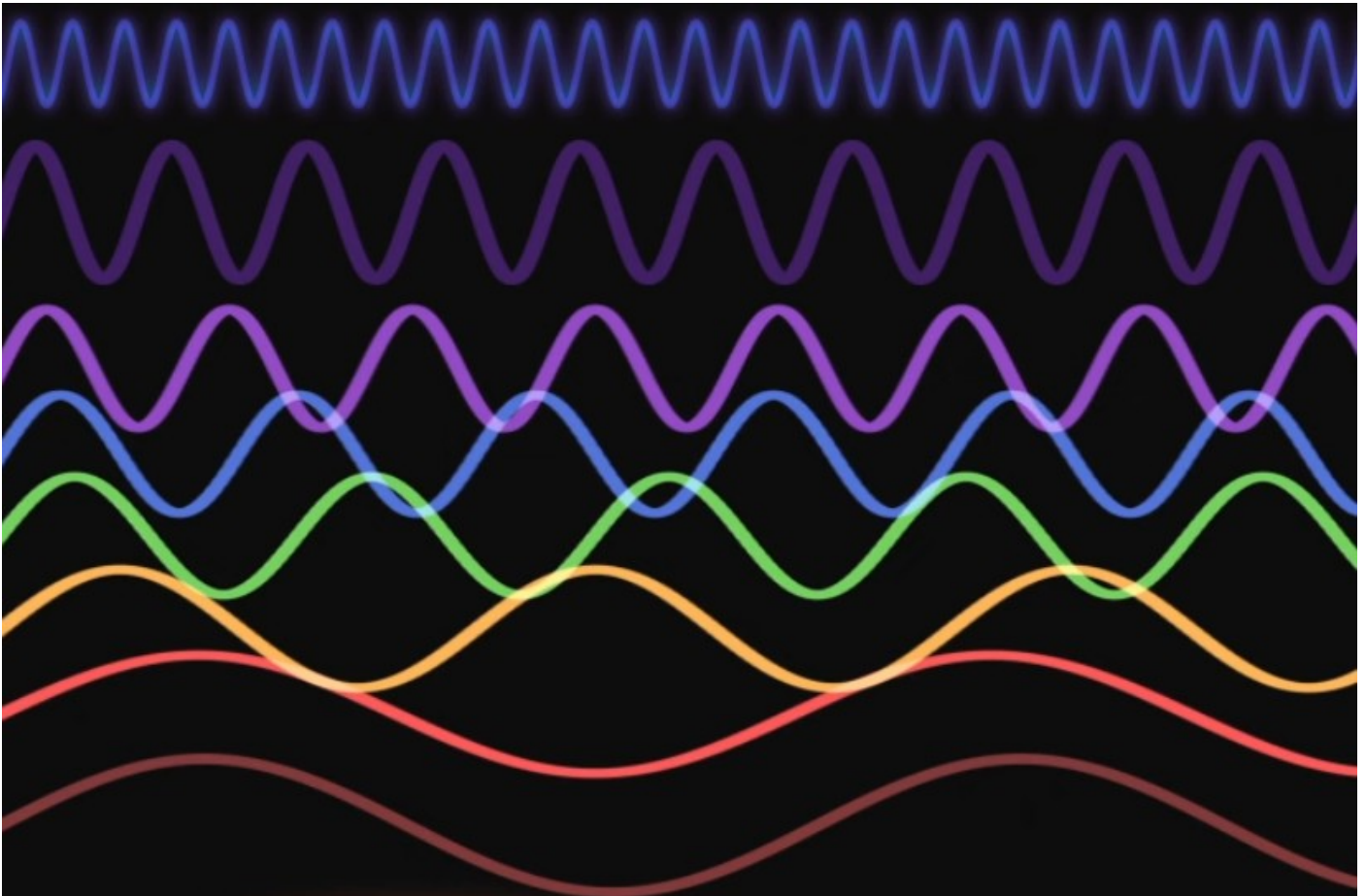


COURS COMPLET : NOTION D'ONDE – Terminale STI2D

Introduction : Qu'est-ce qu'une onde ?

Dans la vie quotidienne, nous rencontrons des ondes : vagues à la surface de l'eau, sons, lumière, ondes sismiques...

Une **onde** est la **propagation d'une perturbation** dans un milieu, sans transport de matière, mais avec **transport d'énergie**.



Objectif du cours :

- Décrire une onde mécanique progressive.
- Utiliser les relations entre distance, durée et célérité.
- Distinguer périodicité spatiale et temporelle.
- Exploiter la relation $v = \lambda \times f$.
- Lire et interpréter un spectre d'amplitude.
- Déterminer la bande passante nécessaire à la transmission d'un signal.

1 ONDE MÉCANIQUE PROGRESSIVE

1.1 Définition et propriétés

Onde mécanique progressive : perturbation qui se propage de proche en proche dans un **milieu matériel** (solide, liquide ou gaz).

Contre-exemple : la lumière (onde électromagnétique) n'a pas besoin de milieu.

Propriétés fondamentales :

- La perturbation se déplace, mais les particules du milieu restent localement (elles vibrent autour de leur position d'équilibre).
- L'onde transporte de l'énergie (cinétique, potentielle élastique...).
- Elle ne transporte **pas** de matière.



Schéma mental :

Une corde tendue : on lève brusquement l'extrémité. Une bosse se déplace. Chaque point de la corde monte puis redescend (vibration transversale), mais ne se déplace pas horizontalement. L'énergie cinétique de la main est transmise de proche en proche.



1.2 Exemples d'ondes mécaniques

Exemple	Milieu	Type de vibration
Houle (vague)	Eau	Transversale (verticale)
Onde le long d'un ressort	Métal	Longitudinale (compression/dilatation)
Onde sonore	Air, eau, solide	Longitudinale (pression)
Onde sismique P	Terre	Longitudinale
Onde sismique S	Terre	Transversale

1.3 Grandeurs associées : célérité, retard

Célérité v (m/s) : C'est la vitesse de propagation de l'onde.

Formule :

$$v = d / \Delta t$$

- **d** : distance parcourue par l'onde (m)
- **Δt** : durée du parcours (s)



Exemple :

Un son parcourt 340 m en 1 s dans l'air à 20°C $\rightarrow v = 340 / 1 = 340$ m/s.

Retard τ : Lorsqu'une onde passe d'un point A à un point B, le retard est le temps mis pour aller de A à B.

$$\tau = AB / v$$



Application : localisation d'une source

Si l'on connaît la célérité v et que l'on mesure le retard τ entre deux capteurs distants de d , on peut déterminer la direction de la source ou la distance.

1.4 Influence du milieu sur la célérité

- La célérité dépend des **propriétés mécaniques** du milieu : élasticité, masse volumique, température, pression...
- **Exemple :**
 - Son dans l'air à 0°C : 330 m/s ; à 20°C : 340 m/s.
 - Son dans l'eau : ~1500 m/s (plus rapide car l'eau est moins compressible).
 - Son dans l'acier : ~5000 m/s.



À retenir :

Pour une onde mécanique, plus le milieu est rigide (et/ou moins dense), plus la célérité est grande (dans une certaine mesure).

2 PROPAGATION, CÉLÉRITÉ ET RETARD : EXPLOITATION

2.1 Relation distance – durée – célérité

À partir de $v = d / \Delta t$, on peut calculer n'importe laquelle des trois grandeurs :

$$d = v \times \Delta t$$

$$\Delta t = d / v$$

2.2 Méthode pour mesurer une distance par écho (sonar, radar, échographie)

Principe : on émet une impulsion, elle se réfléchit sur un obstacle et revient.

Le temps mesuré t correspond à un **aller-retour**.

Donc la distance d entre l'émetteur et l'obstacle est :

$$d = (v \times t) / 2$$

 **Exemple concret :**

Un sonar émet une impulsion ultrasonore. L'écho est reçu après 0,04 s.

$v = 1500$ m/s (dans l'eau de mer).

$d = (1500 \times 0,04) / 2 = 30$ m.



2.3 Mesure de la célérité par deux capteurs

On place deux capteurs distants de L . On mesure le retard τ entre les deux signaux.

Alors $v = L / \tau$.

 **Exemple pratique :**

Deux microphones espacés de 1,70 m donnent un retard de 5 ms (0,005 s) pour un claquement de mains.

$v = 1,70 / 0,005 = 340$ m/s. On retrouve la vitesse du son dans l'air.

3 ONDES PÉRIODIQUES, PÉRIODE, LONGUEUR D'ONDE

3.1 Périodicité temporelle

Une onde est dite **périodique** si le phénomène se répète identique à lui-même au bout d'un certain temps T , appelé **période temporelle** (en secondes).

- **Fréquence** f (Hz) : nombre de répétitions par seconde.
 $f = 1 / T$

🎵 **Exemple :**

Le **la3** du diapason a une fréquence

$f = 440$ Hz. Sa période est $T = 1/440 \approx 0,00227$ s.

3.2 Périodicité spatiale – Longueur d'onde λ

À un instant donné, le motif se répète dans l'espace. La **longueur d'onde** λ (m) est la distance entre deux points identiques consécutifs (par exemple deux crêtes).

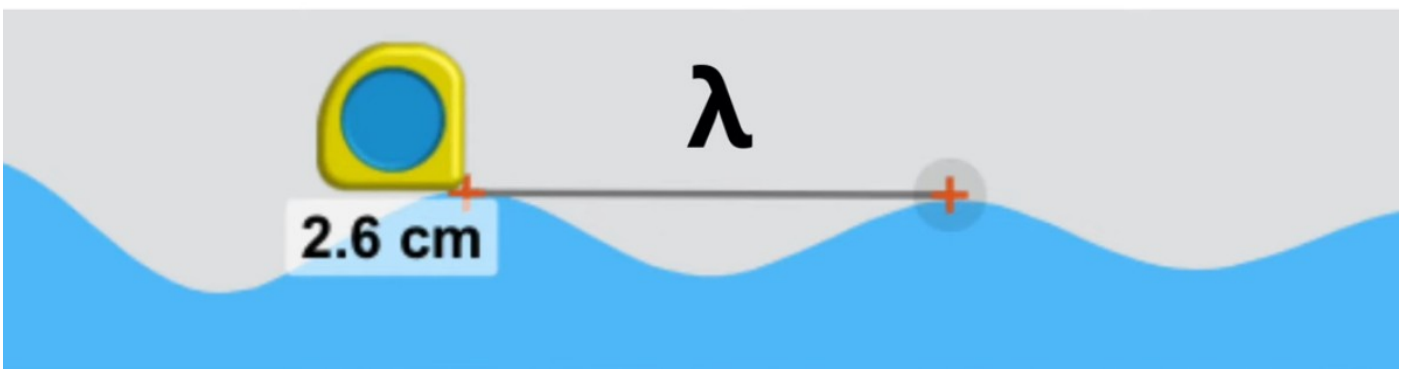
- Dans une représentation spatiale (y en fonction de x), λ est la période spatiale.
- Dans une représentation temporelle (y en fonction de t) pour un point fixe, T est la période temporelle.

📏 **Illustration :**

Imaginez une vague à la surface de l'eau : la distance entre deux crêtes successives est λ .

Si vous restez immobile, le temps entre deux passages de crête est T .

λ se mesure en m



3.3 Relation fondamentale entre v , λ et f

Pendant une période T , l'onde parcourt exactement une longueur d'onde λ .

Donc :

$$v = \lambda / T$$

Comme $f = 1/T$, on obtient les formules les plus utilisées :

$$v = \lambda \times f \quad (1)$$

$$\lambda = v / f \quad (2)$$

$$f = v / \lambda \quad (3)$$



Exemple de calcul 1 :

Une onde sonore de fréquence 500 Hz se propage à 340 m/s.

$$\lambda = 340 / 500 = 0,68 \text{ m (68 cm)}.$$



Exemple de calcul 2 :

Une onde lumineuse ($\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$) dans le vide ($v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

$$f = 3 \times 10^8 / 5 \times 10^{-7} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}.$$

3.4 Détermination de T , λ et v à partir de représentations

À partir d'un oscillogramme (temporel)

- On mesure la durée de plusieurs périodes sur l'écran.
- On divise par le nombre de périodes pour obtenir T .
- On calcule $f = 1/T$.
- Si on connaît v , on en déduit $\lambda = v / f$.

À partir d'une photographie (spatiale)

- On mesure la distance entre plusieurs crêtes.
- On divise par le nombre d'intervalles pour obtenir λ .
- Si on connaît v , on calcule $f = v / \lambda$.



Exemple :

Sur un oscilloscope, 4 périodes occupent 8 divisions, base de temps = 0,5 ms/div.

$$T = (8/4) \times 0,5 = 1 \text{ ms} = 0,001 \text{ s}.$$

$$f = 1 / 0,001 = 1000 \text{ Hz}.$$

Dans l'air ($v = 340 \text{ m/s}$), $\lambda = 340 / 1000 = 0,34 \text{ m}$.

4 SPECTRE D'AMPLITUDE D'UN SIGNAL PÉRIODIQUE

4.1 Décomposition en série de Fourier (principe)

Tout signal périodique, même non sinusoïdal (carré, triangulaire, dent de scie...), peut être décomposé en une **somme de signaux sinusoïdaux** :

- Une **composante continue** (valeur moyenne du signal, fréquence 0 Hz).
- Un **fondamental** : sinusoïde de fréquence f_1 (la plus basse fréquence non nulle).
- Des **harmoniques** : sinusoïdes de fréquences $f_n = n \times f_1$ ($n = 2, 3, 4, \dots$).



Image sonore :

Un son de violon = fondamental (la note jouée) + harmoniques (qui donnent le timbre).

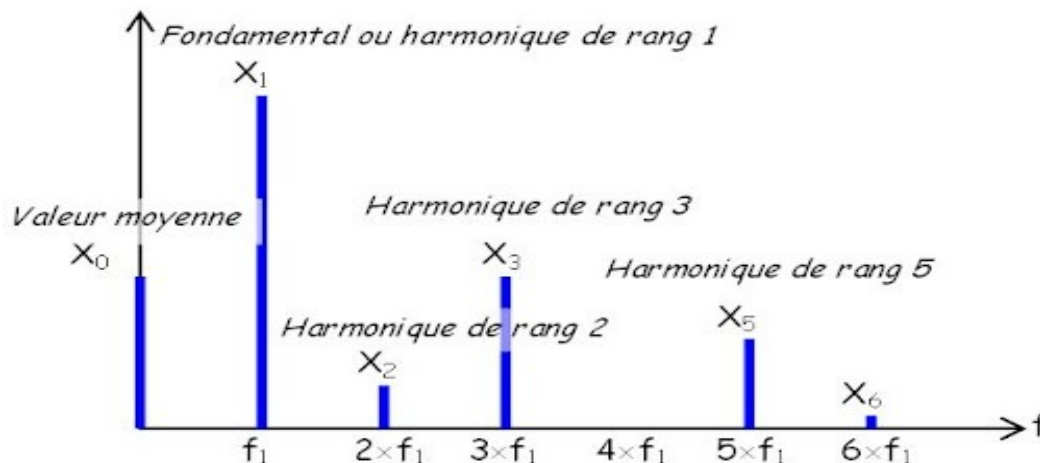
4.2 Spectre d'amplitude

C'est un diagramme en bâtons (ou courbe) qui donne l'**amplitude** (ou la valeur crête, ou la valeur efficace) de chaque composante fréquentielle.

- **Abscisse** : fréquence (Hz, kHz...)
- **Ordonnée** : amplitude (V, Pa, unité arbitraire...)

Lecture du spectre :

1. Repérer la fréquence la plus basse non nulle $\rightarrow f_1$ (fondamental).
2. Les autres pics sont les harmoniques : $2f_1, 3f_1, \dots$
3. Le pic à 0 Hz (s'il existe) donne la **composante continue** (valeur moyenne du signal).



4.3 Exemple d'exploitation

Soit un spectre avec les raies suivantes :

Fréquence (Hz)	Amplitude (V)
0	2
100	5
200	2
300	1

- **Fondamental** : 100 Hz (amplitude 5 V).
- **Harmoniques** : 200 Hz (rang 2, amplitude 2 V) ; 300 Hz (rang 3, amplitude 1 V).
- **Composante continue** : 2 V (valeur moyenne du signal).

4.4 Détermination du rang d'un harmonique

$$n = f_n / f_1$$

Exemple : $f_n = 300$ Hz,

$f_1 = 100$ Hz $\rightarrow n = 3$.

4.5 Capacité numérique – simulation avec Python (idée)

On peut simuler la propagation d'une onde périodique en programmant une boucle qui calcule

$$y(x, t) = A \cos(2\pi(x/\lambda - f t)).$$

Pour un spectre, on additionne les contributions des harmoniques.

5 TRANSMISSION D'UN SIGNAL ET BANDE PASSANTE

5.1 Pourquoi a-t-on besoin d'une bande passante ?

Un signal périodique réel (parole, musique, donnée numérique) contient un fondamental et des harmoniques.

Pour **transmettre** ce signal sans le déformer, le canal de transmission (câble, fibre, air, amplificateur) doit laisser passer **toutes les fréquences utiles** du signal.

- Si on coupe les harmoniques élevées, le signal s'arrondit (perte des détails rapides).
- Si on coupe les basses fréquences, la composante continue est perdue (décalage du niveau moyen).

5.2 Bande passante – définition

La **bande passante** d'un système est l'intervalle de fréquences qu'il peut transmettre avec une atténuation raisonnable (généralement à -3 dB).

Exemples :

- Téléphone : 300 Hz – 3,4 kHz
- Audio Hi-Fi : 20 Hz – 20 kHz
- Télévision analogique : quelques MHz
- Fibre optique : plusieurs GHz

5.3 Comment choisir la bande passante nécessaire ?

Si le signal a une fréquence fondamentale f_1 et que l'on souhaite conserver ses harmoniques jusqu'au rang N , la bande passante doit s'étendre au moins de f_1 à $N \times f_1$ (voire à partir de 0 Hz si la composante continue est importante).

Exemple :

Un signal carré de 1 kHz a des harmoniques impairs : 3 kHz, 5 kHz, 7 kHz, 9 kHz, ...

Pour transmettre ce signal avec une qualité correcte (5 premiers harmoniques), il faut une bande passante allant jusqu'à 9 kHz.

5.4 Lien avec l'échantillonnage (théorème de Nyquist)

Pour numériser un signal analogique, il faut le **sampler** à une fréquence d'échantillonnage f_e au moins double de la fréquence maximale contenue dans le signal :

$$f_e > 2 \times f_{\max}$$

Si cette condition n'est pas respectée, il y a **repliement de spectre** (alias), ce qui déforme le signal numérisé.

Exemple pratique :

Fréquence maximale audible = 20 kHz $\rightarrow f_e > 40$ kHz. Le CD audio utilise 44,1 kHz.

6 EXERCICES CORRIGÉS TYPES (pas à pas)



Exercice 1 – Calcul de célérité et distance

Énoncé : Un orage éclate à 2 km d'un observateur. La lumière parvient presque instantanément, mais le son met 5,88 s à arriver.

1. Calculer la célérité du son dans l'air ce jour-là.
2. En déduire la température (on donne $v = 331 + 0,6 \times \theta$).



Solution :

1. $v = d / t = 2000 / 5,88 \approx 340,1 \text{ m/s}$.
2. $340,1 = 331 + 0,6\theta \rightarrow 0,6\theta = 9,1 \rightarrow \theta \approx 15,2^\circ\text{C}$.



Exercice 2 – Période, longueur d'onde et célérité

Énoncé : Un vibreur produit des ondes sinusoïdales sur une corde. On mesure la distance entre 5 crêtes consécutives : 2,4 m. La fréquence est de 25 Hz.

1. Quelle est la longueur d'onde ?
2. Quelle est la célérité de l'onde ?



Solution :

1. 5 crêtes consécutives $\rightarrow$ 4 intervalles $\rightarrow \lambda = 2,4 / 4 = 0,6 \text{ m}$.
2. $v = \lambda \times f = 0,6 \times 25 = 15 \text{ m/s}$.

Exercice 3 – Spectre et harmoniques

Énoncé : Le spectre d'un signal périodique montre des raies à 50 Hz, 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz.

1. Quelle est la fréquence fondamentale ?
2. La composante continue existe-t-elle ?
3. Quels sont les rangs des harmoniques ?

Solution :

1. Le fondamental est le pgcd des fréquences : 50 Hz (car 50,100,150,200 sont multiples de 50).
2. On ne voit pas de raie à 0 Hz, donc pas de composante continue (signal alternatif symétrique).
3. Rangs : 1 (50 Hz), 2 (100 Hz), 3 (150 Hz), 4 (200 Hz).

Exercice 4 – Transmission et bande passante

Énoncé : Un signal carré de fréquence 500 Hz doit être transmis avec ses harmoniques jusqu'au rang 7 inclus.

1. Quelle est la fréquence du 7e harmonique ?
2. Quelle bande passante minimale est nécessaire ?

Solution :

1. Un signal carré ne contient que des harmoniques impairs.

Le 7e harmonique impairs correspond à $n = 13$?

Attention : 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13.

Le 7e harmonique (**rang 13**) a pour fréquence **$13 \times 500 = 6500$ Hz.**

2. La bande passante doit aller jusqu'à 6500 Hz (au moins).



CONCLUSION – SYNTHÈSE À RETENIR

Notion	Formule / Définition clé
Célérité	$v = d / t$
Retard	$\tau = d / v$
Distance par écho	$d = v \times t / 2$
Période / Fréquence	$\tau = 1/f, f = 1/T$
Longueur d'onde	$\lambda = v / f$
Relation fondamentale	$v = \lambda \times f$
Décomposition de Fourier	Signal = continu + fondamental + harmoniques
Fréquence harmonique	$f_n = n \times f_1$
Bande passante nécessaire	Jusqu'à $N \times f_1$
Théorème de Nyquist	$f_e > 2 f_{max}$