Chapitre 1

LES CARACTÉRISTIQUES DES ONDES PROGRESSIVES

Qu'est-ce qu'une onde progressive ? Disons pour faire simple que c'est la propagation, de proche en proche, de la perturbation d'une grandeur physique. Par exemple, une onde à la surface de l'eau correspond à la propagation d'une variation de la hauteur de l'eau par rapport à l'équilibre. On distingue deux grands types d'ondes progressives : les ondes élastiques (ou mécaniques) qui se propagent dans la matière et les ondes électromagnétiques qui peuvent se propager dans le vide.

1. Caractéristiques des ondes progressives

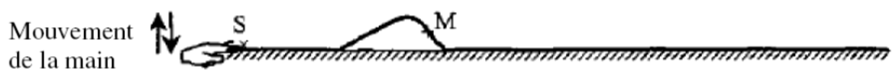
L'une des premières compétences exigibles du programme est : « Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation », ça tombe bien, c'est l'objet de la méthode 1.

MÉTHODE 1 : Relier les grandeurs physiques associées à une onde progressive

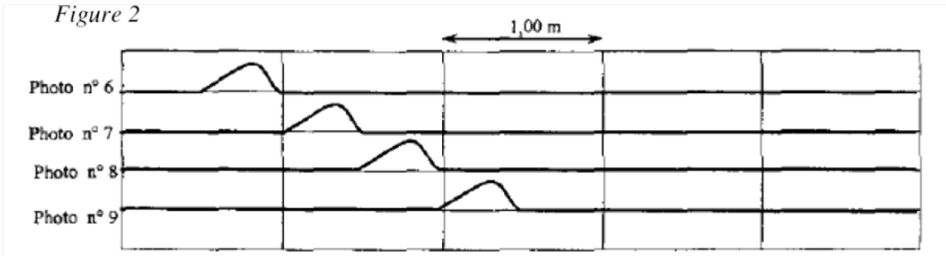
■ **Principe**
On dispose de la représentation du milieu matériel à des instants différents (ça s'appelle une chronophotographie). On peut ainsi déterminer la distance parcourue par l'onde pendant une durée connue puis la célérité de l'onde ou encore le retard avec lequel l'onde atteint un point par rapport à un autre. L'exemple qui suit est extrait d'un exercice de bac (Asie 2005). À traiter sans calculatrice !

■ **Exemple :** *Une très longue corde élastique inextensible est disposée horizontalement sur le sol. Un opérateur crée une perturbation en imprimant une brève secousse verticale à l'extrémité S de la corde (figure 1).*

Figure 1

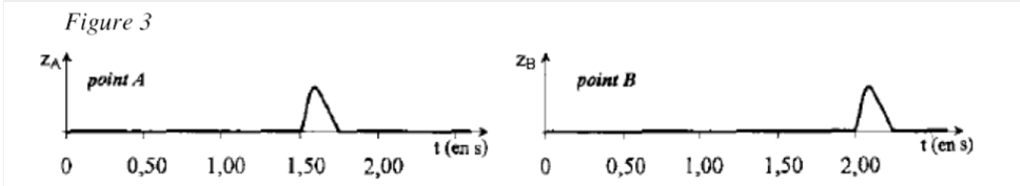


1. *La propagation de l'onde le long de la corde est étudiée par chronophotographie (figure 2).*
L'intervalle de temps séparant deux photos consécutives est $\Delta t = 0{,}25$ s.



a. *Calculer la célérité de l'onde.*
b. *Pendant quelle durée un point de la corde est-il en mouvement ?*

2. *L'évolution au cours du temps des altitudes* z_A *et* z_B *de deux points A et B de la corde est l'objet de la figure 3. L'instant* $t_0 = 0$ s *correspond au début du mouvement de S.*



a. *Lequel de ces deux points est touché le premier par la perturbation ?*
b. *Quel retard le point touché en second présente-t-il dans son mouvement par rapport au point touché en premier ?*
c. *Quelle est la valeur de la distance séparant les points A et B ?*
d. *Un troisième point C commence son mouvement à l'instant* $t_C = 0,50$ s. *Préciser sa position par rapport à A.*

1.a. On choisit un axe horizontal (Sx) d'origine S.
Entre les photos n° 6 et n° 8 le front de l'onde parcourt la distance d = 1,00 m pendant la durée $\Delta t = 0,50$ s.
La célérité de l'onde est : $v = \dfrac{d}{\Delta t} = 2,0$ m.s^{-1}.
b. On note θ la durée pendant laquelle un point de la corde est en mouvement et L la longueur de la perturbation.
Graphiquement on détermine : L = 0,50 m.
On en déduit : $\theta = \dfrac{L}{v} = 0,25$ s.
2.a. Le point A est touché au bout de 1,50 s et le point B au bout de 2,00 s donc A est touché en premier.
b. Le retard τ que présente le point B dans son mouvement par rapport au point A est $\tau = t_B - t_A$ avec $t_A = 1,50$ s et $t_B = 2,00$ s donc $\tau = 0,50$ s.
c. Pendant la durée $t_B - t_A$, le front de l'onde parcourt la distance $x_B - x_A$ séparant les points A et B, à la célérité v = 2,0 m.s^{-1}.
On a donc : $x_B - x_A = v(t_B - t_A) = 1,0$ m.
d. Pendant la durée $t_A - t_C$, le front de l'onde parcourt la distance $x_A - x_C$ séparant les points C et A, à la célérité v = 2,0 m.s^{-1}.
On a donc : $x_A - x_C = v(t_A - t_C) = 2,0$ m.
Le point C est situé 2,0 m avant le point A.

MÉTHODE 2 : Déterminer la période spatiale et la période temporelle d'une onde progressive périodique

■ Rappels

- Une onde progressive périodique est caractérisée par une double périodicité : une périodicité spatiale et une périodicité temporelle.
- Une onde progressive sinusoïdale est un cas particulier d'onde progressive périodique.

■ Principe

La périodicité spatiale est caractérisée par sa période spatiale, jusque-là tout va bien. Elle s'obtient en analysant un document expérimental représentant le milieu matériel **à un instant donné**. La période spatiale est la longueur séparant deux points consécutifs du milieu possédant les mêmes caractéristiques (par exemple une élongation maximale dans le cas d'une onde se propageant le long d'une corde).
La périodicité temporelle est caractérisée par sa période temporelle, on s'en doutait un peu. Elle s'obtient en analysant un document expérimental donnant l'évolution temporelle de la perturbation **pour un point donné** du milieu matériel. La période temporelle est la durée séparant deux instants consécutifs où le point a les mêmes caractéristiques (par exemple une élongation maximale dans le cas d'une onde se propageant le long d'une corde).
Dans le cas particulier d'une **onde périodique sinusoïdale**, la période spatiale est appelée **longueur d'onde** et la période temporelle est appelée **période**.

■ **Exemple** : *Une onde progressive périodique se propage le long d'une corde. La figure 1 représente l'allure très schématique de la corde à un instant donné (vous n'avez sans doute jamais vu de corde ayant cette allure, c'est vrai que ça n'est pas courant mais faites un effort d'imagination).*

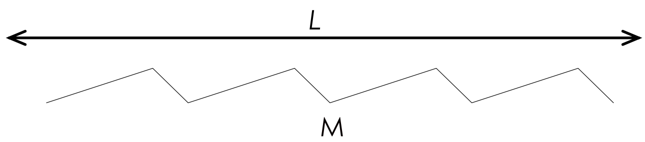


Figure 1

La longueur de la corde est L = 2,0 m.
Le point M est situé au milieu de la corde.
La figure 2 représente les variations de l'élongation y du point M de la corde en fonction du temps.

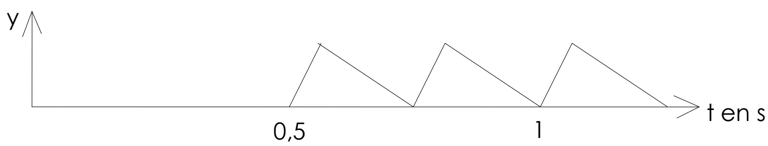


Figure 2

Déterminer la période spatiale λ et la période temporelle T de l'onde.

La période spatiale λ est obtenue à partir de la figure 1. Elle est égale au quart de la longueur de la corde : $\lambda = \frac{L}{4} = 0,50$ m.
La période temporelle T est obtenue à partir de la figure 2. Il y a deux périodes en 0,5 s : T = 0,25 s.

■ **Erreurs classiques**
- Attention à ne pas confondre les deux périodicités donc les deux figures. On observe l'allure du milieu matériel à un instant donné pour la périodicité spatiale. On suit le mouvement d'un point du milieu matériel pour la périodicité temporelle.
- Une onde progressive périodique n'est pas forcément sinusoïdale.
- Un document représentant le milieu matériel dans lequel se propage l'onde n'est pas forcément à l'échelle 1.

MÉTHODE 3 : Déterminer la célérité d'une onde progressive périodique

■ **Principe**
L'onde est périodique et on connaît sa période spatiale et sa période temporelle. La célérité de l'onde est le rapport de la période spatiale par la période temporelle. En particulier si l'onde est sinusoïdale, la célérité est le rapport de la longueur d'onde par la période.

■ **Exemple :** *On reprend l'exemple de la méthode 2.*
Déterminer la célérité de l'onde progressive.

La période spatiale est $\lambda = 0,50$ m.
La période temporelle est T = 0,25 s.
La célérité de l'onde est $v = \frac{\lambda}{T} = 2,0$ m.s^{-1}.

2. Les ondes progressives dans la matière

Il s'agit d'ondes élastiques (ou mécaniques). Le programme propose d'étudier les exemples suivants : la houle, les ondes sismiques, les ondes sonores et ultrasonores. Bon, il suffit de demander …

MÉTHODE 4 : Extraire et exploiter des informations sur la houle

■ **Principe**
La houle est un exemple de propagation d'une onde progressive périodique. Vous pouvez donc appliquer les relations vues pour ce type d'ondes. L'exemple qui suit est extrait d'un exercice de bac (Polynésie 2003).

■ **Exemple :** *Le texte ci-dessous est composé d'extraits d'un cours d'océanographie, que l'on peut découvrir sur le site web de l'IFREMER (édité par son laboratoire de physique des océans) : « Les ondes dans l'océan ».*
En océanographie, les ondes de surface se matérialisent par une déformation de l'interface entre l'océan et l'atmosphère. Les particules d'eau mises en mouvement au passage d'une onde se déplacent avec un petit mouvement qui leur est propre, mais restent en moyenne à la même position.
La houle est formée par le vent : c'est un phénomène périodique, se présentant sous l'aspect de vagues parallèles avec une longueur d'onde λ de l'ordre de 100 m au large, où la profondeur moyenne de l'océan est d'environ 4000 m.
On peut classer les ondes de surface, en fonction de leurs caractéristiques et de celles du milieu de propagation, en « ondes courtes » et en « ondes longues ».
- Ondes courtes : lorsque la longueur d'onde λ est faible par rapport à la profondeur locale h de l'océan (au moins $\lambda < 0,5\ h$).
Leur célérité v est définie par : $v = \sqrt{\dfrac{g\lambda}{2\pi}}$.
- Ondes longues : lorsque la longueur d'onde λ est très grande par rapport à la profondeur h de l'océan ($\lambda > 10\ h$), les ondes sont appelées ondes longues.
Leur célérité v est définie par : $v = \sqrt{gh}$.
(g est l'intensité du champ de pesanteur terrestre ; on prendra $g = 10\ m.s^{-2}$).

1. *Au large (avec $h_1 = 4000$ m), la houle est-elle classée en ondes courtes ou longues ?*
Évaluer la célérité v_1 d'une houle de longueur d'onde $\lambda_1 = 80$ m, ainsi que la période T de ses vagues.
2. *En arrivant près d'une côte sablonneuse (profondeur d'eau $h_2 = 3,0$ m), la longueur d'onde de la houle devient grande par rapport à la profondeur, elle rentre donc dans la catégorie des ondes longues. Sachant que sa période T ne varie pas, évaluer alors sa nouvelle célérité v_2, ainsi que sa nouvelle longueur d'onde λ_2.*

1. Au large $h_1 = 4000$ m et $\lambda_1 = 80$ m donc $\lambda_1 < 0,5\ h_1$: il s'agit d'ondes courtes.
La célérité de ces ondes est : $v_1 = \sqrt{\dfrac{g\lambda_1}{2\pi}} = 11\ m.s^{-1}$.
La période s'écrit : $T = \dfrac{\lambda_1}{v_1} = \dfrac{\lambda_1}{\sqrt{\dfrac{g\lambda_1}{2\pi}}} = \sqrt{\dfrac{2\pi\lambda_1}{g}} = 7,1$ s.
2. Près de la côte $\lambda_2 \gg h_2$: il s'agit maintenant d'ondes longues.
La célérité de ces ondes est : $v_2 = \sqrt{gh_2} = 5,5\ m.s^{-1}$.
Sachant que la période T est constante, la longueur d'onde s'écrit :
$\lambda_2 = v_2T = \sqrt{gh_2}\ \sqrt{\dfrac{2\pi\lambda_1}{g}} = \sqrt{2\pi h_2\lambda_1} = 39$ m.

MÉTHODE 5 : Extraire et exploiter des informations sur les séismes

■ Principe

Un séisme est également un exemple de propagation d'une onde périodique. Vous pouvez donc appliquer les relations vues pour ce type d'ondes. L'exemple qui suit est extrait d'un exercice de bac (Nouvelle-Calédonie 2006). À traiter sans calculatrice !

■ Exemple : *Un séisme dans le Jura*

Les données et les informations utilisées dans cet exercice sont issues des sites Internet du Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS) et de l'École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST) : http://renass.u-strasbg.fr et http://eost.u-strasbg.fr

Le 23 février 2004, un séisme de magnitude 5,1 selon le Réseau National de Surveillance Sismique s'est produit à Roulans (dans le département du Doubs), à 20 km au nord-est de Besançon. Ce séisme a été ressenti très largement en dehors du Doubs dans tout l'est de la France, en Suisse et dans le nord-ouest de l'Allemagne, sans faire de victimes ni de dégâts significatifs.

Lors d'un séisme, des ondes traversent la Terre. Elles se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres. Leur vitesse de propagation et leur amplitude sont modifiées par les structures géologiques traversées. C'est pourquoi les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

Parmi les ondes sismiques, on distingue :

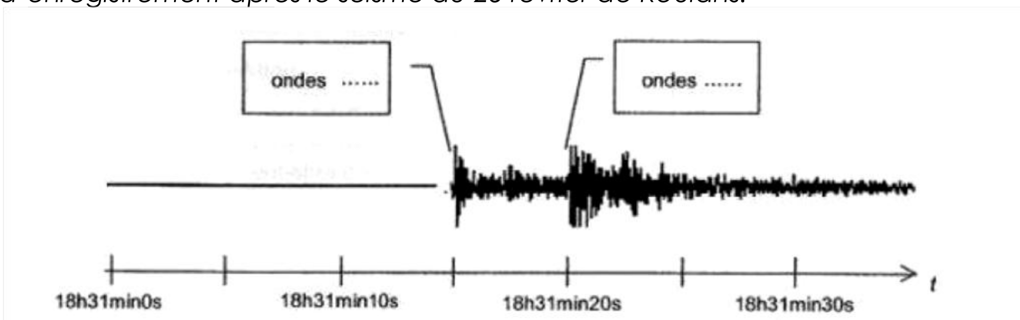
- les ondes P ou ondes primaires, qui sont des ondes de compression ou ondes longitudinales ; leur célérité v_p vaut en moyenne $v_p = 6,0$ km.s^{-1} ;

- les ondes S ou ondes secondaires, appelées également ondes de cisaillement ou ondes transversales ; leur célérité v_s vaut en moyenne $v_s = 3,5$ km.s^{-1}.

Étude d'un sismogramme

L'écart entre les dates d'arrivée des ondes P et S renseigne, connaissant la célérité des ondes, sur l'éloignement du lieu où le séisme s'est produit.

Le document 1 présente un extrait de sismogramme relevé dans une station d'enregistrement après le séisme du 23 février de Roulans.



Document 1

On notera t_0 la date correspondant au début du séisme, date à laquelle les ondes P et S sont générées simultanément.

***1.** En utilisant des informations du texte ci-dessus, associer, sur le document 1, à chaque signal observé sur le sismographe, le type d'ondes détectées (ondes S ou ondes P). Justifier.*
***2.** Relever sur ce document les dates d'arrivée des ondes S et P à la station d'enregistrement notées respectivement t_s et t_p.*
***3.** Soit d la distance qui sépare la station d'enregistrement du lieu où le séisme s'est produit.*
Exprimer la célérité notée v_S des ondes S en fonction de la distance d parcourue et des dates t_s et t_0.
Faire de même pour les ondes P avec les dates t_P et t_0.
***4.** Retrouver l'expression de la distance d :*

$$d = \frac{v_S v_P}{v_P - v_S}(t_S - t_P)$$

***5.** En déduire la valeur numérique de cette distance d.*

1. Les ondes P et S sont émises simultanément à la date t_0 depuis l'épicentre.
Les ondes P ont une célérité moyenne (v_P = 6,0 km.s^{-1}) supérieure à celle des ondes S (v_s = 3,5 km.s^{-1}).
Le sismographe détecte donc les ondes P avant les ondes S (à noter sur le document 1).
2. Les dates d'arrivée sont lues sur le document 1 :
ondes P : t_P = 18 h 31 min 15 s ; ondes S : t_S = 18 h 31 min 20 s.
3. La célérité des ondes S est : $v_S = \frac{d}{(t_S - t_0)}$, celle des ondes P : $v_P = \frac{d}{(t_P - t_0)}$.
4. De la question 3. on peut déduire les deux expressions suivantes :

$$\frac{d}{v_S} = t_S - t_0 \text{ et } \frac{d}{v_P} = t_P - t_0$$

On soustrait ces deux égalités membre à membre :
$\frac{d}{v_S} - \frac{d}{v_P} = t_S - t_P$ d'où $d(\frac{1}{v_S} - \frac{1}{v_P}) = t_S - t_P$.

Finalement $d = \frac{v_S v_P}{v_P - v_S}(t_S - t_P)$

5. Pour cette question rappelons que la calculatrice est interdite.

$$d = \frac{3{,}5\times10^3 \times 6{,}0\times10^3}{\left(6{,}0\times10^3 - 3{,}5\times10^3\right)}\times5 = \frac{3{,}5\times6{,}0\times10^6}{2{,}5\times10^3}\times5 = 7{,}0\times6{,}0\times10^3 = 42\times10^3 \text{ m} = 42 \text{ km.}$$

MÉTHODE 6 : Comprendre le principe de l'échelle de Richter

■ Rappels

Quelques rappels concernant la fonction logarithme décimal :

$\log(a) + \log(b) = \log(ab)$ et $\log(a) - \log(b) = \log(\frac{a}{b})$.

■ Principe

Le principe est simple à condition que la fonction logarithme décimal et sa fonction réciproque n'aient aucun secret pour vous.
Connaissant l'amplitude A d'un séisme, on obtient sa magnitude M par la relation $M = \log(\frac{A}{A_0})$. Réciproquement, connaissant la magnitude M, on obtient l'amplitude A par la relation $A = A_0 \times 10^M$.

■ **Exemple** : *La magnitude mesure l'énergie dégagée lors d'un séisme. L'échelle de Richter, la plus connue, indique la magnitude calculée à partir de la mesure de l'amplitude du mouvement du sol. Cette amplitude est mesurée sur l'enregistrement obtenu par un sismomètre à 100 kilomètres de l'épicentre.*
Créée en 1935 par Richter et Gutenberg, l'échelle de Richter est une échelle logarithmique et ouverte (c'est-à-dire sans limite supérieure). Toutefois, les séismes de magnitude 9 sont exceptionnels : le plus fort jamais mesuré a eu lieu au Chili le 22 mai 1960 avec une valeur de 9,5.
La magnitude d'un séisme, sur l'échelle de Richter, est évaluée à partir de l'amplitude A des ondes sismiques enregistrées sur un sismographe par la formule $M = \log(A) - \log(A_0)$, où A_0 désigne l'amplitude d'un séisme de référence.
1. *On a mesuré l'amplitude d'un séisme et on a obtenu $A = 3{,}7 \times 10^6\, A_0$.*
Calculer la magnitude de ce séisme sur l'échelle de Richter.
2. *Un séisme de magnitude 8,8 s'est produit, le 11 mars 2011, sur la côte Pacifique du Tōhoku au Japon.*
Déterminer le rapport $\frac{A}{A_0}$.
3. *À quelle variation d'amplitude correspond une variation de magnitude de 0,3 sur l'échelle de Richter ?*

1. $M = \log(A) - \log(A_0) = \log(\frac{A}{A_0}) = 6{,}6$.

2. $\log(\frac{A}{A_0}) = 8{,}8$ donc $\frac{A}{A_0} = 10^{8,8} = 6{,}3 \times 10^8$.

3. Posons $M = \log(A) - \log(A_0)$ et $M + 0{,}3 = \log(A') - \log(A_0)$.
On cherche A' en fonction de A.
En soustrayant les deux relations, on obtient : $0{,}3 = \log(A') - \log(A) = \log(\frac{A'}{A})$

Donc $\frac{A'}{A} = 10^{0,3} = 2{,}0$.
Lorsque la magnitude augmente de 0,3 sur l'échelle de Richter, l'amplitude du séisme double.

■ Erreur classique

L'amplitude A et la magnitude M ne sont pas des grandeurs proportionnelles : un séisme de magnitude 6,0 n'a pas une amplitude deux fois plus grande qu'un séisme de magnitude 3,0 mais 1000 fois plus grande.