

Ondes et signaux – Chapitre 1 : Propagation d'un signal : ondes mécaniques progressives

I. Quelques notions sur les signaux

1. Signal et transmission d'une information
2. Signaux ne dépendant que du temps, signaux dépendant du temps et des variables spatiales
3. Signal analogique et signal numérique

II. Présentation des ondes mécaniques progressives

1. Définitions et propriétés
2. Exemples d'ondes mécaniques progressives

III. Grandeurs caractéristiques de la propagation d'une onde progressive unidimensionnelle

1. Caractéristiques du milieu d'étude
2. Descriptions spatiale et temporelle : notion de retard et de célérité
3. Paramètres d'influence de la célérité
4. Mesure du retard : exemples d'applications
5. Cas des ondes progressives sinusoïdales

Extrait du programme de seconde

Notions	Capacités exigibles
Emission et perception d'un son Émission et propagation d'un signal sonore. Vitesse de propagation d'un signal sonore. Signal sonore périodique, fréquence et période. Relation entre période et fréquence.	Décrire le principe de l'émission d'un signal sonore par la mise en vibration d'un objet et l'intérêt de la présence d'une caisse de résonance. Expliquer le rôle joué par le milieu matériel dans le phénomène de propagation d'un signal sonore. Citer une valeur approchée de la vitesse de propagation d'un signal sonore dans l'air et la comparer à d'autres valeurs de vitesses couramment rencontrées. Définir et déterminer la période et la fréquence d'un signal sonore notamment à partir de sa représentation temporelle.

Extrait du programme de spécialité de première

Notions	Capacités exigibles
Ondes mécaniques Onde mécanique progressive. Grandeurs physiques associées.	Décrire, dans le cas d'une onde mécanique progressive, la propagation d'une perturbation mécanique d'un milieu dans l'espace et au cours du temps : houle, ondes sismiques, ondes sonores, etc. Expliquer, à l'aide d'un modèle qualitatif, la propagation d'une perturbation mécanique dans un milieu matériel.
Célérité d'une onde. Retard. Ondes mécaniques périodiques. Ondes sinusoïdales. Période. Longueur d'onde. Relation entre période, longueur d'onde et célérité.	Exploiter la relation entre la durée de propagation, la distance parcourue par une perturbation et la célérité, notamment pour localiser une source d'onde. Distinguer périodicité spatiale et périodicité temporelle. Justifier et exploiter la relation entre période, longueur d'onde et célérité. Déterminer les caractéristiques d'une onde mécanique périodique à partir de représentations spatiales ou temporelles.

Extrait du programme de BCPST 1

Notions	Capacités exigibles
Signaux physiques Exemples de signaux physiques.	Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux mécaniques, acoustiques, électriques et sismiques.
Propagation d'un signal dans un milieu homogène, illimité, non dispersif et transparent Célérité. Retard temporel. Approche descriptive de la propagation d'un signal unidimensionnel. Cas particulier du signal sinusoïdal : amplitude, double périodicité spatiale et temporelle.	Obtenir l'expression de la célérité par analyse dimensionnelle à partir des grandeurs physiques fournies. Interpréter l'influence de ces grandeurs physiques sur la célérité. Citer les valeurs de la célérité du son dans l'air et dans l'eau dans les conditions usuelles. Exploiter la relation entre la distance parcourue par le signal, le retard temporel et la célérité. Exploiter des données pour localiser l'épicentre d'un séisme. Exploiter une représentation graphique donnant l'amplitude du signal en fonction du temps en un point donné, ou en fonction de la position à un instant donné. Exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. Citer les limites en termes de fréquences du spectre audible par l'être humain.

Ce qu'il faut retenir de ce chapitre

Savoirs	Savoir-faire
Exemples d'ondes mécaniques progressives : corde vibrante, compression d'un ressort, ondes sonores, houle, ondes sismiques Ondes transversales – ondes longitudinales Propagation d'une onde : célérité, retard temporel Valeurs de la célérité du son dans l'air et dans l'eau dans les conditions usuelles. Signal sinusoïdal : amplitude, phase à l'origine, période, fréquence Onde progressive sinusoïdale : double périodicité spatiale et temporelle, période temporelle et longueur d'onde	Identifier les grandeurs physiques correspondant à différents types d'onde Déterminer si l'onde est transversale ou longitudinale Savoir décrire la propagation d'une onde et la notion de retard temporel. Exploiter une représentation graphique donnant la valeur du signal en fonction du temps en un point donné, ou en fonction de la position à un instant donné. Exploiter la relation entre la distance parcourue par le signal, le retard temporel et la célérité. Exploiter des données pour localiser l'épicentre d'un séisme. Obtenir l'expression de la célérité par analyse dimensionnelle à partir des grandeurs physiques fournies. Interpréter l'influence de ces grandeurs physiques sur la célérité. Exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité. Citer les limites en termes de fréquences du spectre audible par l'être humain.

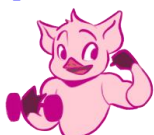
Ordres de grandeur et valeurs à connaître

Onde sonore : Célérité du son dans l'air : $c_{\text{son}} = 340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Célérité du son dans l'eau : $c_{\text{son}} = 1\,500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ Gamme de fréquence audible pour l'homme : de 20 Hz à 20 kHz $f < 20 \text{ Hz}$: infrasons $f > 20 \text{ kHz}$: ultra sons	Onde sismique : (nous donnons des valeurs moyennes car la célérité dépend du type de milieu) <ul style="list-style-type: none"> - ondes P : $c_{\text{onde P}} \approx 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ - ondes S : $c_{\text{onde S}} \approx 4,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ - ondes superficielles : $c_{\text{onde superficielle}} \approx 1,5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$
--	--

Différence entre onde transversale et onde longitudinale : <https://www.youtube.com/watch?v=X8wx9n0mgaM>

Simulation pour comprendre la double périodicité :

http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/general/evolution_temporelle.php



Cahier d'entraînement des prépas : exercices sélectionnés de la fiche 2

I. Quelques notions sur les signaux

1. Signal et transmission d'une information

Grâce aux nouvelles technologies, les moyens de transmettre une information sont multiples et très rapides. Pour permettre une transmission optimale de l'information, il convient d'analyser et de caractériser le signal, support de cette information.

Définitions :

Un **signal** est la représentation physique d'une **information** transmise depuis son émetteur jusqu'à son récepteur.

Il est transmis via une **chaîne de transmission** au cours de laquelle il peut subir plusieurs **conversions** (effectuées par un **transducteur**), mais il doit conserver dans la mesure du possible la quasi-intégralité de l'information émise. La **chaîne de transmission** est l'ensemble des dispositifs permettant le transport de l'information sur des distances plus ou moins importantes.

L'**émetteur** est chargé d'élaborer un signal (en y incorporant l'information à transmettre) qui sera adapté à la nature du canal de transmission.

Le **récepteur** est chargé d'interpréter le signal afin d'y extraire l'information.

Le **canal de transmission** permet le **transport** du signal, comme les fils électriques dans le cas d'un signal électrique, l'air dans le cas des ondes sonores et des ondes électromagnétique (EM) ou les fibres optiques pour ces dernières.

Exemple 1 : chaîne de transmission d'une information sonore avec amplification

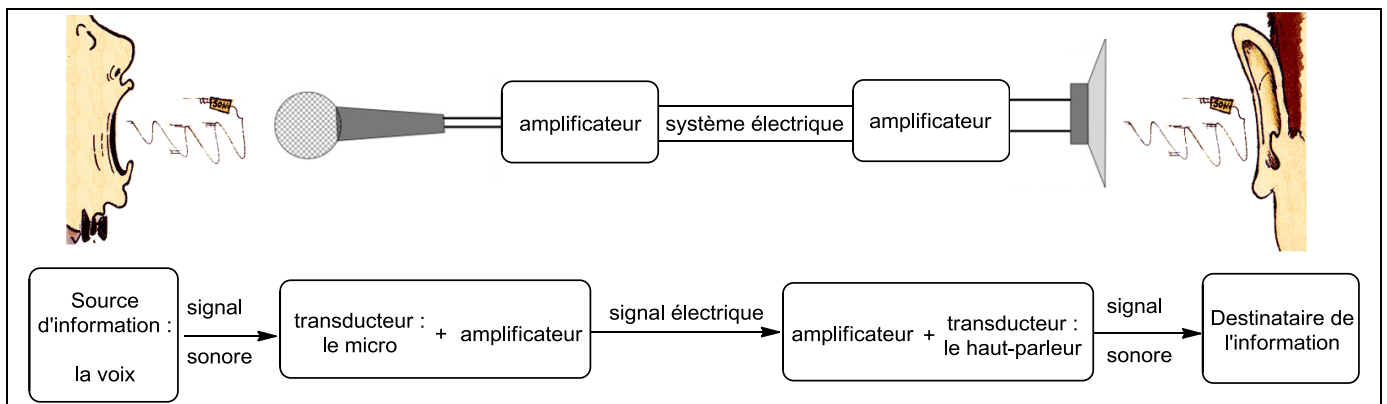


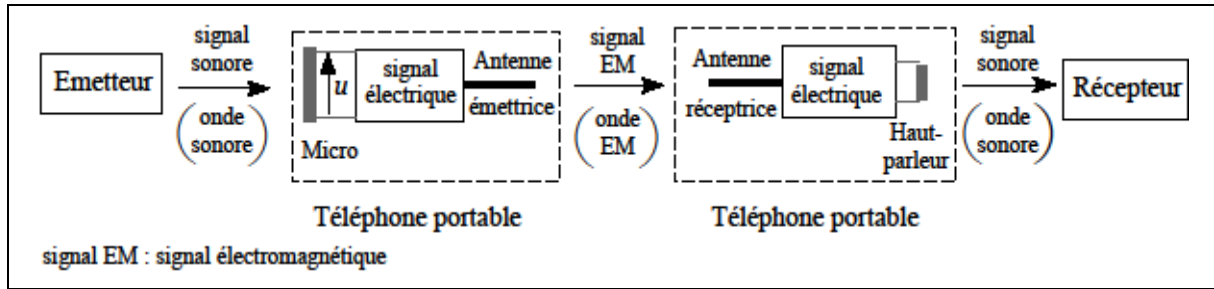
Figure 1 : chaîne de transmission d'une information sonore

Cette chaîne de transmission fait apparaître plusieurs couples émetteur-récepteur, plusieurs types de signaux et canaux de transmission :

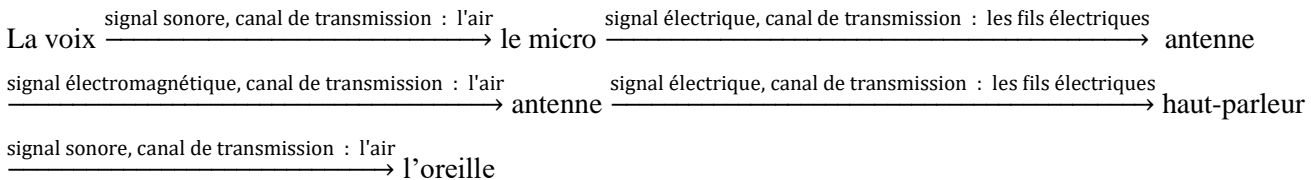
Émetteur 1 : la voix $\xrightarrow{\text{signal sonore, canal de transmission : l'air}}$ récepteur 1 : le micro + amplificateur

Émetteur 2 : le micro + amplificateur $\xrightarrow{\text{signal électrique, canal de transmission : les fils électriques}}$ récepteur 2 : amplificateur + haut-parleur

Émetteur 3 : amplificateur + haut-parleur $\xrightarrow{\text{signal sonore, canal de transmission : l'air}}$ récepteur 3 : oreille

Exemple 2 : chaîne de transmission d'un signal sonore via la téléphonie mobile**Figure 2 : autre chaîne de transmission d'une information sonore**

Cette chaîne de transmission fait apparaître plusieurs couples émetteur-récepteur, plusieurs types de signaux et canaux de transmission :

**2. Signaux ne dépendant que du temps, signaux dépendant du temps et des variables spatiales****a. Signaux ne dépendant que du temps : les signaux électriques****A retenir :**

Les grandeurs physiques associées aux signaux électriques sont **la tension et l'intensité** (que l'on définira dans le chapitre 2). Ces signaux pourront dépendre du temps (**régime variable**) ou non (**régime stationnaire ou continu**).

La tension électrique u aux bornes du microphone (micro) du téléphone portable, dans l'exemple 2, est un signal **électrique** qui évolue au cours de la conversation : il ne dépend que du **temps** et peut être visualisé sur l'écran d'un oscilloscope.

b. Signaux dépendant du temps et des variables spatiales : les ondes**A retenir :**

Une onde (mécanique ou électromagnétique) est un signal qui se propage et dépend donc d'une ou plusieurs **variables spatiales et du temps**.

Les **ondes mécaniques** se propagent dans **un milieu matériel**. (étudiées dans ce chapitre)

Les **ondes électromagnétiques** (la lumière) n'ont pas besoin de milieu matériel pour se propager et peuvent se déplacer dans le **vide**. (cf. chapitre 3)

Remarque : la grandeur physique caractérisant une onde mécanique dépend de la nature de l'onde :

- Pour une onde mécanique le long d'une corde et pour une onde sismique, la grandeur physique en un point est la distance entre la position du point lors du passage de la perturbation et sa position au repos.
- Pour une onde acoustique, la grandeur physique en un point est usuellement la pression acoustique en ce point, définie comme la variation de la pression dans le milieu.

3. Signal analogique et signal numérique

a. Signal analogique :

Un signal **analogique** s est la représentation d'une grandeur physique qui varie et qui est mesurable de façon **continue** dans le temps.

Les signaux **électriques** analogiques sont obtenus aux moyens de **transducteurs** comme un microphone qui convertit le signal sonore en signal électrique, une photodiode ou un phototransistor qui convertissent un signal électromagnétique en signal électrique.

Dans les exemples précédents, le microphone convertit les variations de pression ressenties sur sa membrane en variation de tension électrique à ses bornes. Les variations de pression et celle de tension sont analogues en termes d'évolution (d'où l'origine du terme analogique).

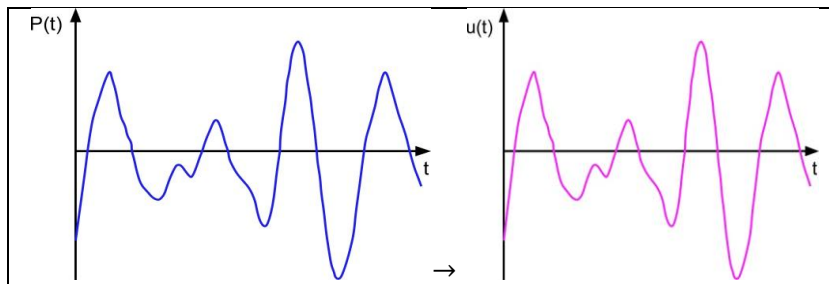


Figure 4 : signal acoustique transformé analogiquement en signal électrique

b. Signal numérique

Un signal **numérique** s' est la représentation d'une grandeur physique dont on mesure un **nombre limité** de valeurs dans le temps. Le signal est une succession de **valeurs discrètes**.

Un **convertisseur analogique numérique** permet la conversion d'un signal analogique en signal numérique. Différents paramètres sont à régler comme la résolution (nombre de bits) et la fréquence d'échantillonnage. Les cartes d'acquisition de type Arduino sont des convertisseurs analogique-numérique.

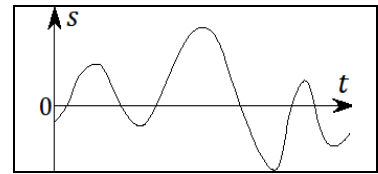


Figure 3 : représentation d'un signal analogique

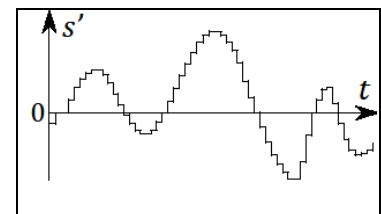


Figure 5 : représentation d'un signal numérique

La plupart des signaux physiques, porteurs d'information, se propage dans l'espace : ce sont des ondes progressives. Deux catégories d'onde seront étudiées : les ondes mécaniques dans ce présent chapitre et les ondes électromagnétiques dans le chapitre 3. L'objet de ce chapitre est donc d'étudier la diversité des ondes mécaniques (houle, onde sismique, son, etc.) et de les caractériser.

II. Présentation des ondes mécaniques progressives

1. Définitions et propriétés

a. Perturbation et onde

Définitions :

Remarques :

Les ondes électromagnétiques (la lumière) sont des ondes non mécaniques qui peuvent se propager dans le vide. La perturbation n'est pas une déformation de la matière.

Il existe des ondes dites stationnaires qui ne se propagent pas (par exemple l'onde produite sur une corde de guitare après l'avoir grattée).

Propriétés :

- Un milieu est dit élastique s'il se déforme lorsqu'il est contraint et reprend sa forme initiale dès que la contrainte disparaît.
- En l'absence de matière, c'est-à-dire dans le vide, une perturbation mécanique ne se propage pas. En effet, lors de la propagation d'une perturbation dans un milieu matériel élastique, les entités constituant la matière sont écartées de leur position d'équilibre et leurs interactions avec les entités voisines sont modifiées, c'est ce qui permet la propagation.

b. Deux types d'ondes mécaniques

Définitions :

2. Exemples d'ondes mécaniques progressives

Une onde mécanique est caractérisée en chaque point de l'espace par une grandeur physique (constituant le « signal »), qui dépend de la nature de l'onde. Nous nous intéresserons aux ondes unidimensionnelles, c'est-à-dire aux ondes pour lesquelles la grandeur décrivant la perturbation n'est fonction que d'une seule variable d'espace. Etudions plusieurs exemples en identifiant le type d'onde et la grandeur physique associée.

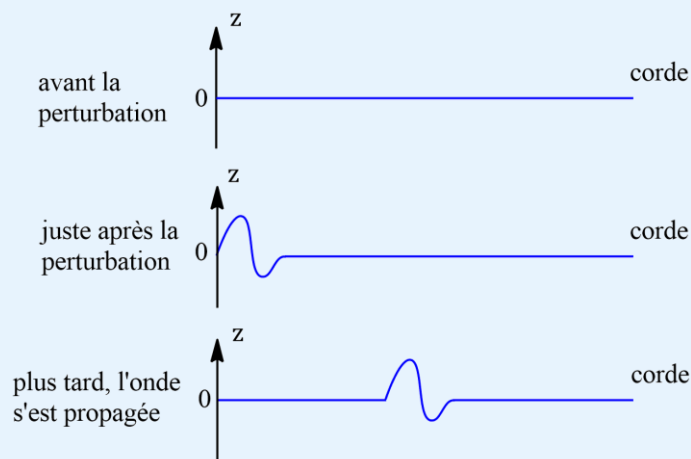


Exercice d'application 1

a. Exemples d'ondes transversales : ondulation d'une corde, houle en mer, « ronds » dans l'eau

Grandeur physique caractérisant l'onde en un point de l'espace :

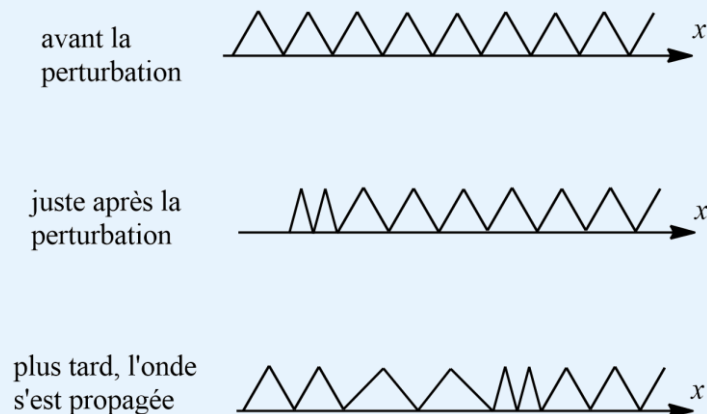
Schéma pour l'ondulation d'une corde :



b. Exemple d'onde longitudinale : compression d'un ressort

Grandeur physique caractérisant l'onde en un point de l'espace :

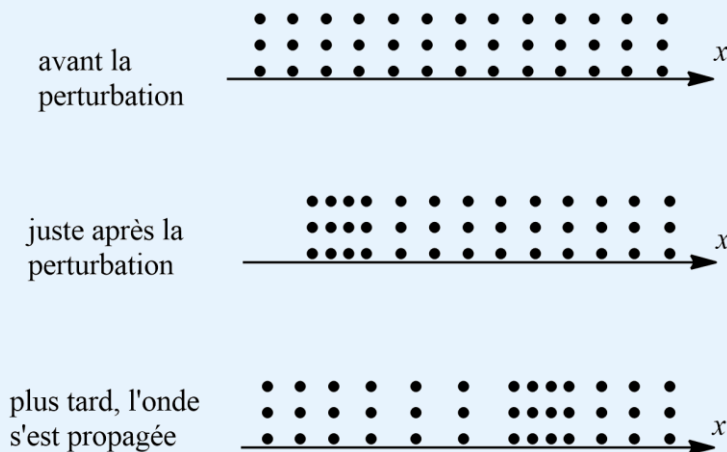
Schéma :



c. Cas particulier des ondes acoustiques (ondes sonores)

Grandeur physique caractérisant l'onde en un point de l'espace :

Schéma :



d. Cas particulier des ondes sismiques

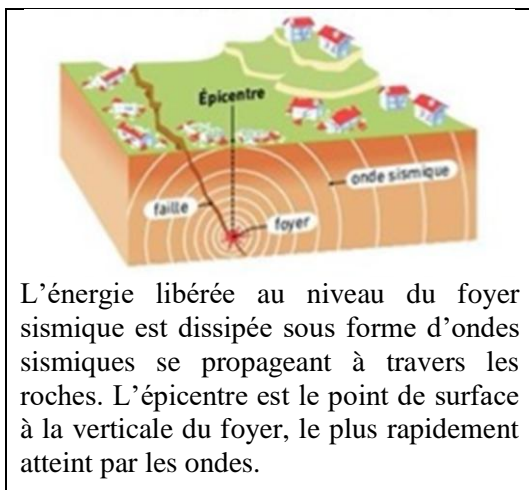


Figure 1 : propagation des ondes sismiques à partir du foyer

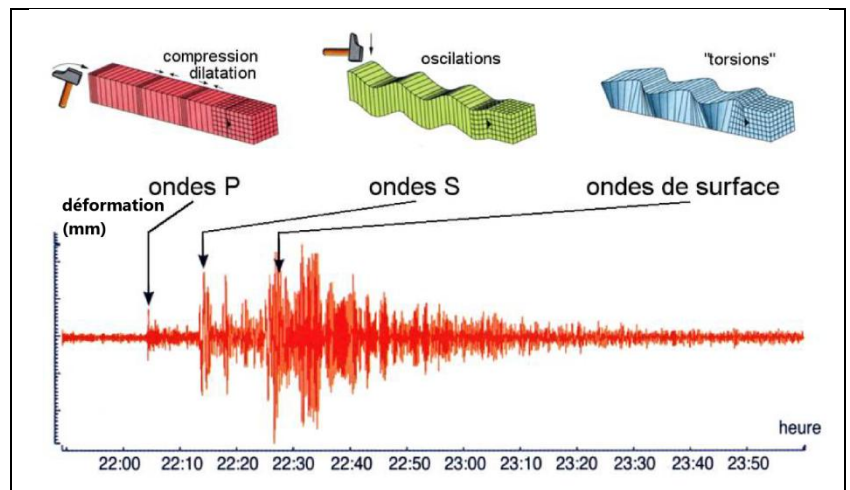


Figure 2 : les trois types d'ondes sismiques et exemple de sismographe

Grandeur physique caractérisant l'onde en un point de l'espace :

Distance entre la position du point lors du passage de la perturbation et sa position au repos.

Type d'onde :

Les **ondes de volume** propagent à l'intérieur du globe dans toutes les directions. Elles sont de deux types :

- Les **ondes P** (primaires) sont des ondes longitudinales. Ce sont les plus rapides, elles se propagent aussi bien dans les solides que dans les liquides par compression-dilatation des matériaux traversés.
- Les **ondes S** (secondaires) sont des ondes transversales. Ce sont des ondes de cisaillement qui se propagent uniquement dans les milieux solides par oscillation

Les ondes **de surface** se propagent uniquement dans les couches superficielles du globe. Elles sont moins rapides mais de grande amplitude (causes de gros dégâts). Ce sont des ondes transversales, de torsion.

Remarque : les ondes sismiques sont enregistrées à la surface grâce à des sismographes placés dans des stations sismiques. Les vibrations du sol sont converties via un système électrique en signal électrique (courant électrique). L'enregistrement peut être graphique ou numérique.

Dans une station sismique on dispose de trois sismographes pour enregistrer les trois composantes du mouvement du sol.

III. Grandeurs caractéristiques de la propagation d'une onde progressive unidimensionnelle

1. Caractéristiques du milieu d'étude

Les milieux étudiés dans ce chapitre posséderont les caractéristiques suivantes

- Milieu homogène : propriétés physiques scalaires identiques en tout point
- Transparent : le milieu n'absorbe pas l'énergie
- Non dispersif : la vitesse de propagation de l'onde (appelée célérité) est indépendante de la fréquence du signal

Remarque :

Si le milieu absorbe une partie de l'énergie transportée par l'onde, on dit qu'il y a amortissement et l'onde est alors modifiée.

2. Descriptions spatiale et temporelle : notion de retard et de célérité

a. Descriptions spatiale et temporelle

Pour comprendre les caractéristiques d'une onde progressive unidimensionnelle, analysons l'exemple d'une onde transversale se propageant le long d'une corde.

Grandeur caractéristique : la grandeur physique caractérisant l'onde en un point de l'espace est la distance entre la position du point lors du passage de la perturbation et sa position au repos, distance appelée **élongation**.

Onde unidimensionnelle : l'élongation n'est fonction que d'une variable d'espace : la distance entre le point considéré et le début de la corde, distance notée x .

Pour comprendre le principe de propagation d'une onde, **deux descriptions** sont nécessaires :

- la **description spatiale** de l'onde à un instant donné : on fixe l'instant t et on représente l'élongation en fonction de x
- la **description temporelle** de l'onde en un point donné : on fixe le point d'étude et on représente l'évolution de l'élongation en fonction du temps en ce point.

Description spatiale : $s(x)$ à un instant t fixé

Description temporelle : $s(t)$ en un point d'abscisse x fixée

b. Retard et célérité**Définitions :****Retard :****Célérité :****Exercice d'application 2**

Ne pas confondre un instant t (ou une date t) et une durée Δt .

3. Célérité : exemples et paramètres d'influence**a. Quelques valeurs à connaître**

Onde sonore : plus le milieu est dense et compressible plus la célérité est importante. Dans les conditions usuelles pression de 1 bar et température de 298 K :

Onde sismique : (nous donnons des valeurs moyennes car la célérité dépend du type de milieu)

b. Paramètres d'influence

La célérité d'une onde mécanique progressive dépend :

Il est possible d'obtenir l'expression de la célérité d'une onde par analyse dimensionnelle à partir des paramètres d'influence.

Exemple d'analyse dimensionnelle : célérité d'une onde dans une corde tendue de guitare

Les paramètres d'influence sont : la tension (force) de la corde, la masse linéique de la corde (masse par unité de longueur)

4. Mesure du retard : exemples d'applications

La mesure du retard d'une onde peut permettre de déterminer expérimentalement des distances ou des célérités.

a. Détermination de la célérité du son dans l'air

Cf. TP 6 et ex.6

b. Détermination de distance

- **Localisation de l'épicentre d'un séisme** : *cf.* ex. 8

La mesure de la différence de temps d'arrivée jusqu'à une station sismique entre les ondes P et les ondes S, permet de déterminer la distance entre la station et l'épicentre. Si cette distance est connue pour trois stations sismiques différentes alors il est possible de localiser l'épicentre du séisme par triangulation.

- **Détermination de la profondeur des fonds marins par sonar** : *cf.* ex.5
- **Echographie**

5. Cas des ondes progressives sinusoïdales

a. Signal périodique – signal alternatif – signal sinusoïdal

On s'intéresse ici à la dépendance temporelle d'un signal en un point donné.



Exercice d'application 3

Signal périodique :

Fréquences à retenir dans le cas des ondes sonores :

Il existe des cas particuliers de signaux périodiques :

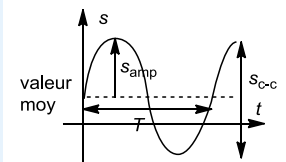
Signal alternatif :

Signal alternatif sinusoïdal : un signal est dit alternatif et sinusoïdal si sa grandeur $s(t)$ suit une loi de variation temporelle de la forme :

avec :

Remarque :

Il existe des signaux sinusoïdaux non alternatifs :



$$s(t) = S_{\text{moy}} + S_{\text{amp}} \cos(\omega t + \varphi)$$

Démonstration :

Remarque : pour comparer deux signaux périodiques sinusoïdaux de même période entre eux mais décalés dans le temps, on définit leur déphasage.

Déphasage de 2π ou nul :	Déphasage de π :	Déphasage quelconque :
Signaux en phase	Signaux en opposition de phase	

b. Ondes sinusoïdales : double périodicité (temporelle et spatiale)

On peut une nouvelle fois pour une meilleure compréhension, prendre l'exemple de la propagation d'une onde unidimensionnelle (variable x) progressive sinusoïdale le long d'une corde dont la direction est l'axe (Ox), une des extrémités (la source) ayant un mouvement vibratoire transversal sinusoïdal.

Expression du signal correspondant à une onde unidimensionnelle progressive sinusoïdale

Une onde **unidimensionnelle progressive sinusoïdale** de pulsation ω (période T), se propageant à la célérité c , est une onde dont le signal s est défini en tout point (où existe l'onde) par une fonction **sinusoïdale** à deux variables, une **variable d'espace x** et la **variable temporelle t** , notée $s(x, t)$, dont l'expression est :

L'expression de S fait apparaître une double périodicité : temporelle et spatiale

Périodicité temporelle, à abscisse x fixée :

Le signal pour une abscisse x fixée, est une fonction sinusoïdale du temps t , de période T et d'amplitude S_{amp} .

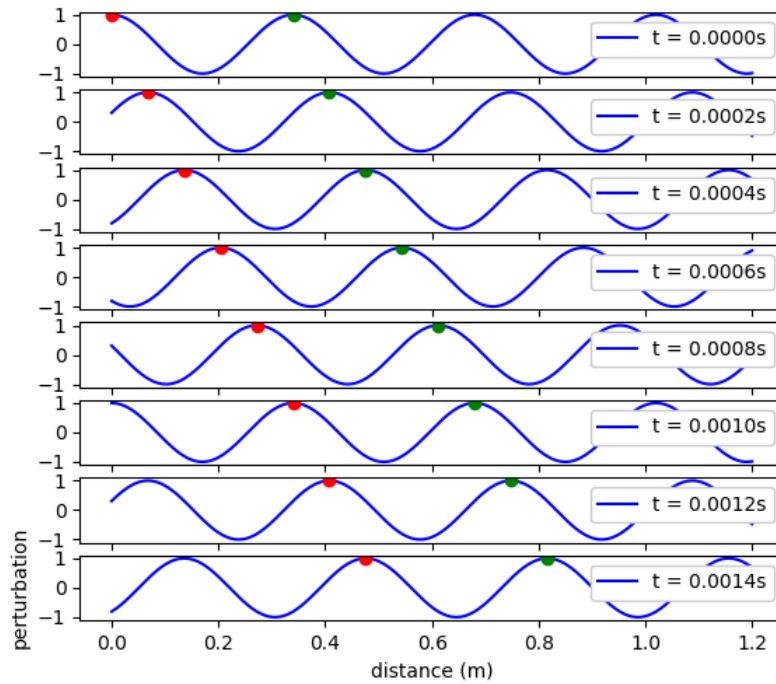
Pour une onde, la période temporelle T est la plus petite durée au bout de laquelle un point fixe du milieu de propagation se retrouve dans le même état : elle est imposée par la source.

Périodicité spatiale, à t fixé :

Le signal, à un instant t , est une fonction sinusoïdale de x , de période λ , appelée **longueur d'onde** et d'amplitude S_{amp} .

Pour une onde, la période spatiale (longueur d'onde) λ est la plus petite distance séparant deux points dans le même état de perturbation au même instant t : elle dépend du milieu de propagation (via la célérité)

La période temporelle et la longueur d'onde sont directement liées (et ce n'est pas évident de le visualiser !!). Analysons une simulation pour le comprendre :



Par définition du retard Δt et de la célérité c :

Si la distance parcourue est égale à une longueur d'onde :

Conclusion :

Voici le programme permettant d'effectuer la simulation de la page précédente :

```

1 import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
3 from math import *

5 # On définit une fonction renvoyant la valeur du signal à un instant t en un point
d'abscisse x, pour une onde se propageant à la célérité c, de période temporelle T :
7
def f(x,t,c,T):
9     return cos(2*pi*(t/T-x/(c*T)))

11 # On définit une fonction permettant d'afficher plusieurs graphiques en même temps,
chaque graphe représentant l'évolution du signal en fonction de x à un instant t :
supérieur au précédent
13

15 def affiche(c,T,tmax,xmax):
    dt=tmax/10 # On définit l'intervalle de temps entre deux représentations spatiales
17     dx=xmax/10000 # On définit l'intervalle entre deux valeurs de x pour tracer la
fonction f
19     x=[] # On crée une liste x vide

21 # boucle 1 permettant d'obtenir une liste de valeurs de x de 0 à xmax, espacées de dx
for i in range(10000):
23     x.append(i*dx)

25 # boucle 2 permettant de créer une succession de représentations spatiales du signal à
des instants différents (de t = 0 à t = 8*dt)
27     for i in range(0,8):
        y=[] # On crée une liste y vide
29         plt.subplot(8,1,i+1) # Fonction de matplotlib en lien avec la subdivision de
la zone de graphe
31         for j in range(10000): # boucle dans la boucle 2 pour créer une représentation
            y.append(f(x[j],i*dt,c,T)) # On construit une liste y contenant les
33 valeurs du signal pour chaque valeur de x, en appelant la fonction f
            plt.plot(x,y,"blue",label="t = {:.4f}s".format(i*dt))
35             plt.plot([c*i*dt],[f(c*i*dt,i*dt,c,T)],"o",color="red")
            plt.plot([c*i*dt+c*T],[f(c*i*dt+c*T,i*dt,c,T)],"o",color="green")
37             plt.legend(loc='upper right',framealpha=1.)
        plt.xlabel("distance (m)")
39         plt.ylabel("perturbation")
        plt.show()
41

affiche(c = 340,T = 1/1000., tmax = 0.002, xmax = 1.2)
43 #utilise la fonction affiche pour une onde de célérité 340 m/s, de fréquence 1kHz

```