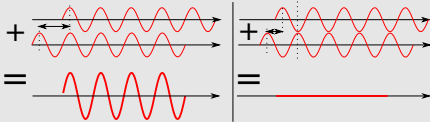


forme générale  $f(x)g(t)$   
nœuds, ventres

CL L CL modes propres :  $f_n, \lambda_n$  ?

## III Interférences

### 1 - Principe de superposition $s_1(M, t) + s_2(M, t)$



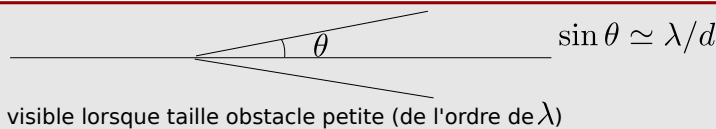
constructif si en phase  
destructif si en opposition

### 2 - Condition sur le déphasage

$$r_2 - r_1 = p\lambda$$

$$r_2 - r_1 = p\lambda + \lambda/2$$

## IV Diffraction



## Ce qu'il faut connaître

\_\_\_\_\_ (cours : I)

- <sub>1</sub> Quel est l'ordre de grandeur de la célérité des ondes électromagnétiques dans le vide (ou vitesse de la lumière) ?  
Et celle des ondes sonores dans l'air ?
- <sub>2</sub> Sous quelle forme peut s'écrire une onde progressive unidimensionnelle (ou plane) pour une propagation vers les  $x$  croissants ? Et vers les  $x$  décroissants ?
- <sub>3</sub> Quelle est la forme générale de l'expression d'une onde progressive sinusoïdale se propageant selon les  $x$  croissants ?  
Comment sont nommés chacun des paramètres qui interviennent dans cette expression ?  
Quelle est la relation entre la pulsation, la norme du vecteur d'onde, et la célérité de cette onde ?
- <sub>4</sub> Double périodicité des ondes progressives sinusoïdales : Quelle est la relation entre la période temporelle  $T$  et la pulsation de l'onde ?  
Et celle entre la période spatiale  $\lambda$  et la norme du vecteur d'onde  $k$  ?  
Quelle est alors la relation entre  $\lambda$ ,  $T$  et  $c$  ?

\_\_\_\_\_ (cours : II)

- <sub>5</sub> Décrire une onde stationnaire observée sur la corde de Melde (faire un schéma, noter les nœuds, les ventres).
- <sub>6</sub> Quelle est la forme générale de l'expression d'une onde stationnaire ?
- <sub>7</sub> Comment se décompose une vibration quelconque d'une corde accrochée entre deux extrémités fixes ?

\_\_\_\_\_ (cours : III)

- ▶<sub>8</sub> Quand dit-on que les interférences sont constructives ? Destructives ?  
Comment les deux ondes sont-elles déphasées dans chacun des cas ? On pourra faire un schéma comme page 11.  
————— (cours : IV)
- ▶<sub>9</sub> Le phénomène de diffraction est-il plus ou moins prononcé si la taille de l'obstacle est petite ?

## Ce qu'il faut savoir faire

---

- (cours : I)
- ▶<sub>10</sub> Pour une onde progressive, prévoir l'évolution à  $t$  fixé ou à  $x$  fixé. → **EC1**
- ▶<sub>11</sub> Pour une onde progressive harmonique, utiliser la relation entre  $\lambda$  et  $T$  (ou  $f$ ). → **EC2**
- ▶<sub>12</sub> Exploiter un déphasage dû à la propagation. → **EC3, TD II**  
————— (cours : II)
- ▶<sub>13</sub> Exprimer les fréquences des modes propres connaissant la célérité et la longueur de la corde. → **EC4, TD IV**  
————— (cours : III)
- ▶<sub>14</sub> Exprimer des conditions d'interférences constructives ou destructives. → **EC5, DM**  
————— (cours : IV)
- ▶<sub>15</sub> Utiliser la relation  $\sin \theta \simeq \lambda/d$  entre le demi-angle d'ouverture  $\theta$  et la taille  $d$  de l'ouverture. → **EC6, TD V**

## Exercices de cours

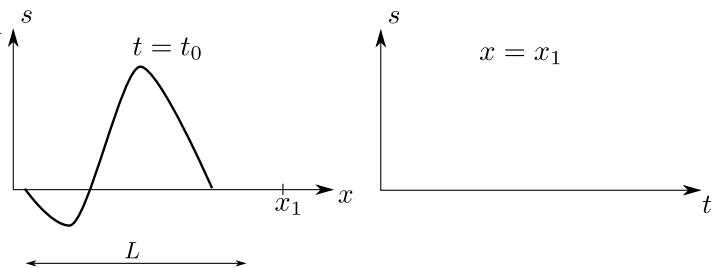
---

### Exercice C1 – Pour une onde progressive, prévoir l'évolution à $t$ fixé ou à $x$ fixé

On considère l'onde progressive  $f(x - vt)$  dont le profil au temps  $t_0$  est donné ci-contre.

- 1 - Compléter le schéma de droite avec l'allure de la perturbation observée si l'on se place au point fixe  $x_1$ .
- 2 - Pendant quelle durée voit-on l'onde passer en ce point ?

(voir animation 1 sur le site de la classe)



### Exercice C2 – Utiliser la relation entre $\lambda$ et $T$

On considère des ondes sonores dans l'air à température et pression ambiantes.

- 1 - Rappeler l'ordre de grandeur de la célérité de ces ondes.
- 2 - Rappeler le domaine de fréquence audible par l'homme.
- 3 - En déduire les longueurs d'onde associées aux fréquences maximales et minimales.

Autres questions possibles : on considère maintenant des ondes électromagnétiques.

- 4 - Quelle est la fréquence d'une onde lumineuse de longueur d'onde 500 nm ?
- 5 - Quelle est la longueur d'onde d'une onde radio de 100 MHz ?

### Exercice C3 – Exploiter un déphasage dû à la propagation

Considérons une onde progressive harmonique produite par un haut parleur et se propageant dans le sens des  $x$  croissants. Sa forme est du type

$$s(x, t) = S_0 \cos(\omega t - kx + \varphi).$$

Deux microphones sont placés à deux positions  $x_1 = 0$  fixe, et  $x_2 > 0$  fixe mais pouvant être déplacé, et enregistrent les signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ .

1 - Donner l'expression des signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$ .

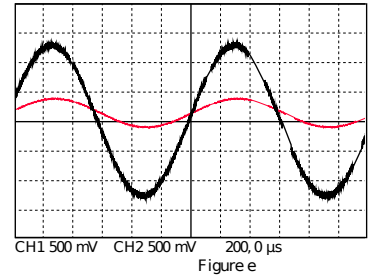
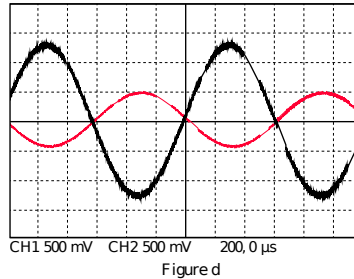
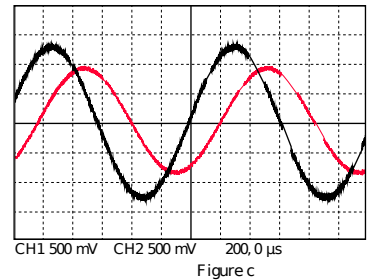
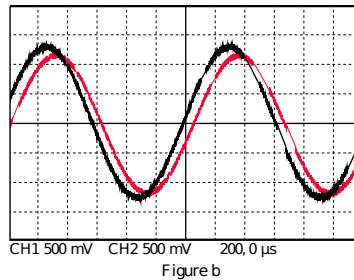
2 - Donner les expressions de leur phase initiale. En déduire le déphasage  $\Delta\varphi_{12}$  de 2 par rapport à 1. L'exprimer en fonction de  $\lambda$ .

3 - Établir une condition sur  $x_2$  et  $\lambda$  pour que les signaux soient en phase. Même question pour l'opposition de phase.

4 - On donne ci-dessous des relevés de l'enregistrement de  $s_1(t)$  (en noir, courbe la plus à gauche) et de  $s_2(t)$ .

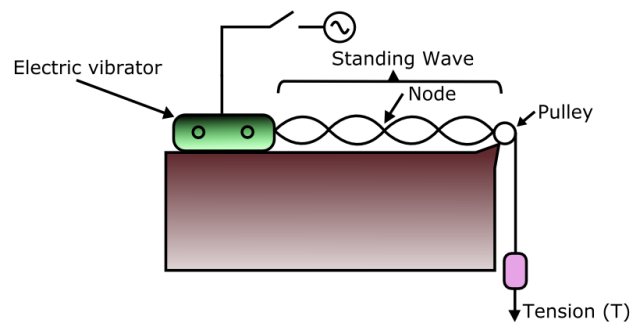
La figure b correspond à  $x_2$  proche de 0. La figure c à  $x_2 = 6,7$  cm, la d à  $x_2 = 21$  cm et la e à  $x_2 = 42$  cm.

Déduire de ceci la valeur de la longueur d'onde  $\lambda$ .



### Exercice C4 – Corde de Melde

On réalise l'expérience ci-dessus. On note  $L$  la longueur de la corde et  $c$  la célérité des ondes. La corde est fixée à l'extrémité  $x = L$ . On constate expérimentalement que pour certaines fréquences d'excitation, l'amplitude des oscillations de la corde est très importante. On dit que pour ces fréquences, il y a résonance, et on appelle "mode propre" les ondes alors observées. On les numérote avec un entier  $n$ .



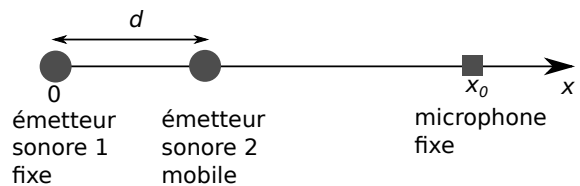
1 - Comment s'appelle le type d'onde observé? Faire un schéma de l'onde à un instant  $t$  fixe et faire apparaître les nœuds, ventres, et la longueur d'onde  $\lambda_n$ .

2 - À la résonance, les conditions aux limites en  $x = 0$  et en  $x = L$  peuvent être considérées comme fixes. Établir alors l'expression de la longueur d'onde  $\lambda_n$  du mode propre numéro  $n$ .

3 - Établir l'expression de la fréquence  $f_n$  du mode propre numéro  $n$ .

### EC 5 – Conditions d'interférences constructives ou destructives

On considère le dispositif suivant. On suppose que l'émetteur 2 est de taille suffisamment petite pour ne pas avoir d'influence sur le signal émis par l'émetteur 1. Chaque émetteur envoie une onde progressive harmonique de même fréquence et de phase à l'origine nulle.



1 - Rappeler les conditions d'interférence destructive et constructive en terme de déphasage entre les deux signaux.

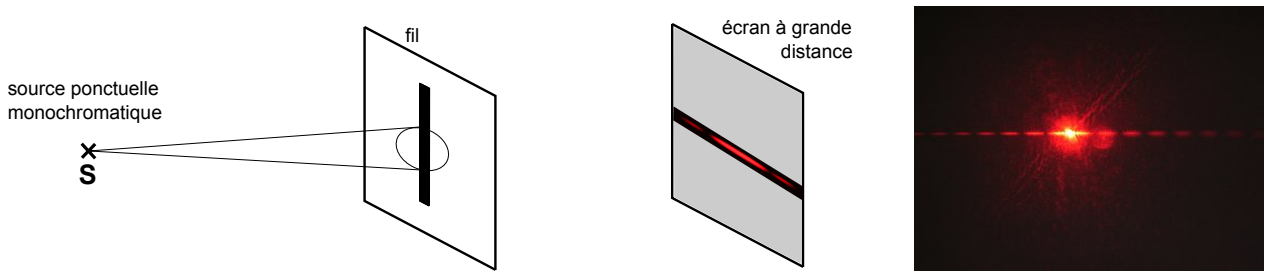
2 - Lorsque  $d = 0$ , qu'enregistre-t-on au niveau du microphone ?

3 - On part de  $d = 0$ , et on augmente  $d$  jusqu'à ce que le signal enregistré soit nul. Ceci se produit pour  $d = 6,0$  cm. Expliquer pourquoi il y a cette extinction.

En déduire la longueur d'onde du son émis.

### EC 6 – Utiliser la relation $\sin \theta = \lambda/d$

On considère un faisceau laser de longueur d'onde  $\lambda = 500$  nm qui éclaire un cheveu placé perpendiculairement par rapport au faisceau. On place un écran à une distance  $D = 1,0$  m du cheveu, perpendiculairement au faisceau. On observe à l'écran la figure ci-dessous. La taille de la tache centrale est de 16,0 cm.



1 - En déduire le diamètre approché du cheveu.

## Le cours

### I – Ondes et propagation

#### 1 – Ondes

##### Définition : onde

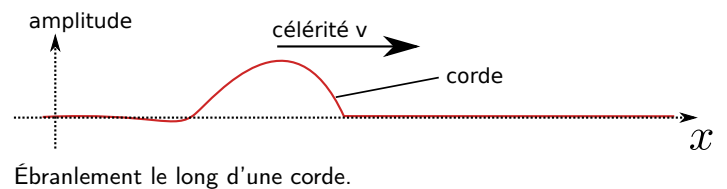
Une onde est la perturbation d'une grandeur physique qui se propage de proche en proche dans un milieu ou dans le vide.

##### Propriétés et remarques :

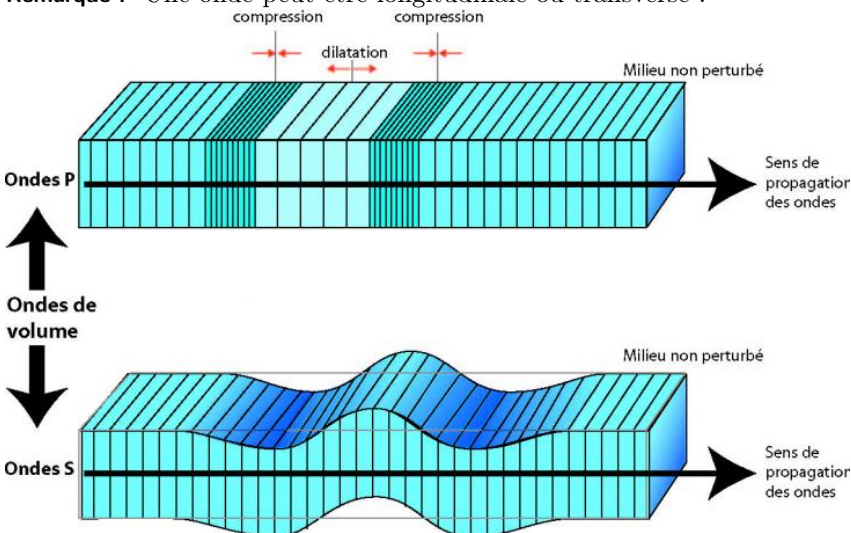
- ▶ Il n'y a pas de transport de matière entre le point d'émission et le point de réception.
- ▶ En revanche, il y a transport d'information et d'énergie.
- ▶ Dans un milieu matériel on parle d'onde mécanique.
- ▶ L'amplitude de l'onde dépend de la position et du temps : c'est une fonction  $s(x, y, z, t)$ . À une dimension :  $s(x, t)$ .



Ondes mécaniques à la surface de l'eau.  
Nous observons également ces ondes sur une cuve à ondes.



Remarque : Une onde peut être longitudinale ou transverse :



- Ondes **transverses** : le déplacement du milieu est perpendiculaire à la direction de propagation. Cas des ondes S ici.

- Ondes **longitudinale** : le déplacement du milieu est dans la direction de propagation. Cas des ondes P ici.

(Ondes P et S correspondent à des ondes sismiques)

## 2 – Ondes progressives

### a/ Manipulation avec un ressort

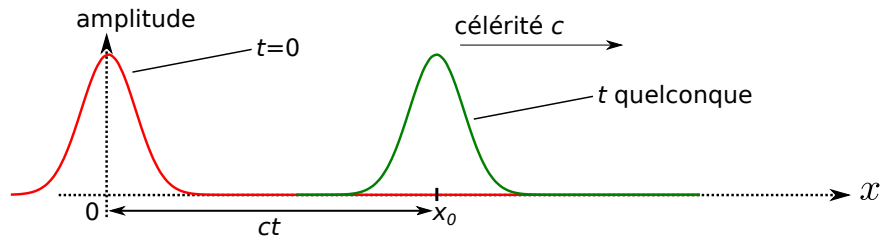
On tend un ressort, et on initie une perturbation verticale.

"photographies" à  $t=0$  et  $t$  quelconque

Ci-contre un schéma de la perturbation  $h(x, t)$  à  $t = 0$  et à un instant  $t$  quelconque :

Modèle : il n'y a pas de déformation du profil.

→ On appelle alors ceci une onde **progressive**.



– Notons  $f(x)$  le profil de la perturbation à  $t = 0$ .

– À un instant  $t$  quelconque, le profil s'est déplacé d'une distance  $c \times t$ .

Donc à l'instant  $t$ , le profil est obtenu en translatant le profil  $f(x)$  d'une distance  $a = ct$  vers la droite.

– La fonction qui décrit le profil à l'instant  $t$  est donc  $h(x, t) = f(x - ct)$ .

(rappel de mathématiques : le graphe de  $x \mapsto f(x - a)$  est obtenu en translatant celui de  $x \mapsto f(x)$  d'une distance  $a$  vers la droite.)

→ Conclusion : la perturbation peut alors s'écrire sous la forme  $h(x, t) = f(x - ct)$ , avec  $f(x)$  le profil pour  $t = 0$  (qui ensuite se propage).

### b/ Définition

#### Définition : onde progressive

Onde progressive unidimensionnelle (ou plane) : onde se propageant sans déformation de son profil.

Mathématiquement, la perturbation s'écrit :

$x$  est une coordonnée d'un repère cartésien (il peut aussi s'agir de  $y$  ou  $z$ ).

Ce type d'onde est un modèle, bien adapté dans certains cas où la déformation du profil est faible.

Contre exemple : une onde sphérique.

### c/ Célérité

#### Définition : célérité

La célérité, ou vitesse de propagation, est la vitesse de déplacement de la perturbation.

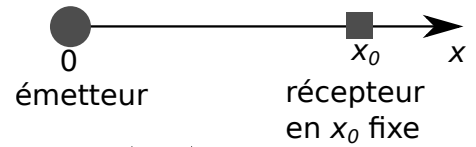
Exemples d'ondes et ordres de grandeurs de célérité :

Type de signal	Grandeurs physiques associées (exemples)	Célérité
onde sonore ou acoustique	pression acoustique $p$ , vitesse du fluide $v$	dans l'air* à $T$ et $p$ ambiants : , dans l'eau : $\simeq 1500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
onde électromagnétique (dont la lumière)	champs électrique $\vec{E}$ et magnétique $\vec{B}$	dans le vide* :
onde électrique	courant électrique $i$ et tension électrique $u$	$c = 3,0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

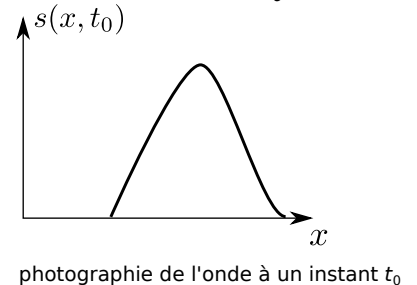
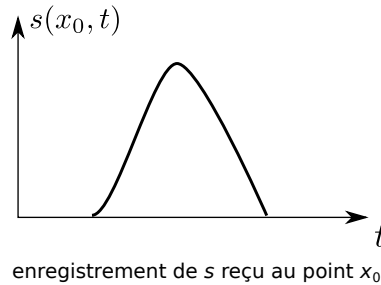
onde mécanique à la surface de l'eau ("vagues")	vitesse du fluide $v$ et pression $p$	quelques m/s
ébranlement le long d'une corde	ébranlement $y$ et force de rappel	quelques cm/s à qq m/s

### d/ Profils à $t$ fixé ou $x$ fixé

Ne pas confondre l'enregistrement du signal  $s$  qui est reçu au point  $x_0$ , et la photographie du signal à un instant  $t_0$  donné.



→<sub>1</sub> Faire l'EC1, et voir animation 1.



### 3 – Onde progressive sinusoïdale

- Onde *progressive* :  $s(x, t) = f(t - x/c)$ .
- En plus, onde *sinusoïdale* :  $f$  est une fonction cosinus,  $f(u) = s_0 \cos(\omega u + \varphi)$ .

→<sub>2</sub>

### a/ Définition

#### Définition : onde progressive sinusoïdale

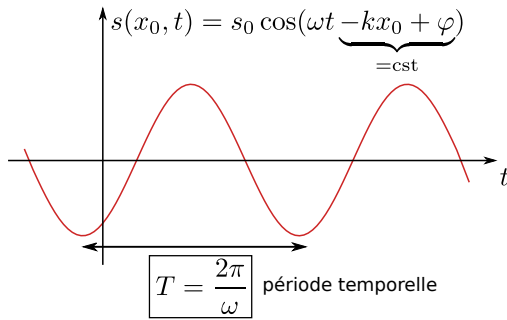
Une onde progressive sinusoïdale (ou progressive harmonique, ou progressive monochromatique) s'écrit sous la forme :

→<sub>3</sub> Quelle est la dimension du vecteur d'onde  $k$  ?

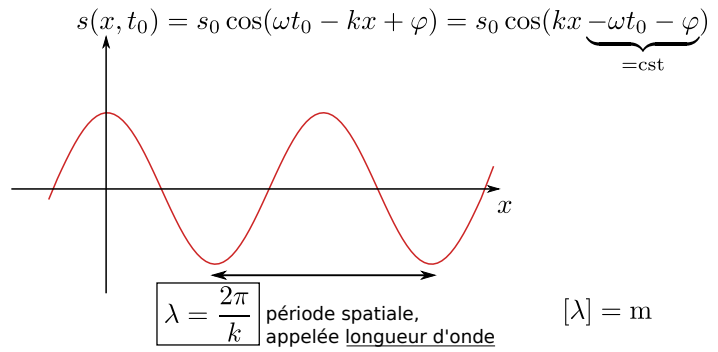
**Remarque :**  $\Phi = \underbrace{\omega t - kx + \varphi}_{\text{tout ce qui est dans le cos}}$  est la phase de l'onde.  $\varphi$  est donc la phase à  $t = 0$  en  $x = 0$ , d'où son nom.

## b/ Double périodicité

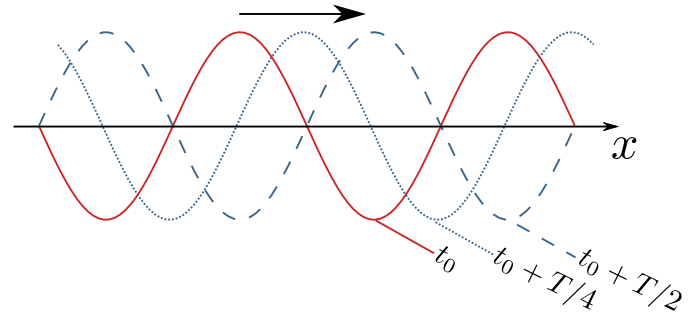
► Enregistrement en  $x_0$  fixé :



► "Photographie" à  $t_0$  fixé :



**Exemple :** Onde plane progressive monochromatique se propageant selon les  $x$  croissants, à différents instants : (faire apparaître  $\lambda$  sur le schéma)



→ Voir aussi animation 2 ou 3.

**Remarque :**

- La fréquence est  $f = \frac{\omega}{2\pi}$ , parfois notée  $\nu$  (lettre grecque "nu").
- On utilise parfois (rarement) le nombre d'onde  $\sigma = \frac{1}{\lambda}$  (lettre grecque "sigma").

**Lien entre  $\lambda$  et  $T$  :**

↪<sub>4</sub>

## c/ Ordres de grandeur

↪<sub>5</sub> Faire l'EC2.

## d/ Déphasage induit par la propagation

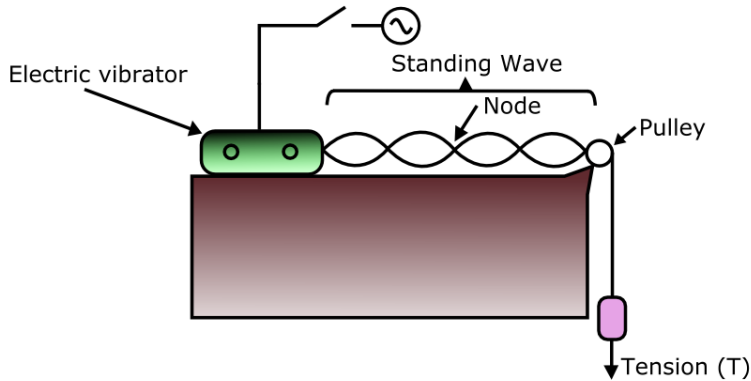
↪<sub>6</sub> Faire l'EC3.

## II – Ondes stationnaires

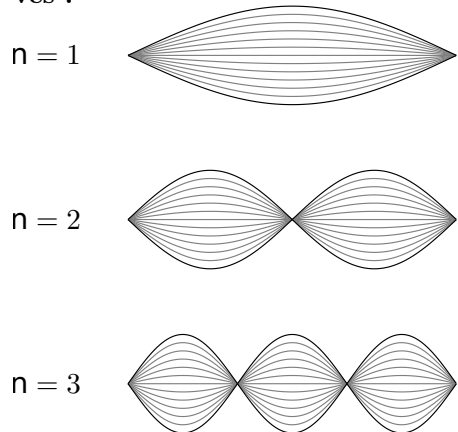
### 1 – Expérience de la corde de Melde

#### a/ Expérience

##### ● Schéma de l'expérience :



##### ● Allure des premiers modes observés :



##### ● Observations :

- Pour certaines fréquences d'excitation, on observe des oscillations d'amplitude importante (très supérieure à l'amplitude de l'excitation). On parle de **résonances**.
- Pour ces fréquences, la forme de l'onde comporte des points d'amplitude nulle, d'autres d'amplitude maximale. Leur nombre augmente avec la fréquence.
- Relevons ces fréquences : ..
- Ces fréquences semblent dépendre de la longueur de la corde.

Pour revoir l'expérience de la corde de Melde, ou pour une animation, cf site classe.

#### b/ Explication théorique : prédiction des longueurs d'onde et fréquences

→<sub>7</sub> Qu'imposent les conditions aux limites (en  $x = 0$  et  $x = L$ ) sur le signal  $s$  ?

Faire ci-dessus un schéma dans le cas où il y a 8 ventres.

Quelle est la distance entre deux nœuds ? Quelle est alors la relation entre  $L$  et  $\lambda$  ?

→<sub>8</sub> Généraliser au cas où il y a  $n$  ventres.

On parle de **mode** pour désigner une onde stationnaire pouvant exister avec une amplitude importante.

On a donc montré que le mode numéro  $n$  a une longueur d'onde  $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ .

On admet que la fréquence et la longueur d'onde d'un mode vérifient la même relation que pour une onde progressive harmonique.

→<sub>9</sub> En déduire la fréquence du mode  $n$ .

##### Ceci est-il en accord avec l'expérience ?

- On a bien constaté que  $f_2 = 2f_1$ ,  $f_3 = 3f_1$ , etc.
- Est-ce que  $f_1 = \frac{c}{2L}$  ? Vous le vérifierez en TP.

Pour s'entraîner à refaire ceci : **EC4**.



### c/ Expression de l'amplitude de l'onde

L'expérience suggère de rechercher l'expression de l'amplitude sous la forme :

$$s(x, t) = s_0 \cos(\omega t) \cos(kx + \varphi), \quad \text{avec } k = \omega/c.$$

On peut alors retrouver les résultats du b/ en utilisant les conditions aux limites :

### d/ Interprétation en termes d'interférences

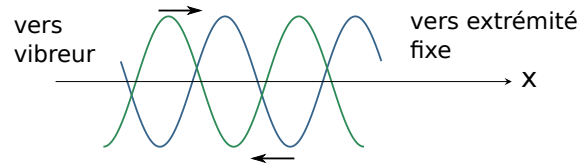
→ Animation montrant la superposition de deux ondes progressives : voir site classe.

Le vibreur envoie une onde progressive vers la droite :  $s_1(x, t) = s_0 \cos(\omega t - kx)$  (on prend une phase à l'origine nulle).

Au bout de la corde, en  $x = L$ , cette onde se réfléchit et revient sous la forme d'une onde progressive  $s_2$ . La pulsation de  $s_2$  est la même que celle de  $s_1$ , et donc son vecteur d'onde  $k = \omega/c$  également. On peut l'écrire de façon générale :

$$s_2(x, t) = s'_0 \cos(\omega t + kx + \varphi).$$

→ La somme de ces deux ondes donne bien une onde du type  $s(x, t) = s_0 \cos(\omega t) \cos(kx + \varphi)$ .



#### Conclusion

L'onde stationnaire observée lors de la résonance peut être vue comme la superposition de l'onde produite par le vibreur et de l'onde réfléchi en bout de corde.

Un ventre de l'onde stationnaire correspond à des interférences constructives entre ces deux ondes, et un nœud à des interférences destructives.

Notre démonstration montre également qu'il est justifié d'utiliser la relation  $\omega/k = c$  pour l'onde stationnaire.

(**Remarque :**  $s_2$  se réfléchit aussi en  $x = 0$ , et ceci donne une onde du même type que  $s_1$  avec un déphasage éventuel. Mais à la résonance ce déphasage est nul car le vibreur renvoie l'onde au bon moment. Cette troisième onde réfléchi est donc déjà comprise dans le terme  $s_1$ . De même pour toutes les réflexions.)

### e/ Cas d'une vibration quelconque de la corde

→ Revoir l'animation avec le spectre, chapitre 1.

Jusqu'ici, on a perturbé la corde de façon sinusoïdale (avec le vibreur).

→ Un seul mode  $n$  à la fois est excité.

Dans le cas d'une perturbation quelconque, tous les modes sont plus ou moins excités.

→ Toutes les fréquences  $f_1, 2f_1, 3f_1$ , etc... sont présentes dans le spectre → cf chapitre 1.

Le signal s'écrit alors  $s(x, t) = \sum_{n=1}^{+\infty} s_{0n} \cos(\omega t + \varphi_n) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$ .

## 2 – Cas général (autre que la corde de Melde)

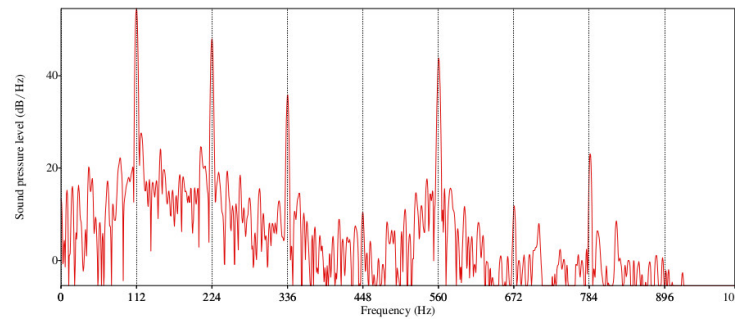
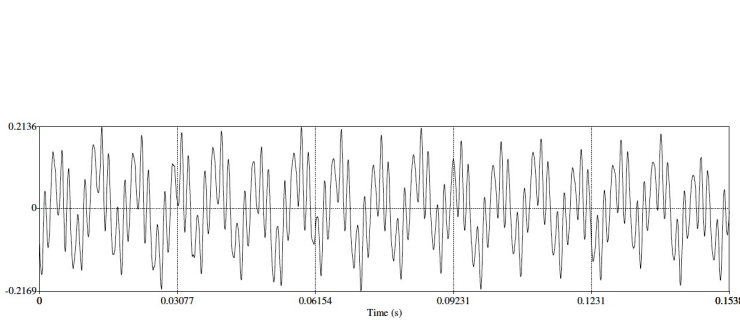
Dans le cas général, une onde stationnaire est une onde où les dépendances spatiale et temporelle sont découplées, et s'écrit :

$$s(x, t) = f(x) \times g(t).$$

- S'il y a présence de nœuds et de ventres, c'est une onde stationnaire.
- Une onde stationnaire s'observe lorsque les conditions aux limites imposent des ondes réfléchies, ou imposent des nœuds ou des ventres.

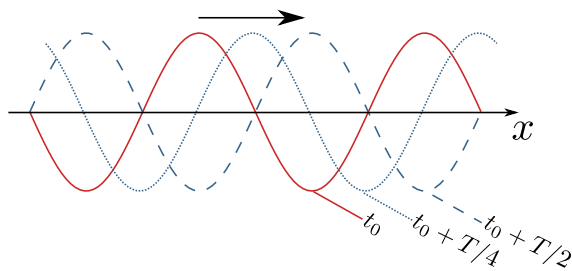
**Exemples :** instruments à cordes et à vent, four à micro-onde, etc...

**Exemple :** signal temporel produit du son produit par une corde de guitare, et spectre associé :

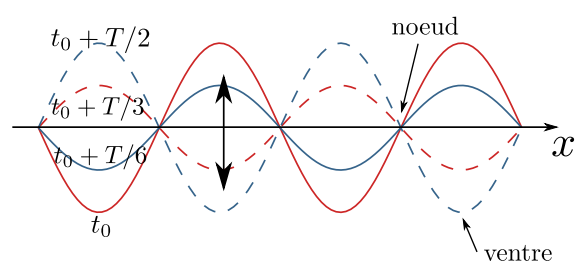


(source : <http://images.math.cnrs.fr/Spectre.html>)

## 3 – Comparaison entre une onde progressive et une onde stationnaire



**Onde plane progressive monochromatique.**  
Propagation à la célérité  $v$ .



**Onde stationnaire du type  $\cos(\omega t) \cos(kx)$ .**  
Nœuds et ventres.

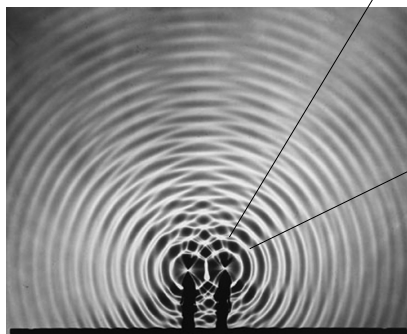
Pas de propagation.

## III – Interférences

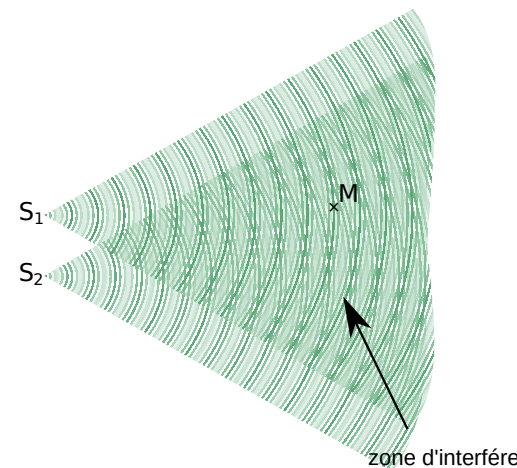
Interférence = superposition d'onde.

### 1 – Principe de superposition

• Exemples d'observations :



Interférences entre deux ondes sphériques produites par deux vibreurs à la surface de l'eau.



• Idée derrière les interférences :

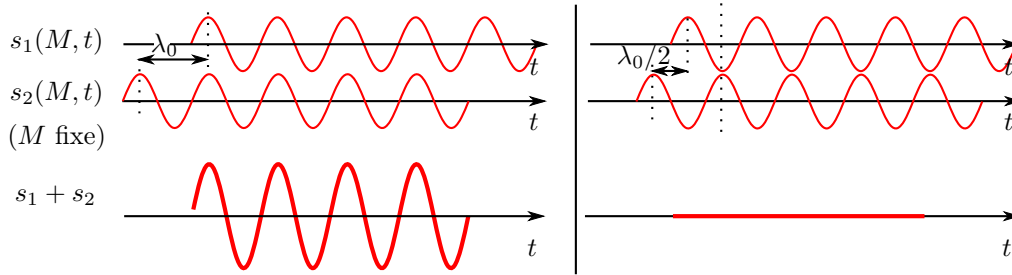
- Source  $S_1$  qui produit une onde  $s_1(M, t)$ .

– Source  $S_2$  qui produit une onde  $s_2(M, t)$ .

⇒ l'amplitude totale au point  $M$  est  $s_{\text{tot}}(M, t) = s_1(M, t) + s_2(M, t)$ .

**On a alors :**

- Si les ondes  $s_1$  et  $s_2$  sont au point  $M$  (maximales en même temps, ou minimales en même temps),  
alors l'amplitude  $s_{\text{tot}}$  est importante.  
→ On dit que les interférences sont .
- Si les ondes  $s_1$  et  $s_2$  sont en au point  $M$  (l'une est maximale et l'autre minimale),  
alors l'amplitude  $s_{\text{tot}}$  est faible.  
→ On dit que les interférences sont .



**Attention :** ceci n'a un sens que si  $s_1$  et  $s_2$  sont de même période.

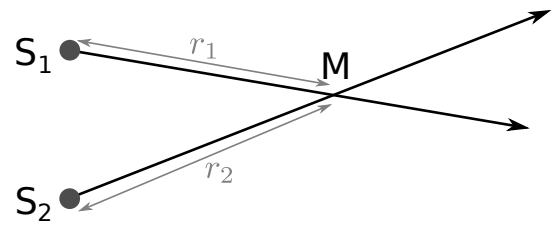
**Observations d'interférences ?**

- cordes (nœuds et ventres),
- séismes, marées,
- casques antibruits,
- optique (cf cours de PT).

## 2 – Condition sur le déphasage

Soit  $M$  un point d'observation. Les deux sources émettent :

$$s_1(M, t) = s_0 \cos(\omega t - kr_1) \quad \text{et} \quad s_2(M, t) = s_0 \cos(\omega t - kr_2).$$



**Remarque :** Si on note  $\Delta\varphi = (\omega t - kr_1) - (\omega t - kr_2)$  la différence de phase entre les deux ondes, on a montré que  
interférences constructives  $\Leftrightarrow \Delta\varphi = 2p\pi, \quad p \in \mathbb{Z}$ .

**Remarque :** Cette fois,  
interférences destructives  $\Leftrightarrow \Delta\varphi = \pi + 2p\pi, \quad p \in \mathbb{Z}$ .

On retrouve ce qu'on a annoncé dans le 1/.

## Bilan

- ▶ Interférences constructives  $\Leftrightarrow$  différence de phase  $\Delta\varphi = 2p\pi \Leftrightarrow r_2 - r_1 = p\lambda \quad (p \in \mathbb{Z})$ .
- ▶ Interférences destructives  $\Leftrightarrow$  différence de phase  $\Delta\varphi = \pi + 2p\pi \Leftrightarrow r_2 - r_1 = \frac{\lambda}{2} + p\lambda \quad (p \in \mathbb{Z})$ .

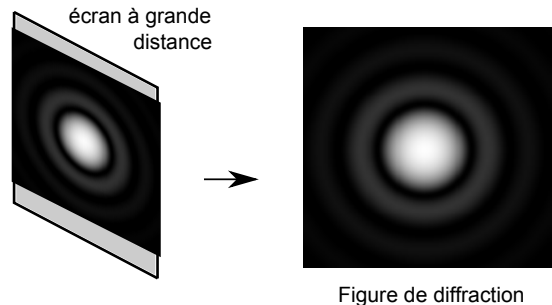
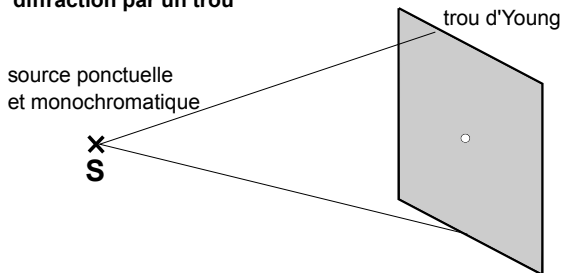
$\rightsquigarrow_{10}$  Faire l'EC5.

## IV – Diffraction

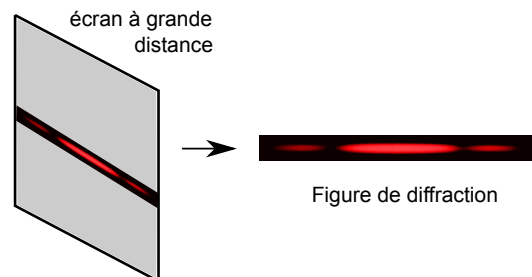
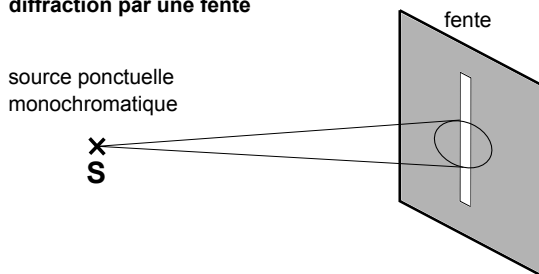
### Exemples d'observations :

Voir site de la classe pour une photographie aérienne de la mer, qui montre une diffraction de la houle.

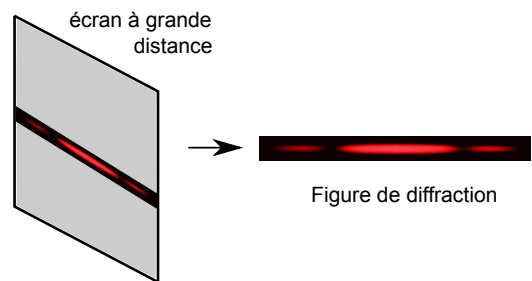
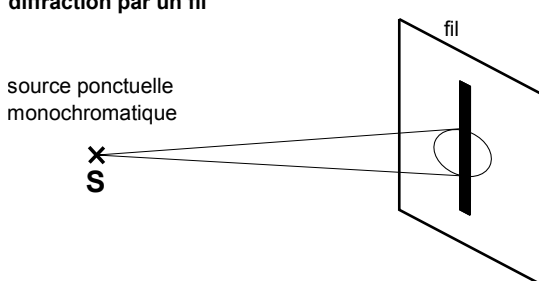
#### diffraction par un trou



#### diffraction par une fente

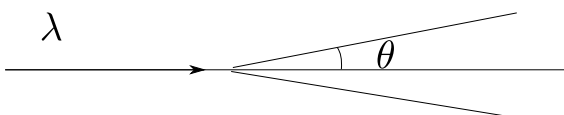


#### diffraction par un fil



Vu en terminale :

- Apparaît lorsqu'un obstacle de taille  $d$  de l'ordre de  $\lambda$  est présent.
- Plus  $d$  est petit, plus la déviation est grande.
- Expérimentalement, on constate que  $\sin \theta \simeq \frac{\lambda}{d}$  avec  $\theta$  le demi-angle d'ouverture.



**Remarque :** Si  $d < \lambda$ , alors la formule  $\sin \theta = \lambda/d$  ne marche plus. Elle devient plus complexe.

$\rightsquigarrow_{11}$  Faire l'EC6.