

Caractéristiques des ondes

Physique - Terminale S

Thierry CHAUVET



Mexican Wave

Transverse Wave Example



On / Off

- 1 -

Définition

Onde mécanique

Une onde mécanique est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu élastique, sans transport de matière, mais avec transport d'énergie.



Une onde se propage, à partir de la source, dans toutes les directions qui lui sont offertes.

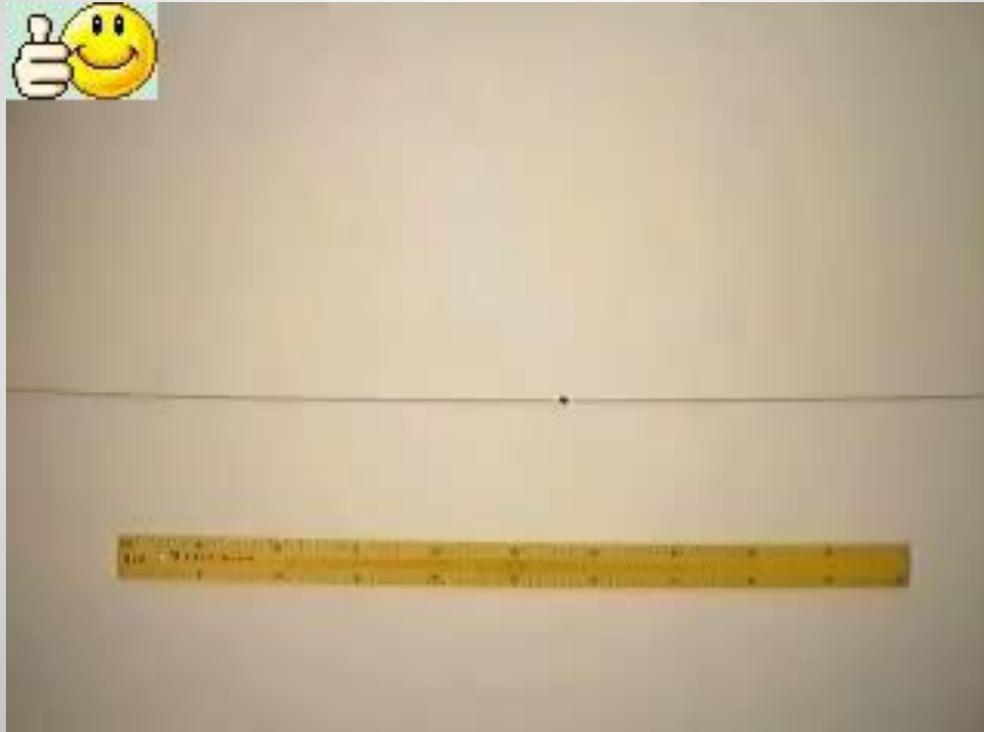
- 2 -

Exemples d'ondes mécaniques

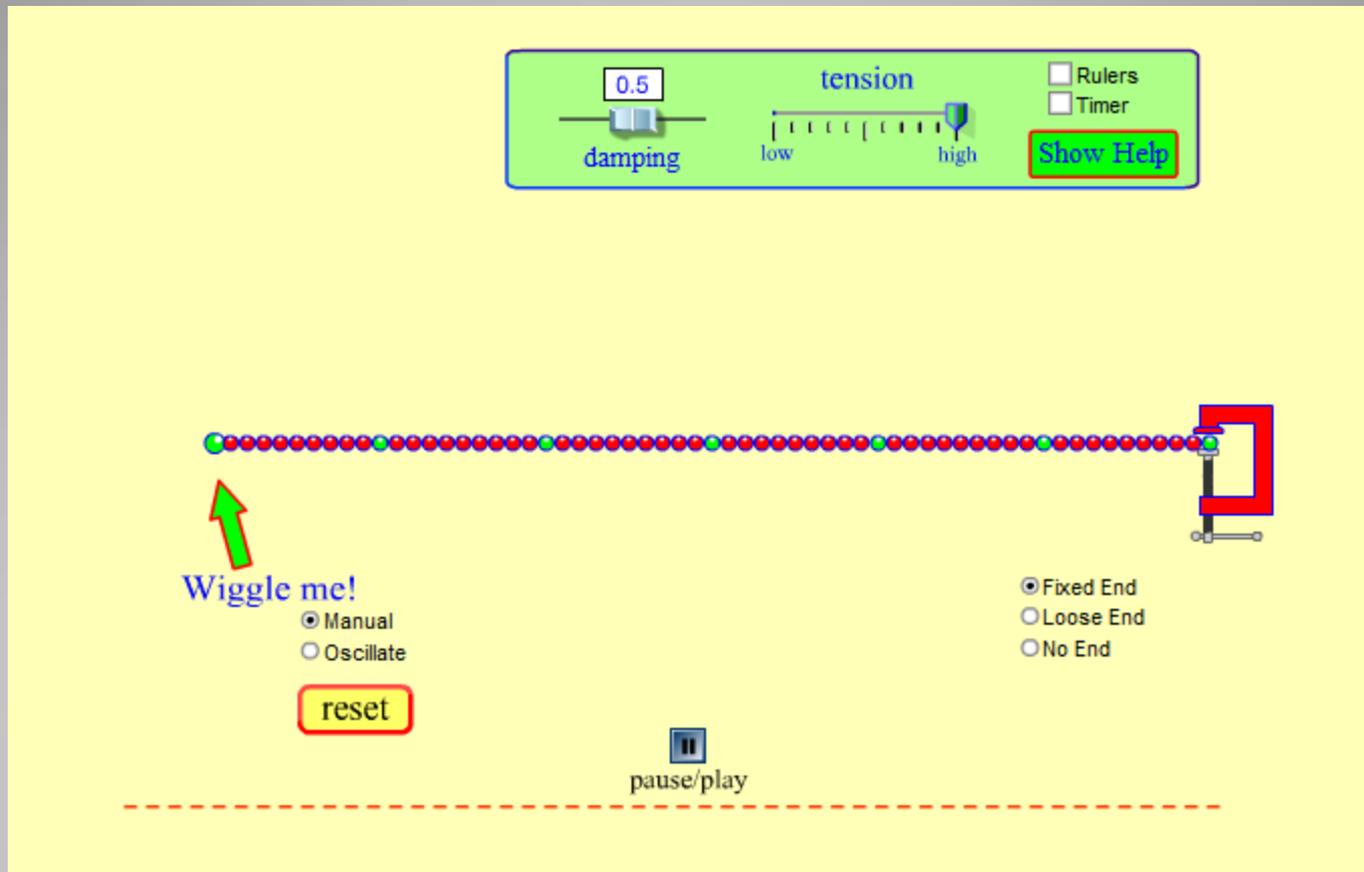
Onde à une dimension

Onde transversale

On secoue verticalement l'origine S d'une corde tendue horizontalement.

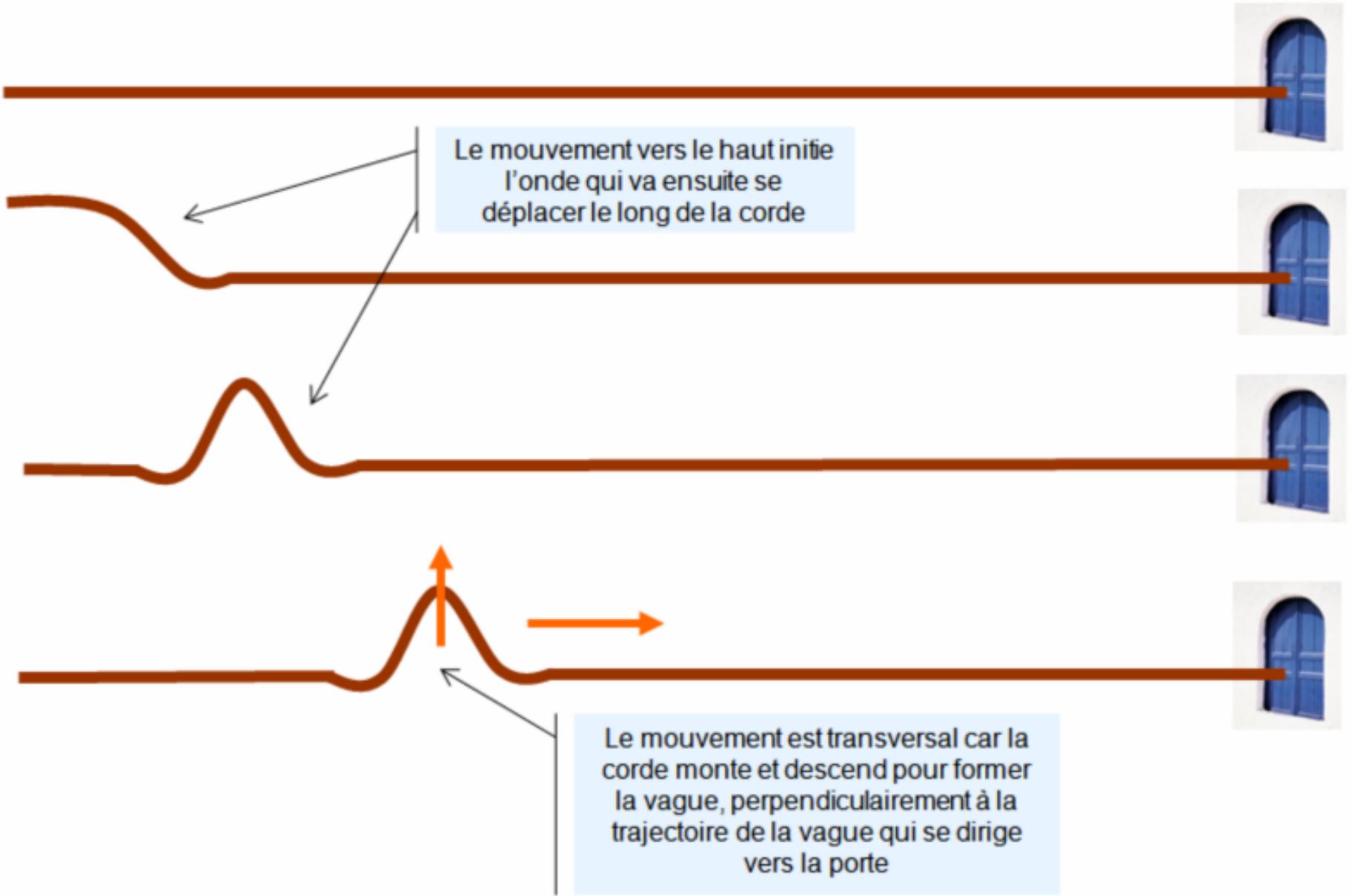


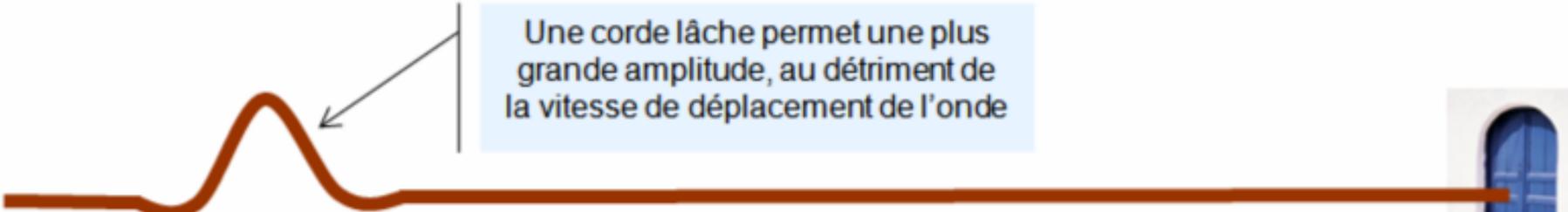
La perturbation de courte durée (ou signal) se propage le long de la corde.



Chaque point de la corde se soulève verticalement puis reprend sa position initiale alors que le signal se déplace horizontalement le long de la corde.

Une onde transversale provoque une perturbation dont la direction est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.





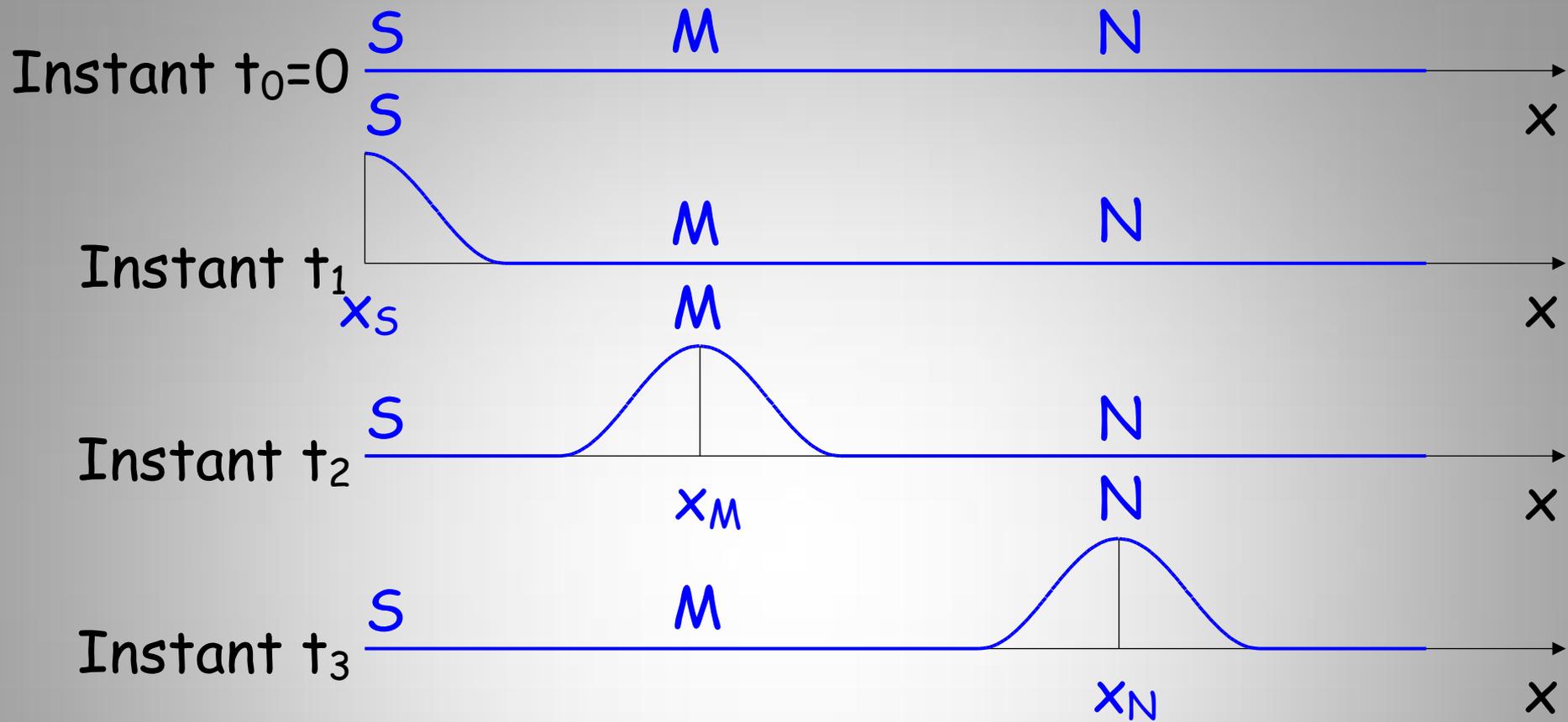
Une corde lâche permet une plus grande amplitude, au détriment de la vitesse de déplacement de l'onde



Une corde tendue limite l'amplitude de l'onde, mais lui confère une vitesse supérieure



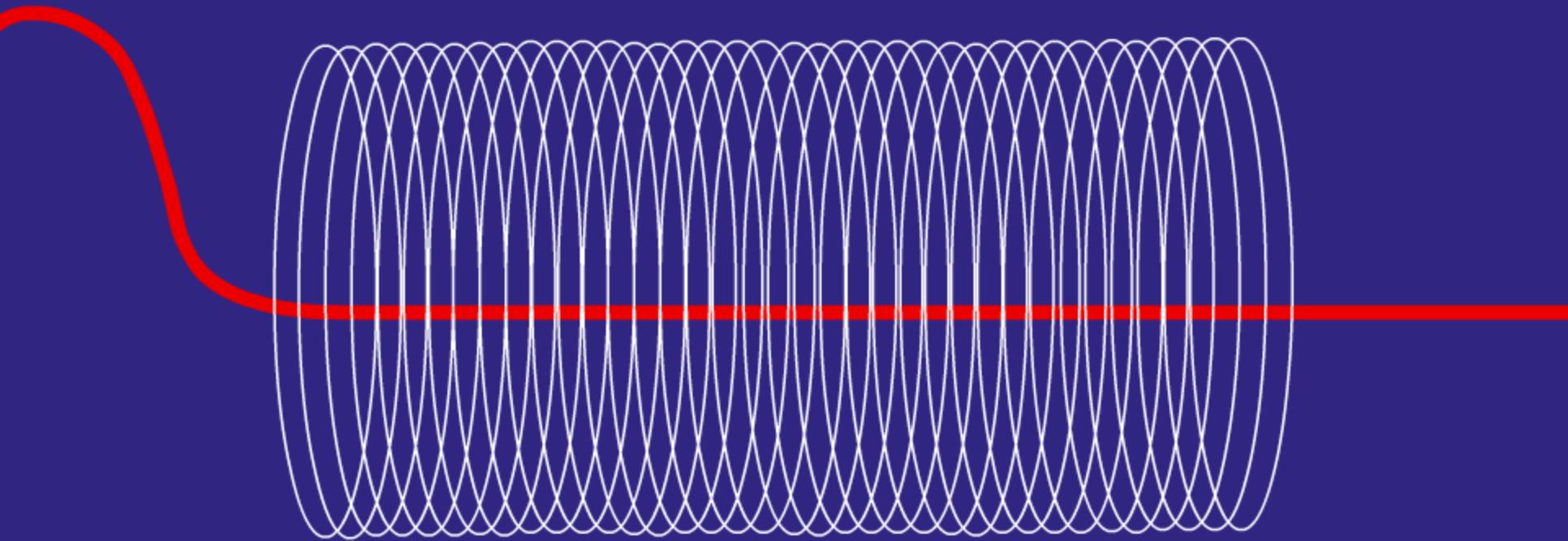
En accordant une guitare, on tend plus ou moins une des cordes pour augmenter ou baisser la fréquence de l'onde qui parcourra la corde quand elle sera frappée



Vitesse de propagation de l'onde:

$$V = \frac{x_M - x_S}{t_2 - t_1} = \frac{x_N - x_M}{t_3 - t_2}$$

A la place de la corde on peut utiliser un ressort pour observer des ondes transversales à une dimension.



Slinky Spring



On / Off

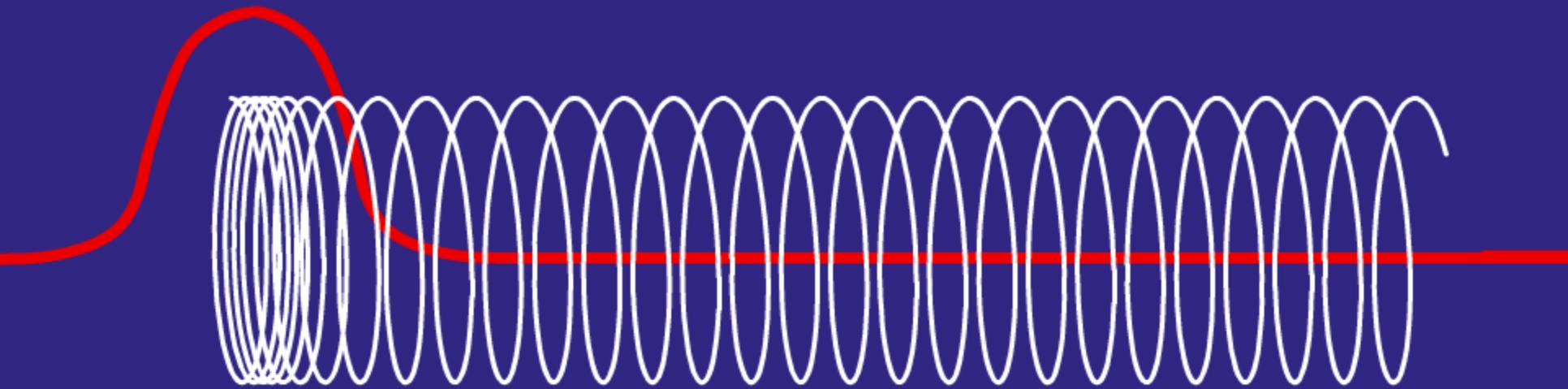
Onde à une dimension

Onde longitudinale

On pince quelques spires proches de l'origine S d'un ressort tendu horizontalement.



La perturbation de courte durée (ou signal) se propage le long du ressort.



Slinky Spring



Chaque point P du ressort se déplace horizontalement puis reprend sa place. Le signal se déplace également horizontalement le long du ressort.

Une onde longitudinale provoque une perturbation dont la direction est parallèle à la direction de propagation de l'onde.



La compression initiale se propage le long du ressort

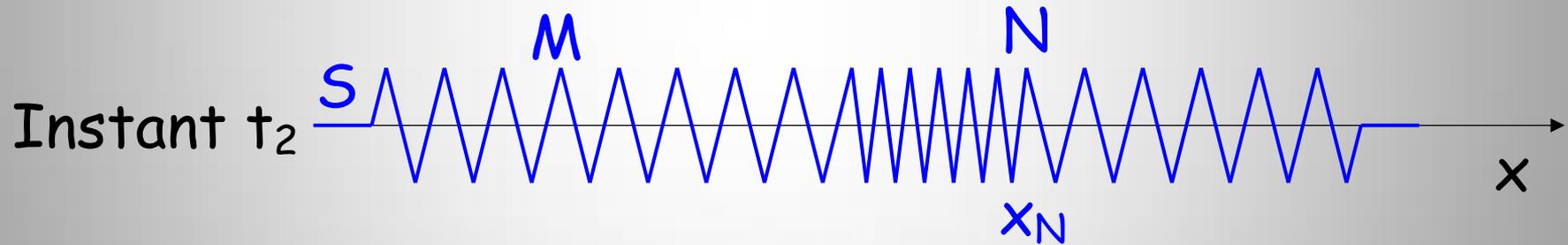
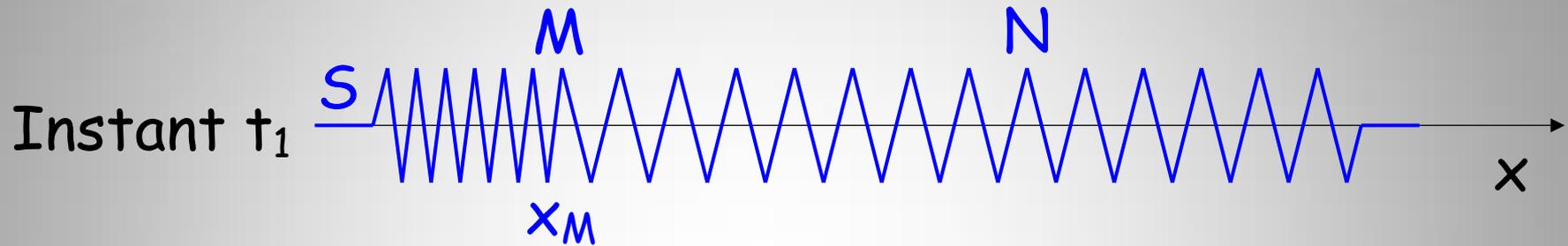
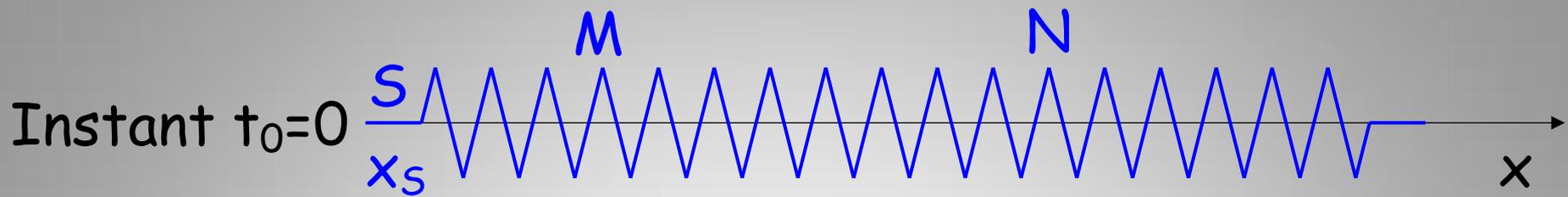


Les zones de moindre compression sont dites zones de raréfaction

Zone de compression

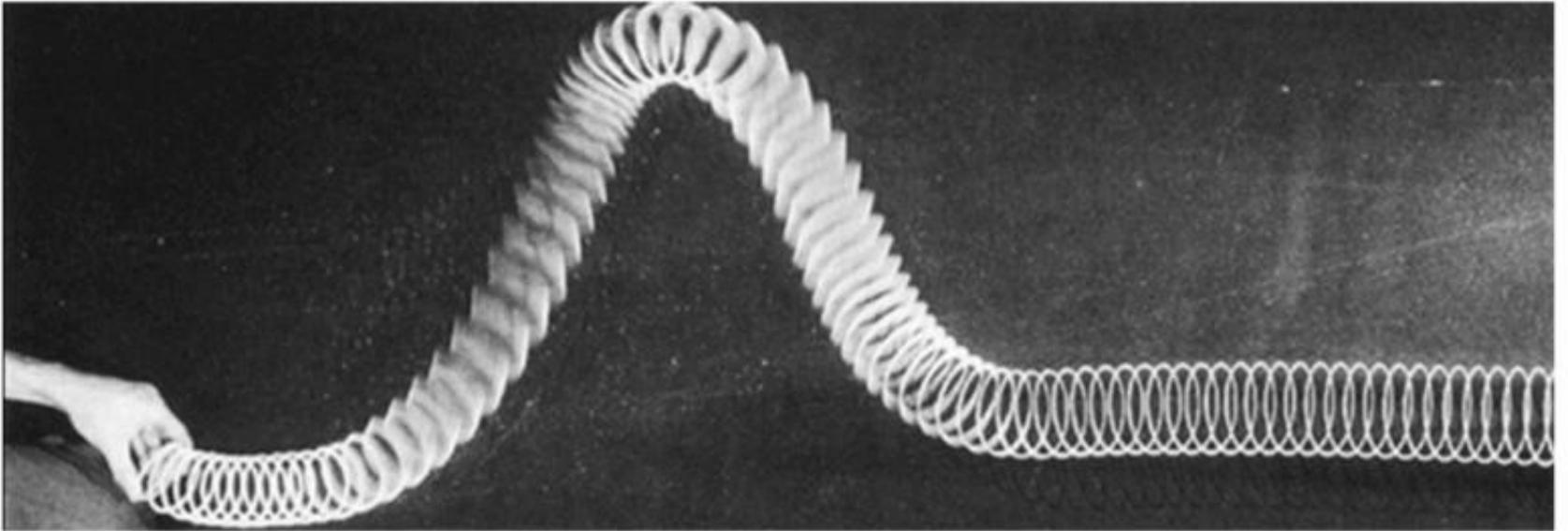


Le mouvement est longitudinal car le ressort se comprime dans la direction de propagation de la vague



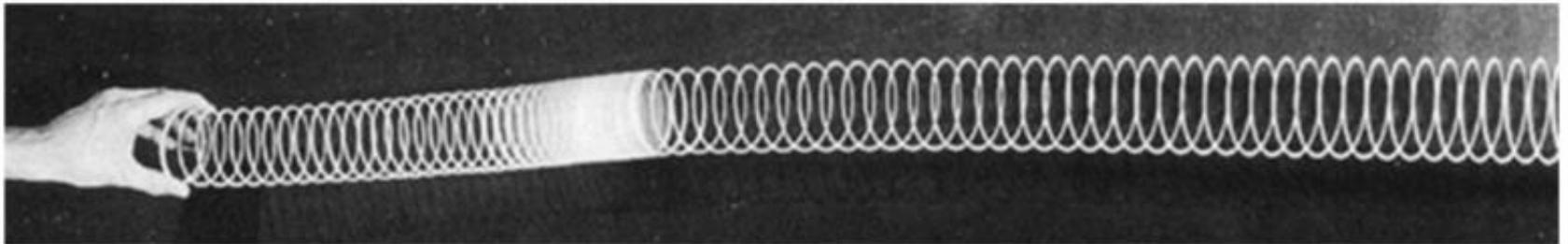
Vitesse de propagation de l'onde:

$$V = \frac{x_M - x_S}{t_1 - t_0} = \frac{x_N - x_M}{t_2 - t_1}$$



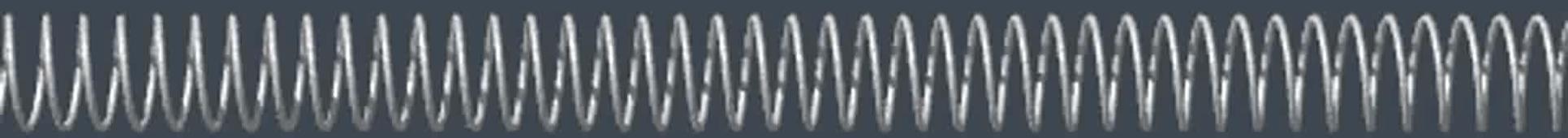
Si le mouvement qui génère l'onde est lui-même perpendiculaire à la trajectoire que l'on souhaite donnée à l'onde, alors cette onde sera transversale si le milieu le permet...

...si le mouvement initial est transversal, il donnera naissance à une onde transversale





Transverse Wave



Longitudinal Wave

Onde à deux dimensions

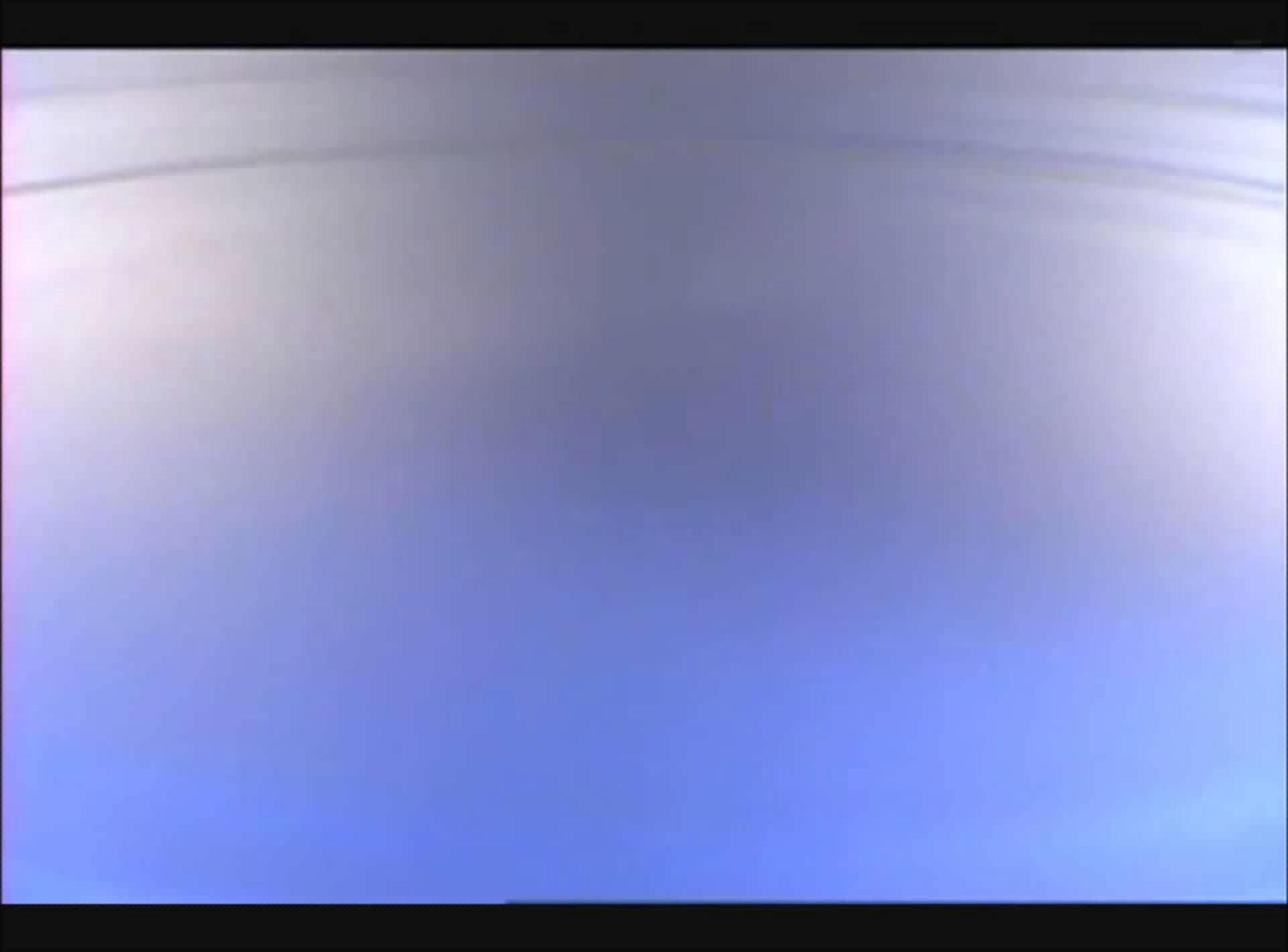
Goutte d'eau

On laisse tomber une goutte d'eau en un point S de la surface de l'eau contenue dans une cuve à ondes.



Des rides circulaires prennent naissance, puis se propagent dans les deux dimensions du plan horizontal.

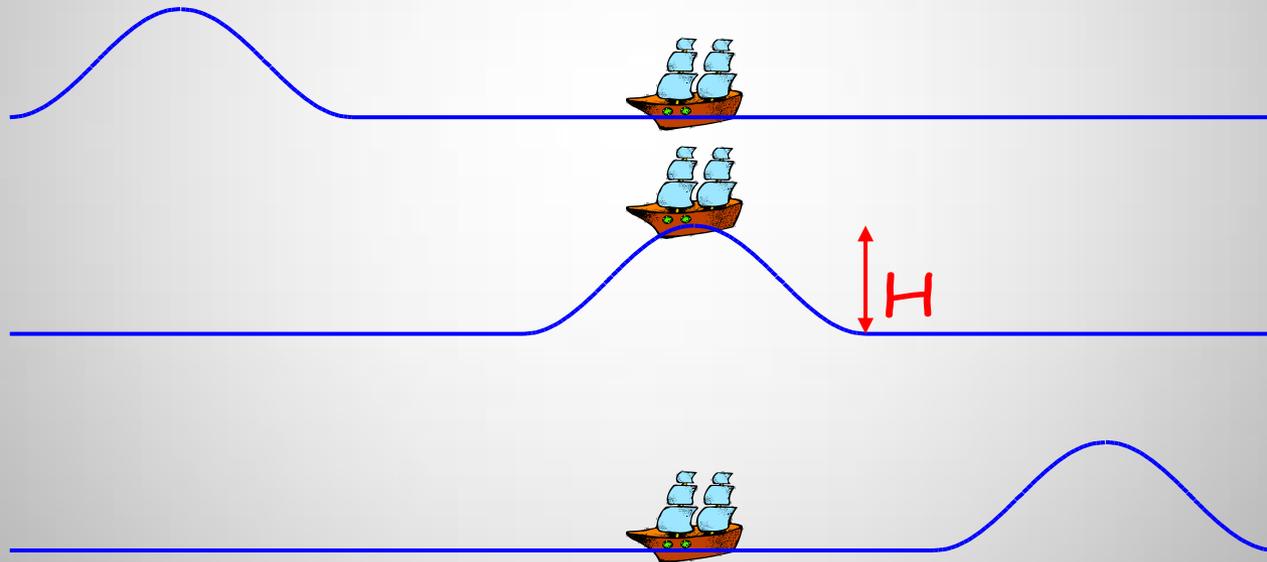
L'onde est transversale



Onde à deux dimensions

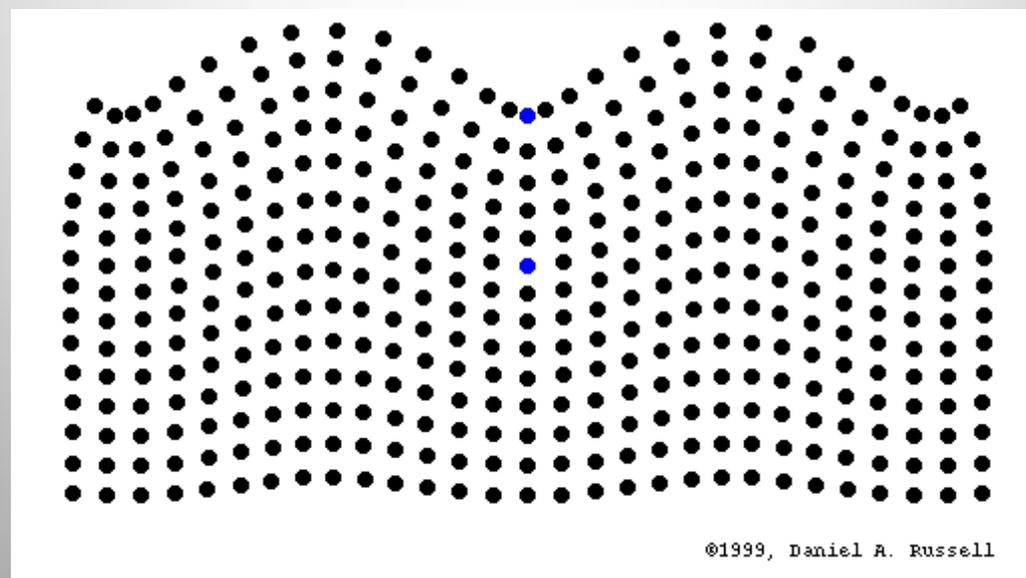
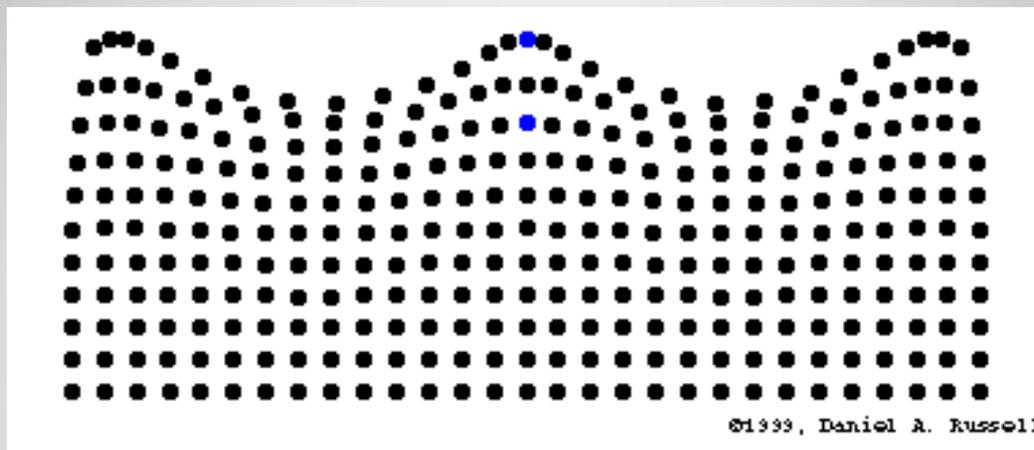
Les vagues

Au passage d'une vague, un bateau s'élève d'une hauteur H et voit donc son énergie potentielle de pesanteur augmenter de $\Delta E_p = m \cdot g \cdot H$.



Cette énergie lui a été fournie par la vague, mais le bateau est resté à la même abscisse.

Il y a transport d'énergie mais pas de transport de matière.

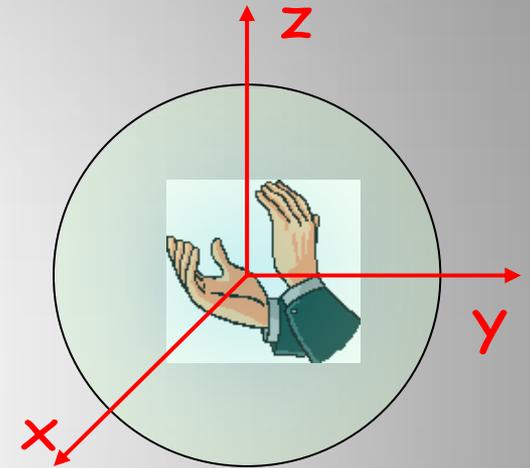


Onde à trois dimensions

Le son

Une onde sonore se propage dans les trois dimensions de l'espace.

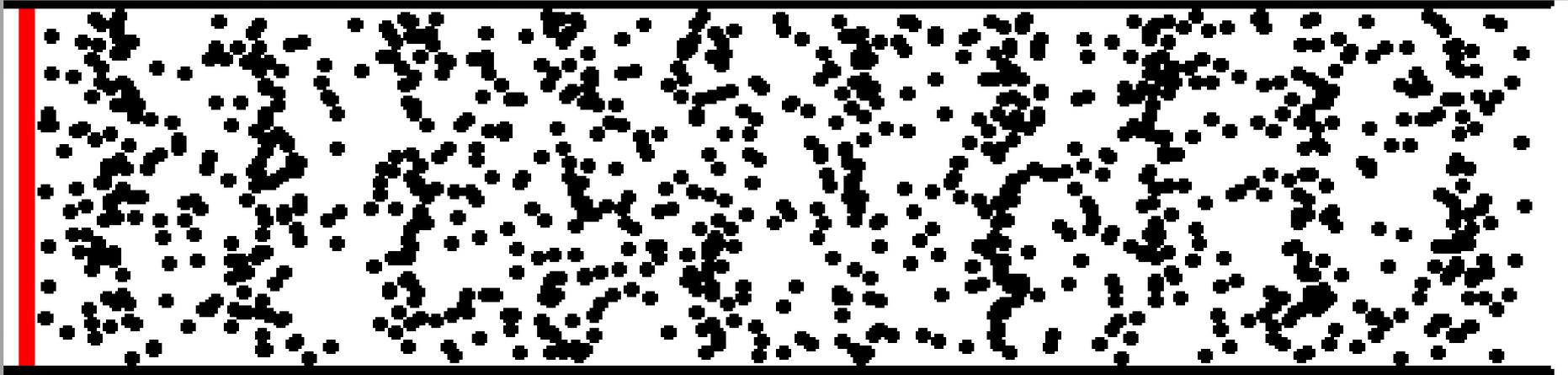
Chaque point vibre longitudinalement dans la direction de propagation du signal.



L'air, milieu de propagation ne se déplace pas. Il n'y a pas de transport de matière. L'air est un milieu élastique.

Le son dans l'air est une onde.

La perturbation, qui est une succession de compression et de détente dans l'air, se propage de proche en proche horizontalement, les molécules constituant l'air effectuent un va-et-vient horizontalement.



Dilatation

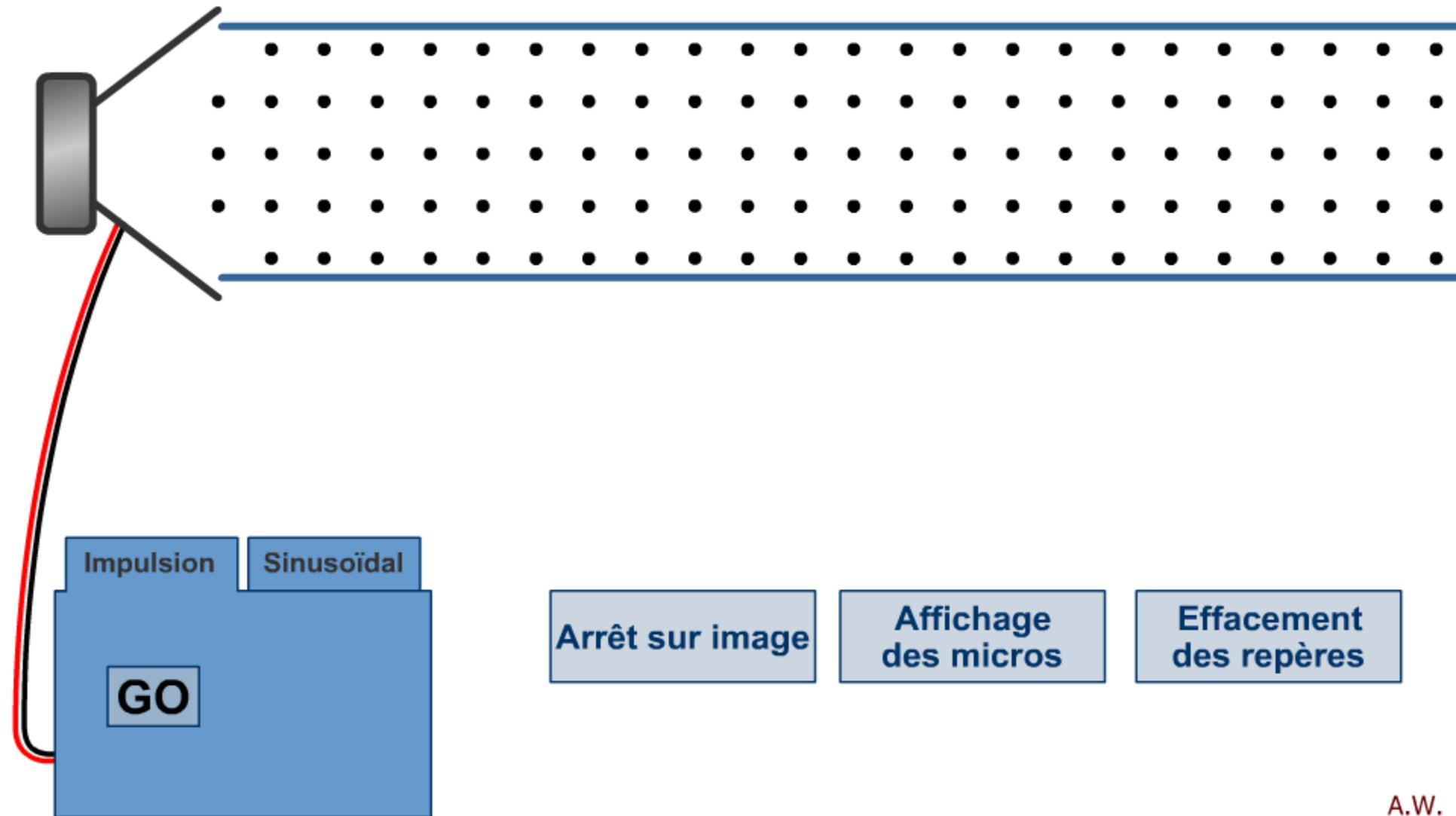
Compression

Air

Sens de propagation



Propagation d'une onde sonore plane



- 3 -

Croisement de deux ondes

Deux ondes peuvent se croiser sans se perturber.

CROISEMENT DE DEUX ONDES



- Impulsion vers le haut
- Pas d'impulsion
- Impulsion vers de bas

- Impulsion vers le haut
- Pas d'impulsion
- Impulsion vers de bas



- 4 -

Célérité d'une onde

Définition

On appelle célérité la vitesse de propagation de l'onde, pour la distinguer de la vitesse de déplacement d'un corps.

$$v = \frac{d}{\Delta t}$$

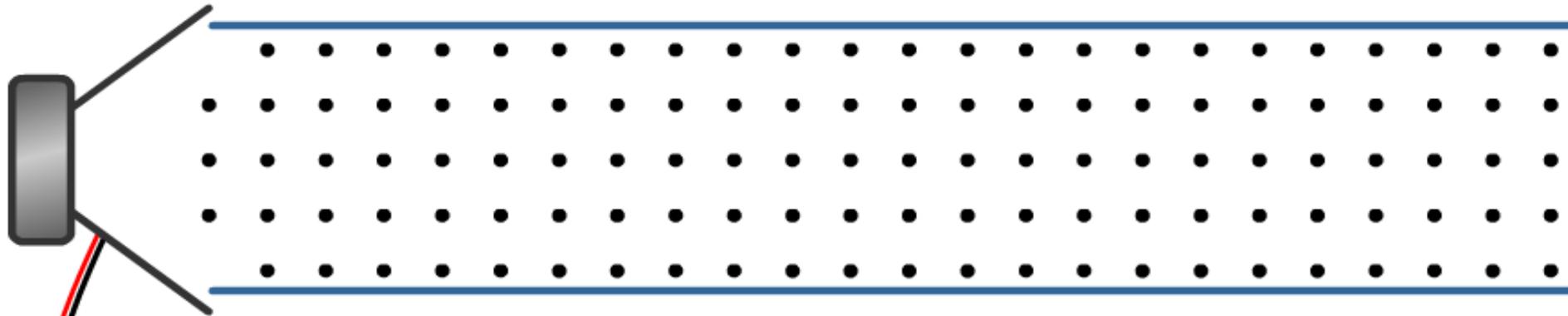
v : Célérité en mètre par seconde ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

d : Distance parcourue en mètre (m)

Δt : Durée de propagation en seconde (s)

Dans un milieu homogène et isotrope, la célérité d'une onde est constante.

Propagation d'une onde sonore plane



Impulsion

Sinusoidal

GO

Arrêt sur image

Affichage
des micros

Effacement
des repères

Propriétés

Plus le milieu est rigide (*résistance que ce milieu oppose lorsqu'on cherche à le déformer*), plus la célérité est grande.

Plus l'inertie du milieu (*résistance que ce milieu ou ce système oppose lorsqu'on cherche à le mettre en mouvement*) est grande, plus la célérité diminue.

Une onde se propage plus vite dans les liquides que dans les gaz et fréquemment plus vite dans les solides que dans les liquides.

- 5 -

Onde progressive à une
dimension

Définition

On appelle onde mécanique progressive à une dimension le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu à une dimension sans propagation de matière.

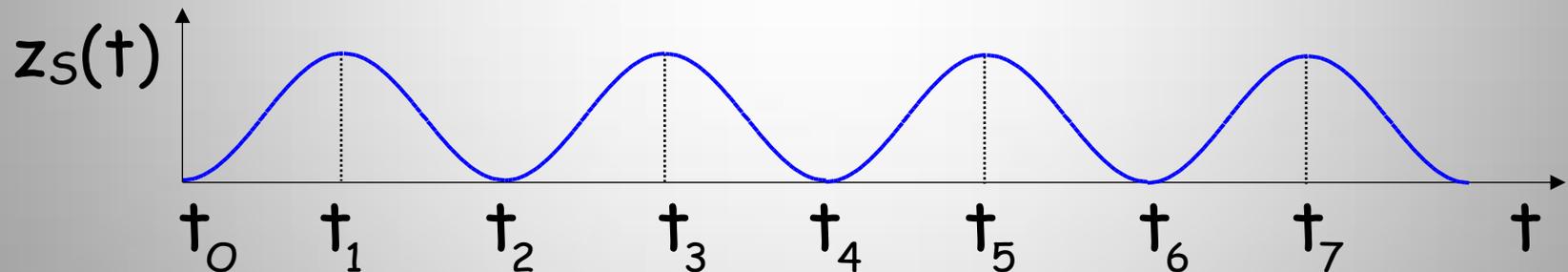
Exemple: onde transversale se propageant sur une corde ou d'une onde longitudinale se propageant sur un ressort.

Mouvement de la source

On considère la propagation d'une perturbation le long d'une corde horizontale.

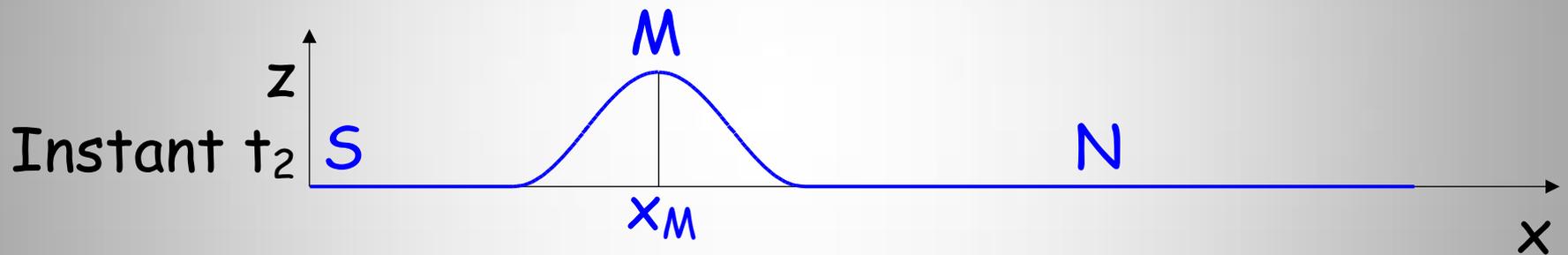
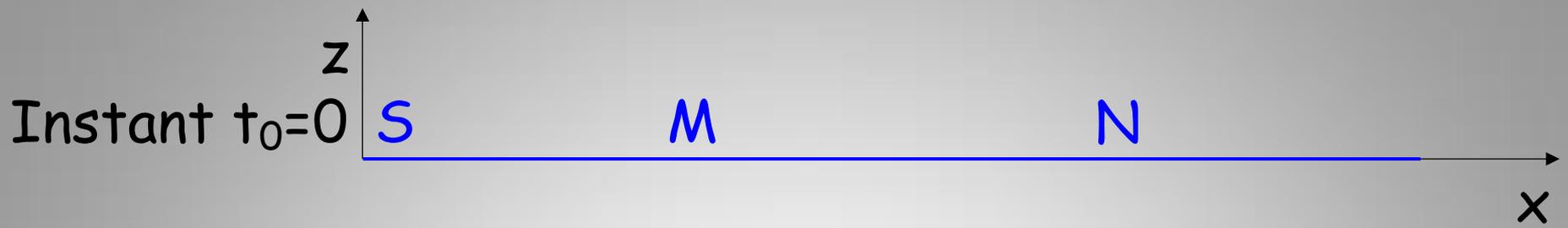
La déformation commence à l'instant initial $t=0$.

Le mouvement de la source située au point S est un mouvement rectiligne vertical selon l'axe des ordonnées z .

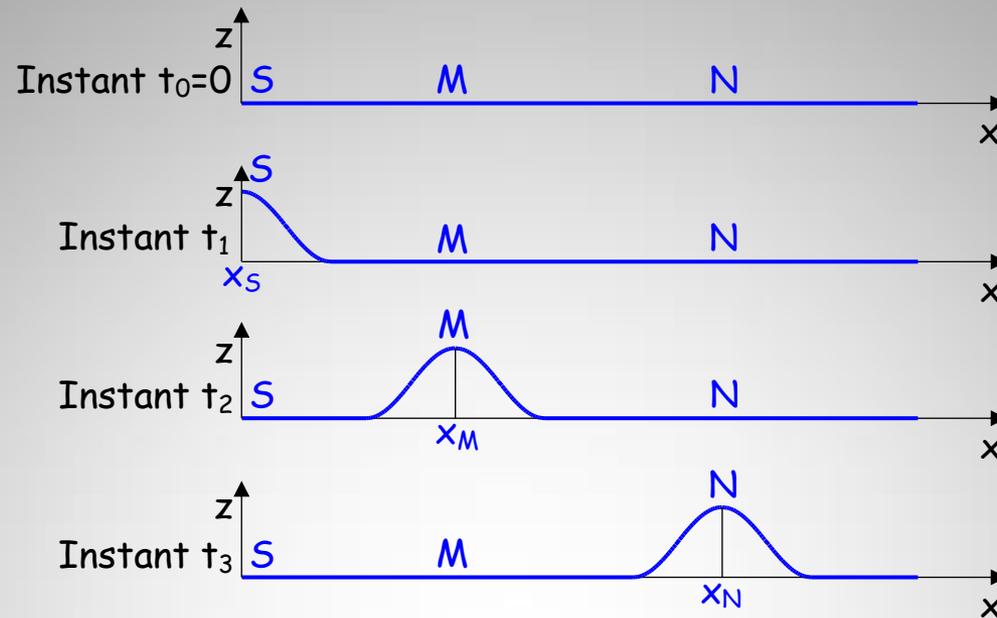


On notera $z_S(t)$ la fonction mathématique représentant la position de la source en fonction du temps t .

Mouvement d'un point du milieu matériel



La déformation créée en S se propage de proche en proche dans le milieu matériel avec la célérité V .



Le mouvement d'un point M situé à la distance x_M de la source est le même que celui de la source avec un retard:

$$\tau = \frac{x_M - x_S}{V}$$

Si le mouvement de la source est $z_S(t)$, le mouvement du point M est: $z_M(t) = z_S(t-\tau)$.

- 6 -

Atténuation des ondes

Si une partie de l'énergie transportée par l'onde se transforme en chaleur, on dit que l'onde s'amortit.

Dans le cas d'une onde sur l'eau, l'énergie se répartit sur des rides circulaires de rayon croissant. La hauteur des vagues diminue. Cette atténuation de l'amplitude de la perturbation existe, dans les milieux à deux ou trois dimensions, même si l'énergie transportée par la perturbation se conserve. Cette atténuation n'est pas due à un amortissement.

Souvent l'atténuation due à la géométrie des milieux à deux ou trois dimensions et l'amortissement dû aux frottements des particules coexistent.

- 7 -

Phénomènes vibratoires périodiques

Définition

Un phénomène est périodique lorsqu'il se reproduit identique à lui-même au bout d'un intervalle de temps T , appelé période.

La période T s'exprime en seconde (s).

La fréquence f d'un phénomène périodique est égale au nombre de période par seconde.

La fréquence s'exprime en hertz (Hz) ou en seconde⁻¹ (s⁻¹).

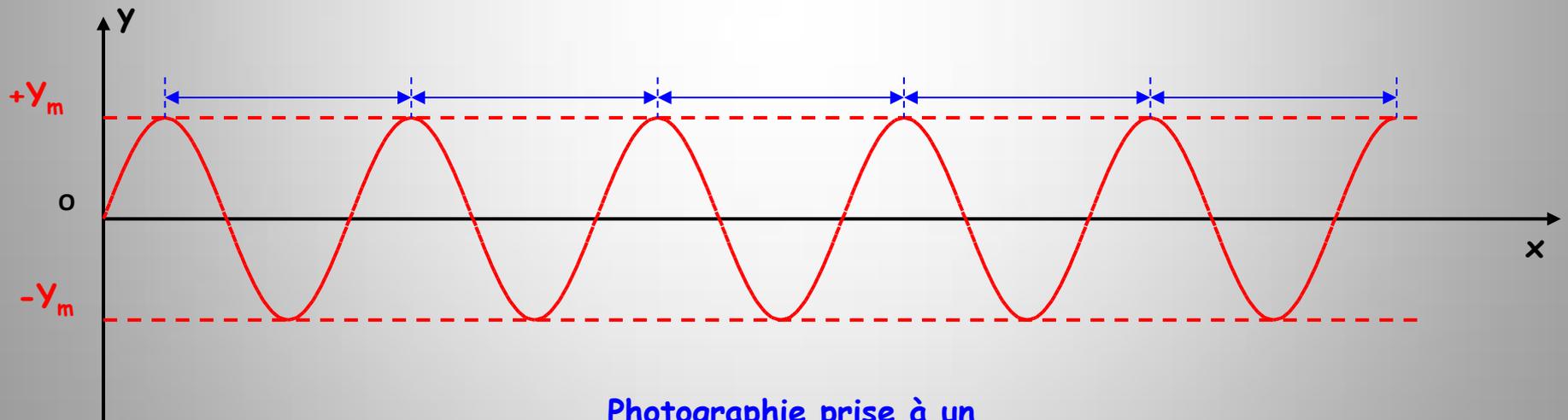
$$f = \frac{1}{T}$$

- 8 -

Ondes progressives périodiques

Définition

Une onde progressive est périodique si, une photographie du milieu de propagation, prise à un instant quelconque, montre une périodicité spatiale de l'onde.



Photographie prise à un instant quelconque

Exemples

Une goutte d'eau lâchée sur une surface aqueuse plane produit des rides circulaires qui s'atténuent rapidement.



Si on frappe régulièrement la surface de l'eau avec une pointe, alors on provoque une onde progressive périodique transversale.



- 9 -

Onde progressive sinusoidale

Mouvement de la source

Un vibreur entraîne dans son mouvement l'origine S d'une corde tendue horizontalement. Le mouvement de S est sinusoïdal.

$$y_S = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right)$$

Y_m : Amplitude de l'onde en mètre (m).

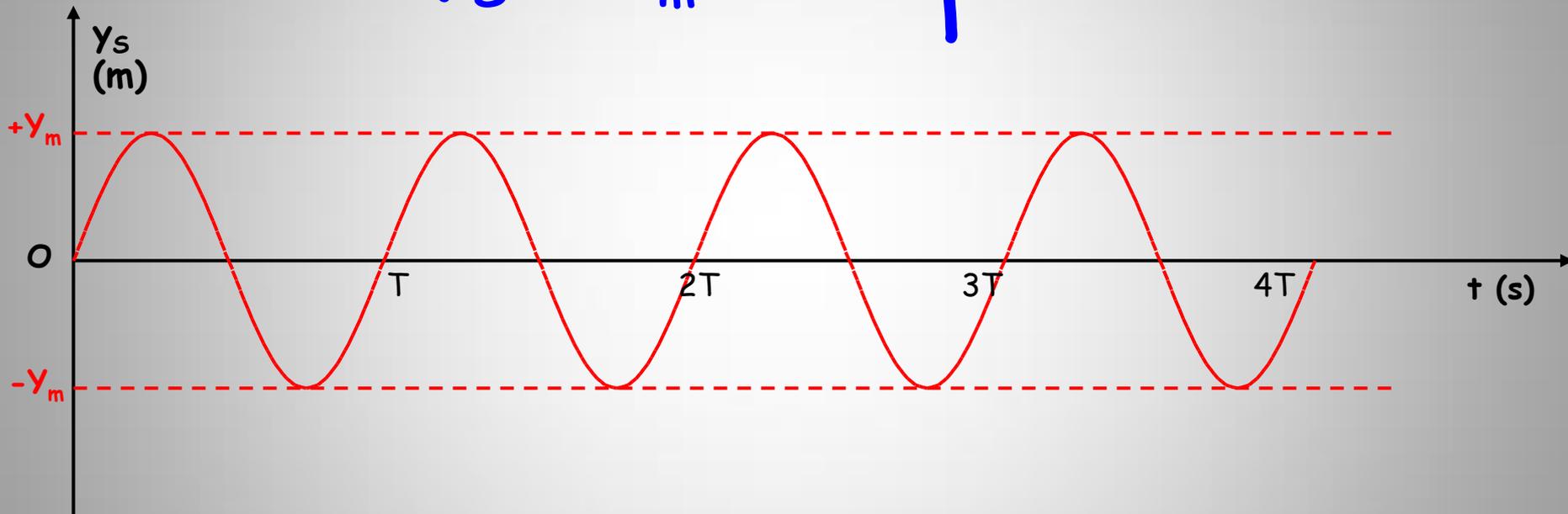
T : Période temporelle en seconde (s).

La période temporelle correspond à la plus petite durée au bout de laquelle la perturbation se reproduit identique à elle-même.

$$y_S(t) = y_S(t + n \cdot T)$$

Graphe des temps de la source

$$y_s = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right)$$

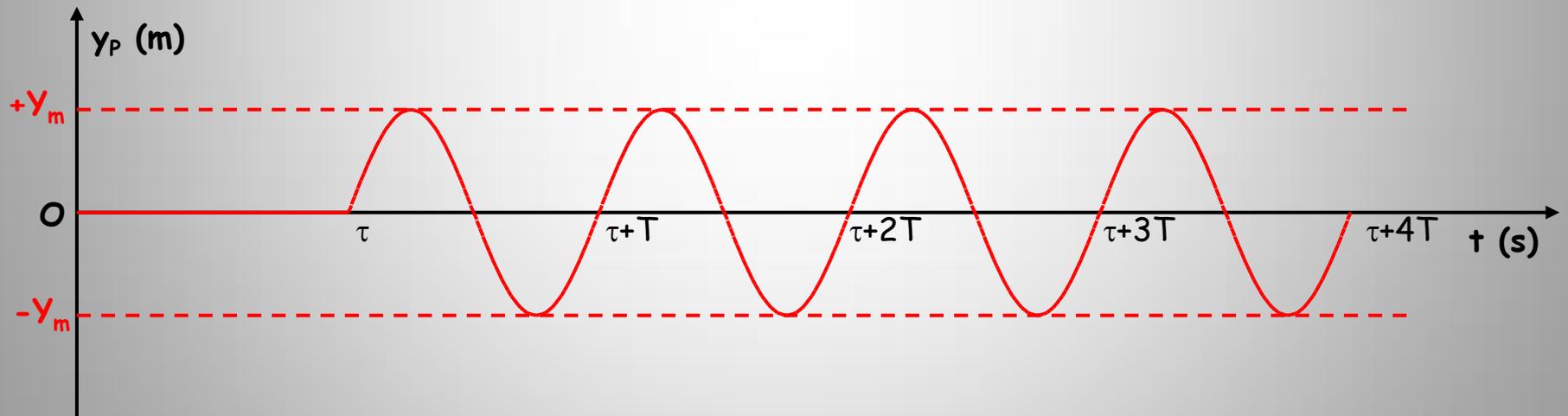


$$y_s(t) = y_s(t + n \cdot T)$$

Graphe des temps en un point de la corde

Un point P de la corde, situé à la distance OP de la source, reproduit le mouvement sinusoïdal de la source S avec un retard τ .

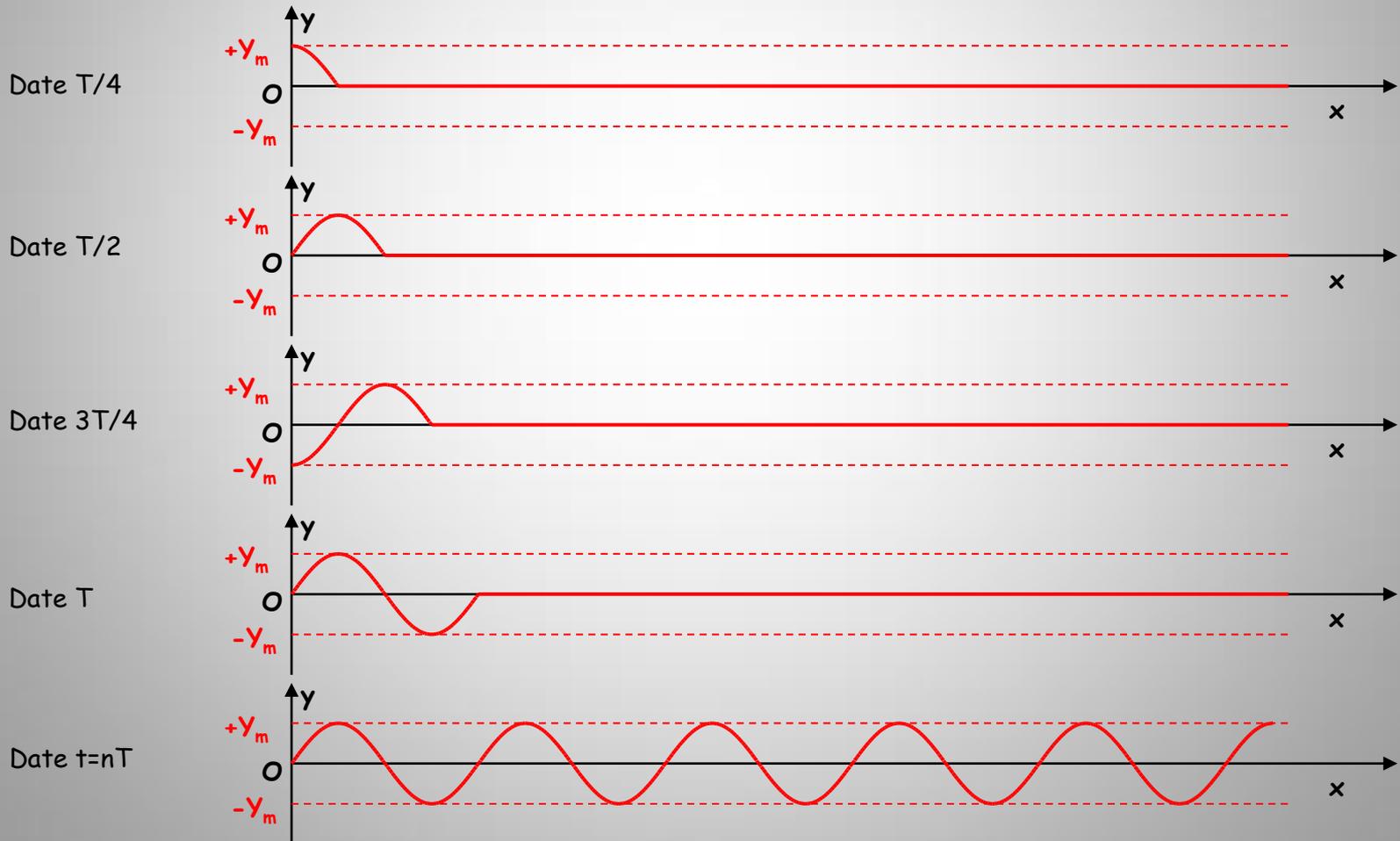
$$\tau = \frac{OP}{v}$$



$$y_P(t) = y_S(t - \tau) = y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot (t - \tau)\right)$$

Graphe des espaces de la corde à un instant quelconque

On photographie la corde à différents instants.



Relation entre la période spatiale λ et la période temporelle T

Une onde progressive sinusoïdale présente une double périodicité, spatiale (définie par la longueur d'onde λ), et temporelle (définie par la période T), telle que les fonctions $y(x)$ et $y(t)$ soient sinusoïdales.

$$\lambda = v \cdot T$$

λ : Longueur d'onde (m)

v : Célérité de l'onde ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

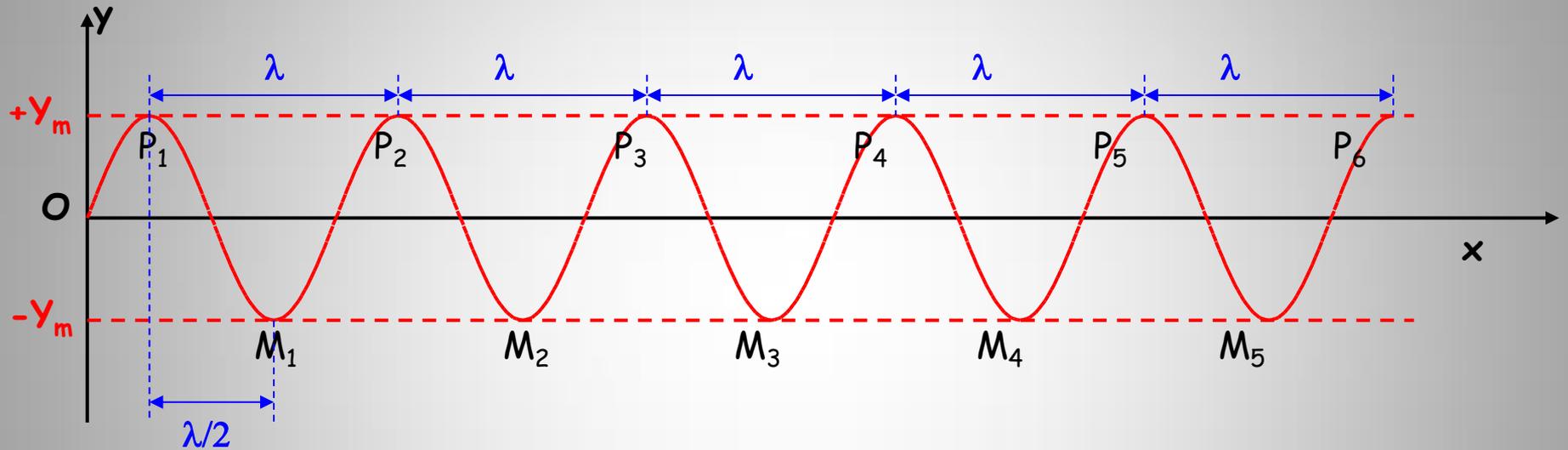
T : Période (s)

$$y(x) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot x\right)$$

$$y(t) = Y_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t\right)$$

Propriétés de la longueur d'onde λ

La longueur d'onde λ est égale à la distance parcourue par l'onde en une période T .



Tous les points P (distants de $n.\lambda$) sont en phase.

Tous les points M (distants de $n.\lambda$) sont en phase.

Les points P et M (distants de $(2n+1).\lambda/2$) sont en opposition de phase

- 10 -

Dispersion des ondes se
propageant dans certains milieux

Milieu dispersif

Un milieu matériel est dispersif lorsque la célérité V de l'onde sinusoïdale en propagation dans ce milieu dépend de la fréquence f .

Dans une cuve à onde on engendre, au moyen de gouttes d'eau, des ondes planes se propageant à la surface de l'eau.

Pour différentes fréquences f , on mesure la longueur d'onde λ puis on calcule la célérité $V = \lambda \cdot f$.

La célérité d'une onde progressive périodique plane à la surface de l'eau dépend de la fréquence de l'onde (égale à la fréquence de vibration de la source).

Milieu non dispersif

Pour les ondes sonores de fréquences audibles (20Hz à 20000Hz) l'air est un milieu non dispersif. Toutes les ondes sonores audibles se déplacent à la même vitesse.

Pour des ondes sonores audibles de très grande amplitude l'air devient dispersif: le roulement du tonnerre s'explique par le fait que les ondes sonores de basses fréquences sont plus lentes que les autres.

Pour des ondes ultra sonores de très grandes fréquences (supérieures à 10^9 Hz) l'air devient dispersif.

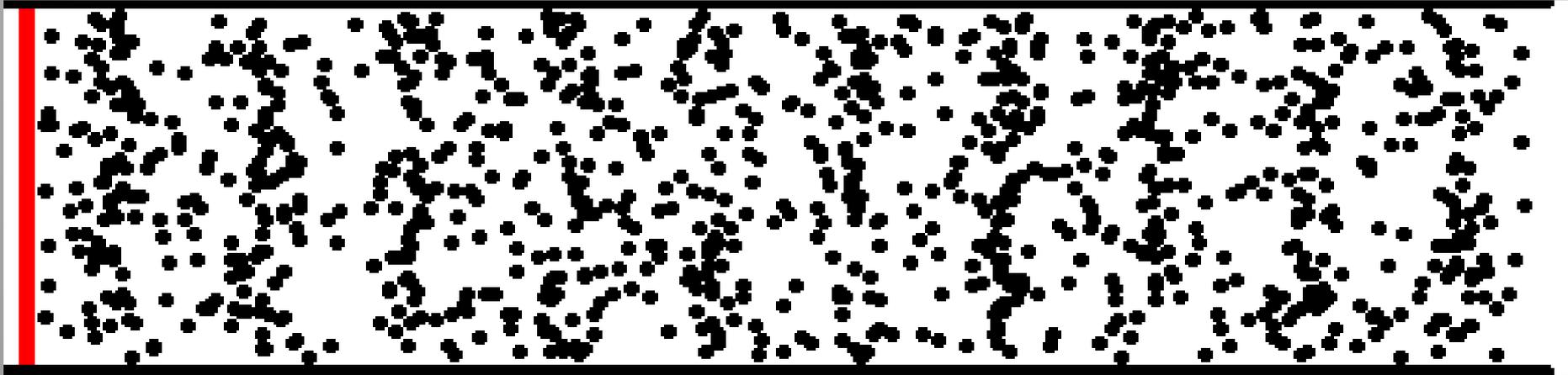
- 11 -

Ondes sonoras

Son et Ultra-Son

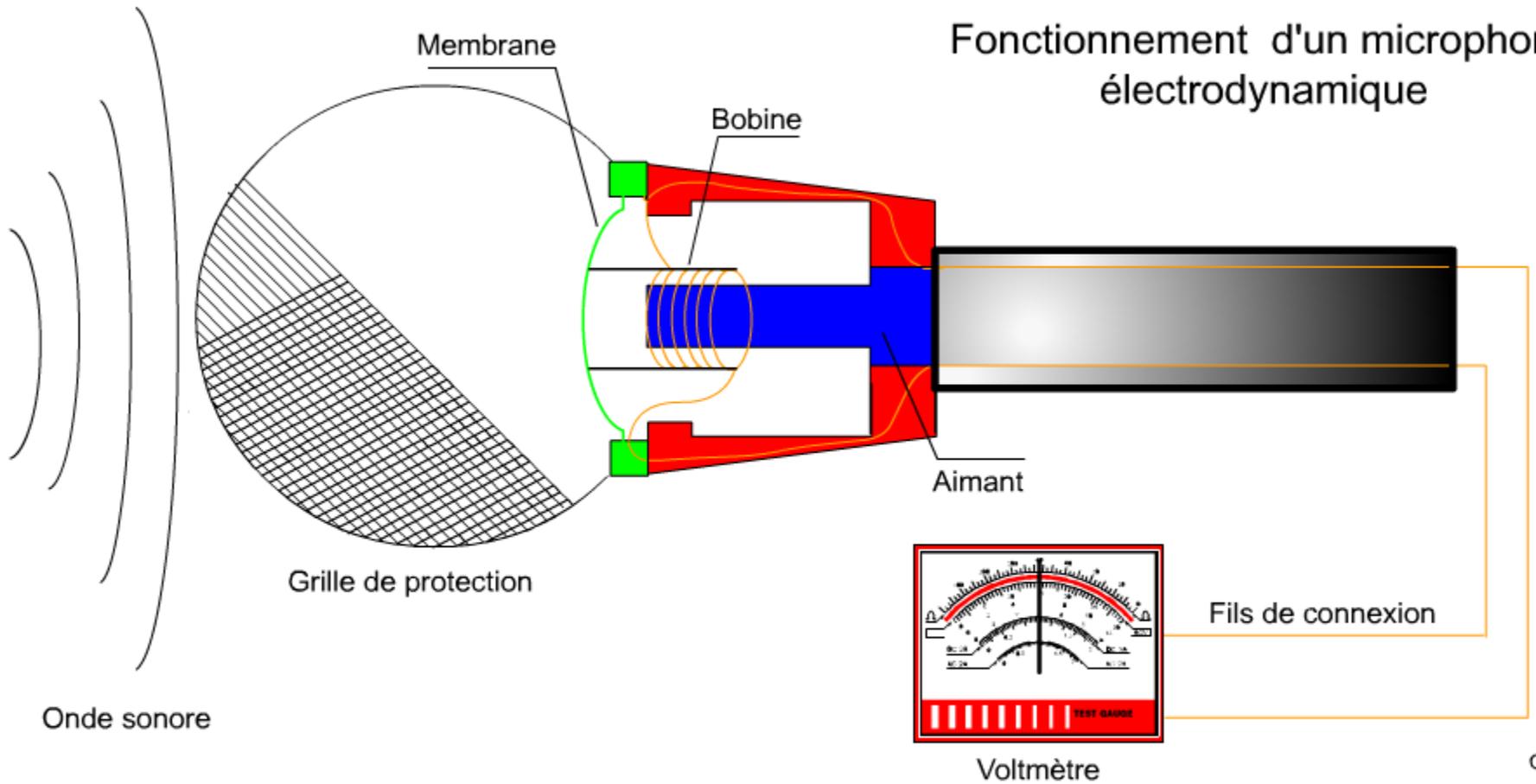
Un son est un phénomène périodique de nature ondulatoire.

Une onde sonore est un phénomène périodique qui se propage par une suite de compression et de dilatations du milieu de propagation.



Une onde sonore nécessite un support matériel et ne se propage pas dans le vide: c'est une onde mécanique progressive.

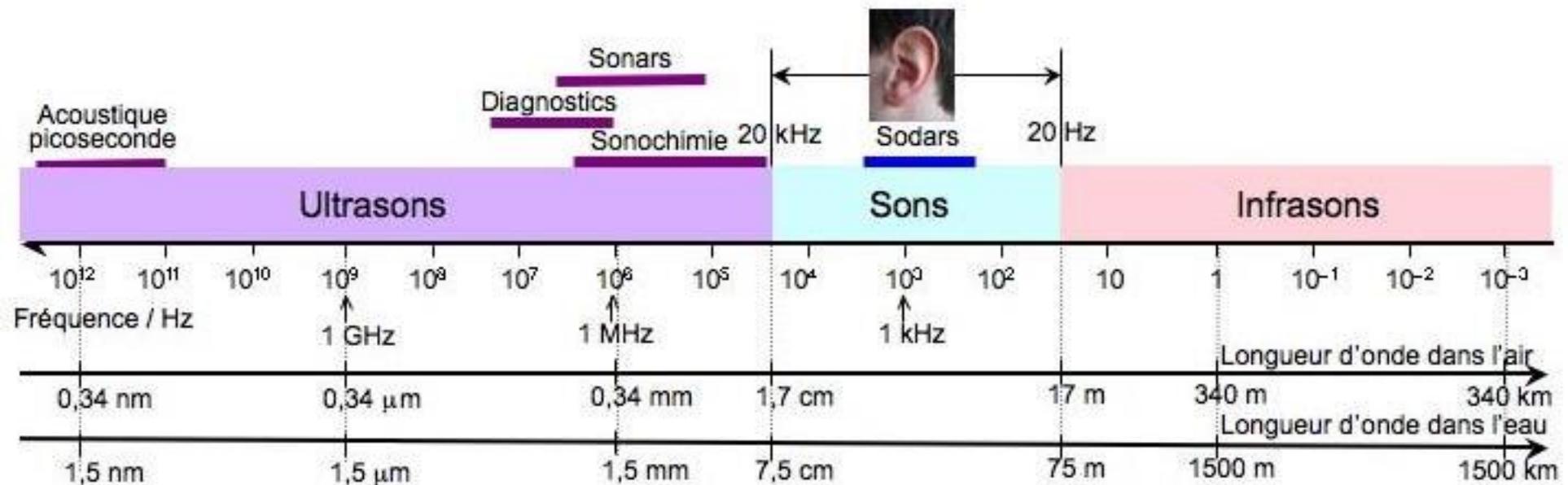
Fonctionnement d'un microphone électrodynamique



Domaine des fréquences

Le domaine des fréquences audibles concernant les sons se situe, selon les individus et leur âge, entre 20 et 20 000 Hz.

Au-delà d'une fréquence de 20 000 Hz, on parle d'ultrasons. Les sons de fréquence inférieure à 20 Hz sont appelés infrasons.

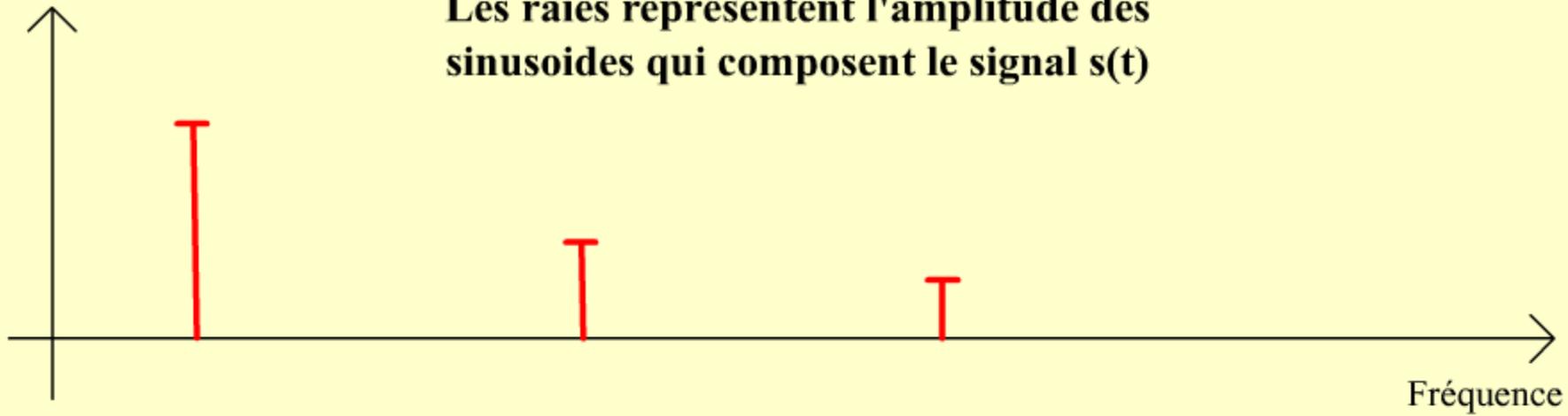


Analyse spectrale

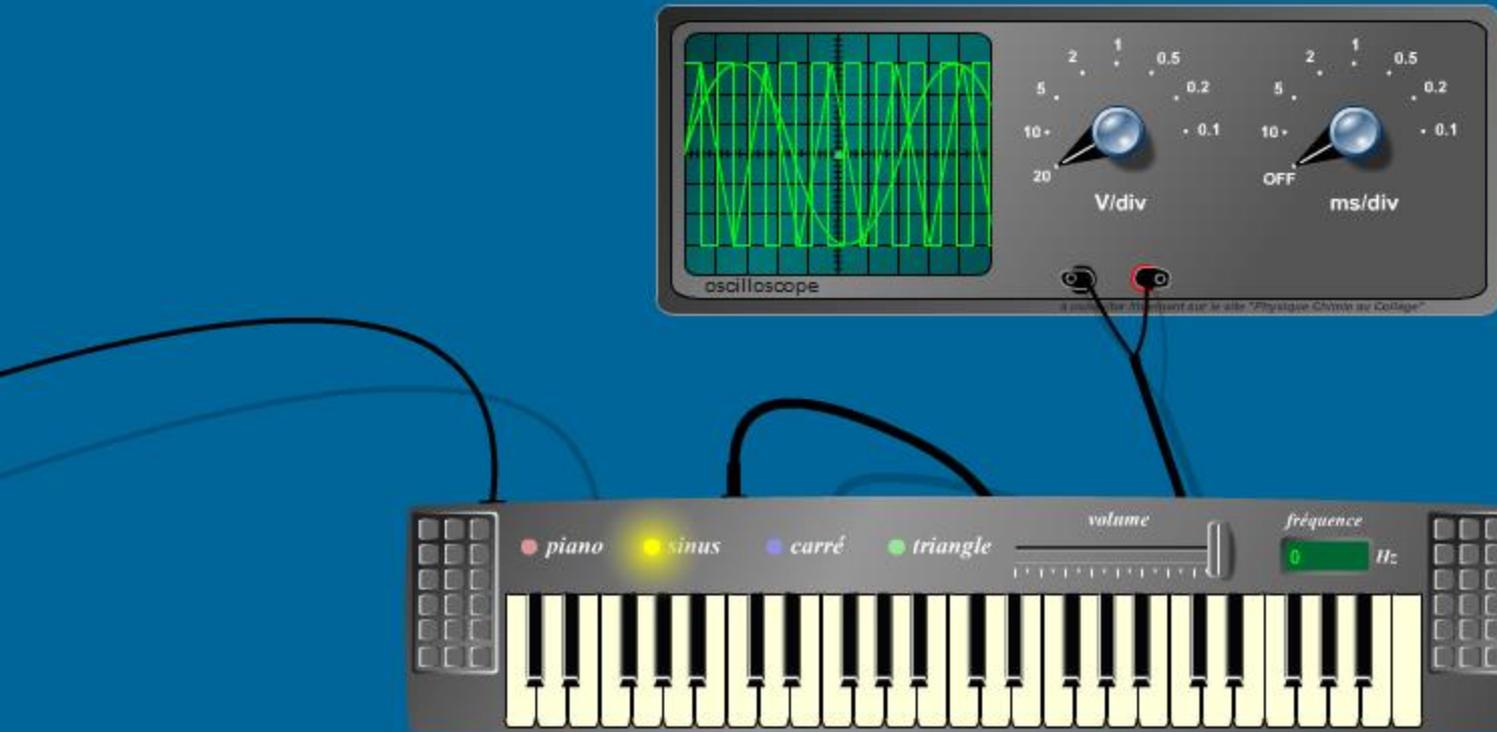
Une analyse spectrale est la représentation de l'amplitude relative d'un signal en fonction de la fréquence.

Amplitude des raies

Les raies représentent l'amplitude des sinusoides qui composent le signal $s(t)$



Hauteur et timbre

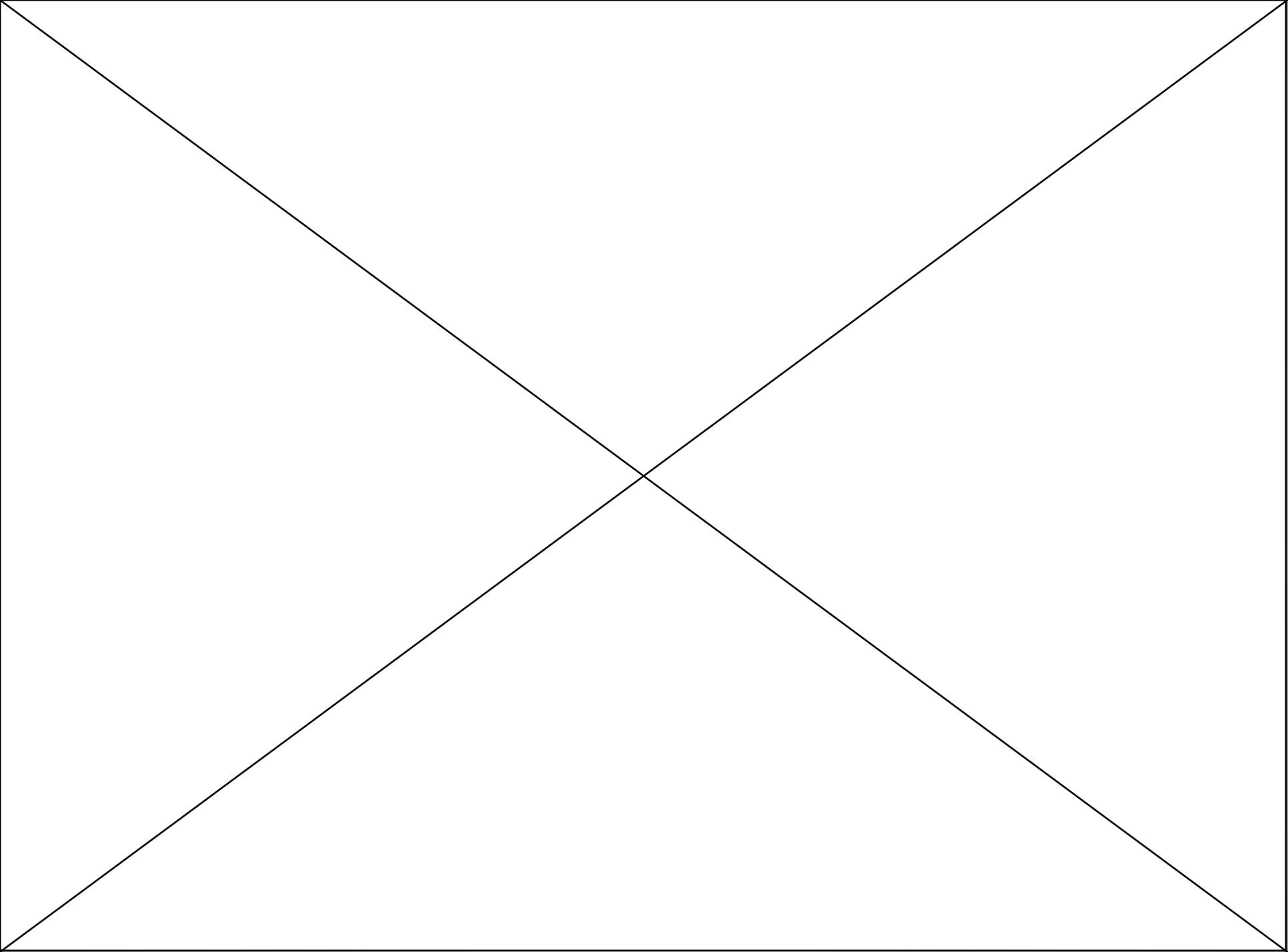


La hauteur est la fréquence du signal correspondant (fréquence fondamentale).

Le timbre dépend de la fréquence et de l'importance, dans le spectre de fréquences, de pics appelés harmoniques.

- 12 -

Exemple d'application
Mesure de la célérité du son



Fin du chapitre