Thème I. Ondes et signaux (Ondes)

Chapitre n°27 Propagation d'un signal

Pré-requis

- Seconde : Thème Ondes et signaux
  - Émission et perception d'un son.
- Première : Thème Ondes et signaux
  - Ondes mécaniques : onde mécanique progressive, ondes mécaniques périodiques et sinusoïdales, relations période, longueur d'onde, célérité,...

Objectifs du chapitre

— Compléter les notions déjà acquises au lycée, en introduisant un peu de formalisme, notamment pour les expressions des signaux transportés par des ondes progressives quelconques ou sinusoïdales.

Plan du cours

I Ondes et signaux **2**
I.1 Qu'est-ce qu'une onde ? un signal ? . . . 2
I.2 Ondes acoustiques 4
I.3 Ondes électromagnétiques 4
I.4 Cadre de l'étude 5

II Ondes progressives **5**
II.1 Position du problème 5
II.2 Représentation spatiale 6
II.3 Représentation temporelle 7
II.4 Bilan 7

III Ondes progressives sinusoïdales **8**
III.1 Écriture du signal 8
III.2 Double périodicité spatiale et temporelle 8
III.3 Déphasage 9
III.4 Milieu dispersif et vitesse de phase . . . 10
III.5 Décomposition d'une onde progressive . . 11

Ai-je bien appris mon cours ?

1 – ☺ – ☹ – Quelles sont les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques ?

2 – ☺ – ☹ – Donner quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustique, mécanique et électromagnétique.

3 – ☺ – ☹ – Donner les écritures des signaux transportés par des ondes progressives pour une propagation unidimensionnelle non dispersive.

4 – ☺ – ☹ – Donner l'écriture d'un signal transporté par une onde progressive sinusoïdale unidimensionnelle.

5 – ☺ – ☹ – Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la vitesse de phase.

6 – ☺ – ☹ – Donner l'expression du déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts en fonction du retard dû à la propagation.

7 – ☺ – ☹ – Définir ce qu'est un milieu dispersif. Donner des exemples.

I Ondes et signaux

I.1 Qu'est-ce qu'une onde ? un signal ?

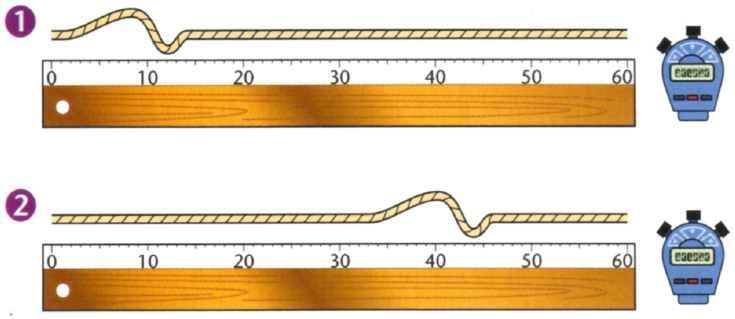
Capacité exigible : Identifier les grandeurs physiques correspondant à des signaux acoustiques, électriques, électromagnétiques.

Définitions : onde et signal

- Une **onde** est un phénomène de propagation spatiale d'une perturbation locale dans un milieu.
  Une onde transporte de l'énergie sans transporter de matière (la perturbation se propage sur de grandes distances, mais un point du milieu reste globalement au même endroit).
  L'énergie transportée par l'onde peut être cinétique, électrique, électromagnétique ...
  L'onde se déplace avec une vitesse, appelée **célérité** notée c, qui dépend des caractéristiques du milieu de propagation.
- Un **signal physique** est une **grandeur physique**, nulle dans l'état de repos et devenant non nulle avec la perturbation liée à une onde. On dit que **le signal est transporté par l'onde**.

Exemple 1. Ondes et signaux associés

- **Onde le long d'une corde de guitare, de piano ... :**



http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/general/onde_transversale.php
Le signal transporté est le déplacement transversal de la corde lorsque le musicien en joue. Notons y le déplacement vertical.
Si on fige le temps (on prend une photo de la corde à t_0), on se rend compte que le déplacement vertical dépend de la position : $y = y(x)$ à t_0 fixé.
Si on regarde un point de la corde à l'abscisse x_0 fixée, on se rend compte que la hauteur de la corde en ce point x_0 de l'espace dépend du temps : $y = y(t)$ à x_0 fixé.

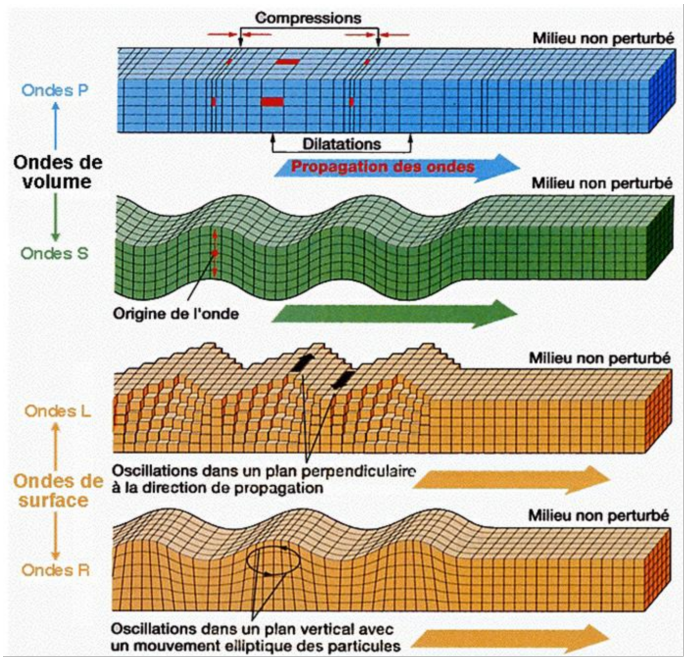
Le signal est donc une fonction à la fois du temps et de l'espace : $y = y(x, t)$

- **Onde à la surface de l'eau.**

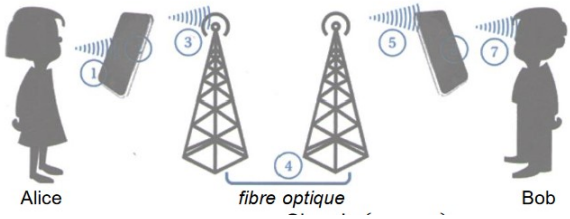
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/cuve_ondes/propagation_onde_circulaire.php
Le signal transporté est le déplacement transversal d'un point à la surface de l'eau.
Les mêmes conclusions que pour la corde peuvent être faites.

- **Onde acoustique.** http://physique.ostralo.net/ondesonoretuyau/
  Le signal transporté est la surpression locale de l'air par rapport à la pression d'équilibre P_0 (environ 1 bar) au passage de l'onde acoustique.
  À un instant t_0 donné, la pression n'est pas la même en tous points, donc $p = p(x)$, à t_0 fixé.
  En un point d'abscisse x_0 donnée, la pression évolue au cours du temps, donc $p = p(t)$ à x_0 fixé.
  La surpression acoustique est donc une fonction à la fois du temps et de l'espace : $p = p(x, t)$

- **Ondes sismiques.**
  Elles sont de différentes natures : les ondes P (primaires) de compression et S (secondaires) de cisaillement en volume, et les ondes L (Love) d'ondulations horizontales et R (Rayleigh) en surface d'ondulations verticales.



Exemple 2. Alice parle avec Bob par l'intermédiaire de leurs téléphones portables. Quels sont les signaux physiques qui interviennent dans cette situation ?



Milieu	Signal $s(x, y, z, t)$
① et ⑦ Dans l'air : onde acoustique.	Surpression $p(x, y, z, t)$)de l'air.
② et ⑥ Dans les circuits du téléphone : onde électrique.	Tension $u(x, y, z, t)$ et Intensité $i(x, y, z, t)$ Dans l'ARQS, on peut négliger le phénomène de propagation en considérant qu'il est instantané : $u(t)$, et $i(t)$.
③et ⑤ Dans l'air : onde électromagnétique.	Champ électrique $\vec{E}(x, y, z, t)$ et magnétique $\vec{B}(x, y, z, t)$.
④ Dans la fibre optique : onde lumineuse.	Champ électrique $\vec{E}(x, y, z, t)$ et magnétique $\vec{B}(x, y, z, t)$.

Définitions : ondes transversale et longitudinale

- Une **onde est transversale** lorsque le mouvement local de la matière est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde.
- Une **onde est longitudinale** lorsque le mouvement local de la matière est parallèle à la direction de propagation de l'onde.

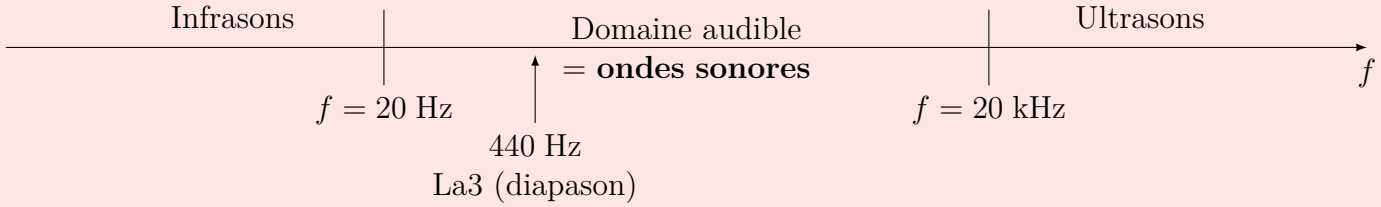
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/general/onde_transversale.php
http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Ondes/general/onde_longitudinale.php

I.2 Ondes acoustiques

Capacité exigible : Citer quelques ordres de grandeur de fréquences dans les domaines acoustiques et électromagnétiques.

À retenir : Ondes acoustiques

Le signal transporté par une onde acoustique est la **surpression acoustique**, qui est nulle en l'absence d'onde acoustique, positive en une zone de surpression (couches de fluides compressées) et négative en une zone de dépression (couches de fluides dilatées).



Une onde acoustique nécessite un milieu matériel pour se propager.

Les ondes acoustiques se propagent d'autant plus vite que le milieu est dense.

- Dans l'air : $c \approx 340$ m · s^{-1}
- Dans l'eau : $c \approx 1500$ m · s^{-1}

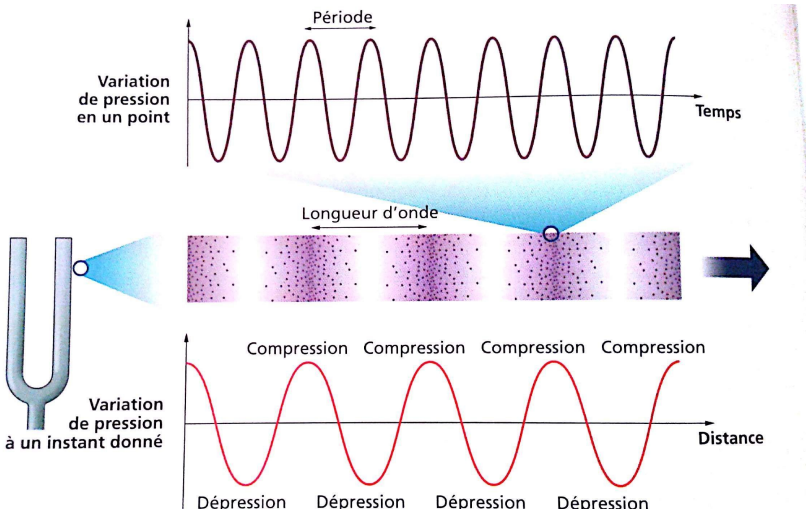


FIGURE 1 – Ondes acoustiques

I.3 Ondes électromagnétiques

https://www.edumedia-sciences.com/fr/media/222-onde-transverse-electro-magnetique
https://www.geogebra.org/m/lAYD1Kob

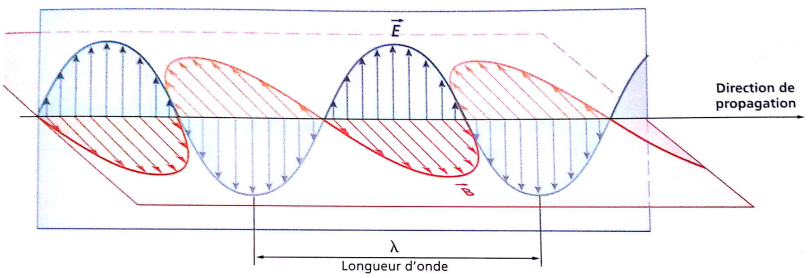
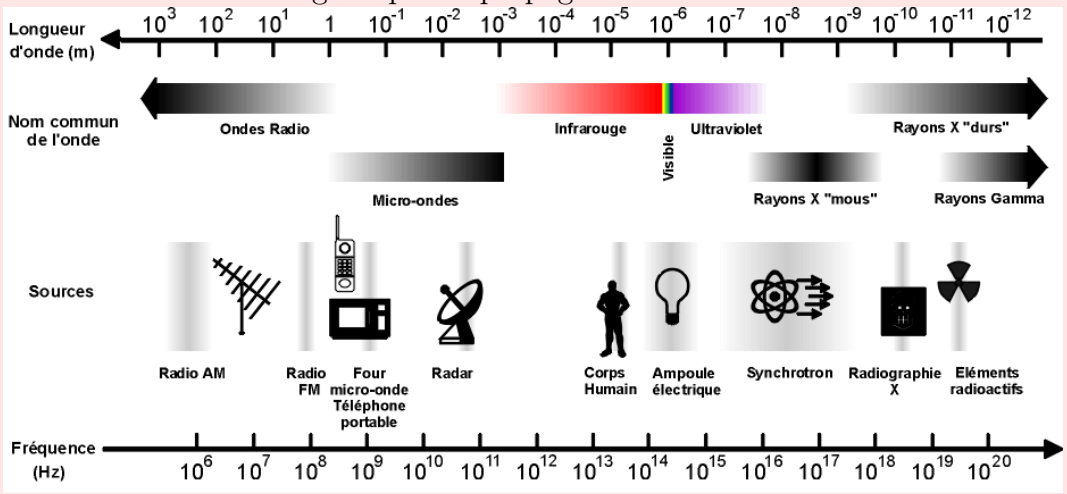


FIGURE 2 – Ondes électromagnétiques

À retenir : Ondes électromagnétiques

- Le signal transporté par une onde électromagnétique est le **champ électrique** $\vec{E}$ et le **champ magnétique** $\vec{B}$ (l'étude de la propagation d'une telle onde sera développée en PC/PSI).
- Le signal transporté par une **onde électrique**, c'est-à-dire une onde électromagnétique guidée le long d'un câble de transmission constitué de deux conducteurs, est l'**intensité du courant** circulant dans les conducteurs et la **tension** entre les deux conducteurs.
- Les ondes électromagnétiques se propagent dans le vide à la vitesse $c = 299792458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3,0.10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Téléphonie :
300 à 3400 Hz

Ondes radio :
100 MHz

Wifi :
2,4 GHz et 5 GHz

Visible :
4.10^{14} à 8.10^{14} Hz

I.4 Cadre de l'étude

Cette année, conformément au programme, nous étudierons le cas d'une **propagation** :

— **unidimensionnelle** : la propagation a lieu dans une seule direction de l'espace ;

— **linéaire** : pas d'apparition de nouvelles fréquences lors de la propagation ;

— **non dispersive** : célérité indépendante de la fréquence ;

— **sans déformation ni atténuation**.

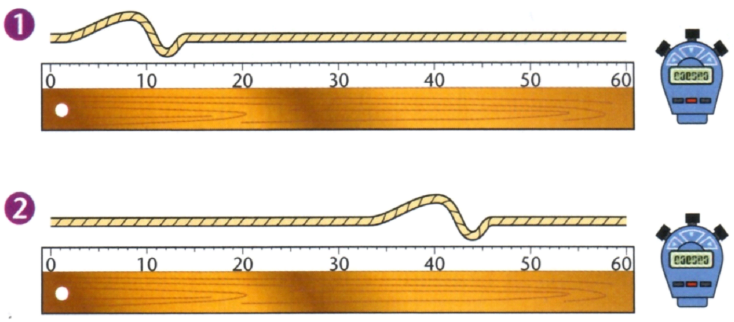
II Ondes progressives

II.1 Position du problème

Définition : Onde progressive

Une **onde progressive** est une perturbation qui se retrouve à l'identique un peu plus loin un peu plus tard, et qui transporte de l'énergie, par opposition aux ondes stationnaires (cf chapitre suivant).

On souhaite décrire mathématiquement la propagation d'une perturbation le long d'une corde tendue comme ci-dessous, c'est-à-dire obtenir la forme de la fonction $y(x,t)$.



Définitions

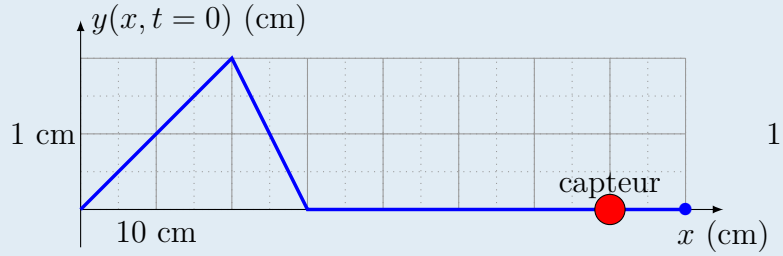
Le signal transporté par une onde progressive peut être représenté de deux points de vue :

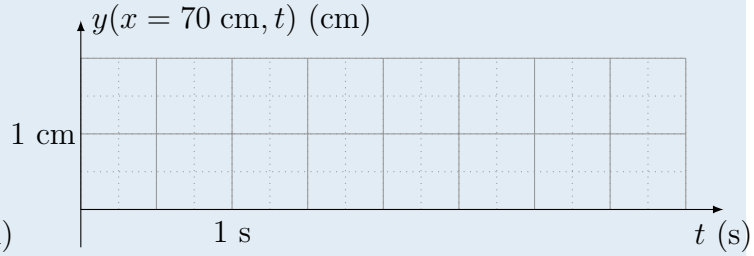
Représentation spatiale : on regarde **à un instant t fixé** la perturbation dans tout l'espace, en fonction de x. *Cela revient à prendre une photo de l'onde à un instant t fixé.*

Représentation temporelle : on regarde **en une position x fixée** la perturbation sur toute sa durée, en fonction de t. *Cela revient à placer un détecteur du signal en une position x fixée et réaliser l'enregistrement de la perturbation au cours du temps.*

Activité n°1 – De la représentation spatiale vers la représentation temporelle

La figure ci-dessous est la représentation spatiale d'une onde à l'instant $t = 0$. Cette onde se propage dans le sens des x croissants à la célérité $c = 20$ cm · s^{-1}. Un capteur est situé en $x_{\text{capteur}} = 70$ cm.





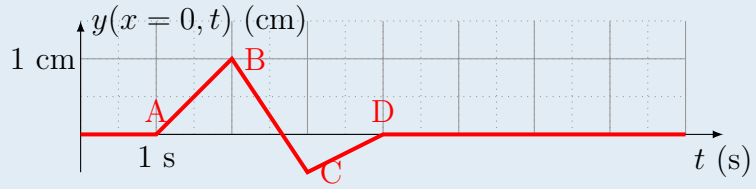
Q1. À quel instant le signal arrive-t-il au niveau du capteur ?

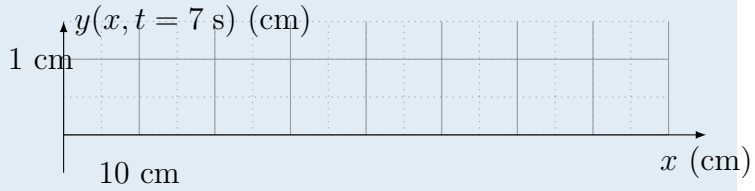
Q2. Quelle est la durée de la perturbation ?

Q3. Compléter le chronogramme du signal reçu par le capteur.

Activité n°2 – De la représentation temporelle vers la représentation spatiale

Une onde progressive se propage le long d'une corde à la célérité $c = 10$ cm · s^{-1} vers les x croissants. En $x = 0$, le signal mesuré a l'allure représentée ci-dessous.





Q1. Représenter le signal existant à l'instant $t = 7$ s en fonction de x.

II.2 Représentation spatiale et expression du signal

Capacité exigible : **Écrire les signaux sous la forme $f(x - ct)$ ou $g(x + ct)$.**

Démonstration à maîtriser n°3 – Expression mathématique. Point de vue spatial

On étudie la **propagation d'une onde progressive, le long d'une corde dans le sens des x croissants** à la célérité c. À l'instant $t = 0$, la corde possède une forme décrite par la fonction F qui dépend de la variable d'espace x : $y(x, t = 0) = F(x)$. Elle est décrite par la photo à $t = 0$. À l'instant $t > 0$, la corde possède la forme $y(x, t)$ décrite par la photo à l'instant t.

Q1. En comparant les deux photos, de quelle distance d a progressé la perturbation entre 0 et t ?

Q2. À quel endroit se trouvait, à l'instant $t = 0$, la perturbation qui est identique à celle se trouvant en x à l'instant t ? En déduire l'expression de $y(x, t)$ en fonction de $y(???, t = 0)$.

Q3. En déduire l'expression du signal $y(x, t)$, en x à l'instant t à l'aide de la fonction d'une seule variable F.

Q4. Reproduire ce raisonnement pour une onde se propageant dans le sens inverse, c'est-à-dire celui des x décroissants. Écrire le signal qui décrit l'onde sous la forme $y(x, t) = y(???, 0) = G(???)$ (les ? ? ? sont à

compléter).

II.3 Représentation temporelle et expression du signal

Capacité exigible : Écrire les signaux sous la forme $f(t-x/c)$ ou $g(t+x/c)$.

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

Démonstration à maîtriser n°4 – Expression mathématique. Point de vue temporel

On suppose qu'un émetteur placé en O (d'abscisse $x=0$) émet une onde se **propageant dans le sens des x croissants** à la célérité c, en direction des points d'abscisses $x>0$. On note $y(x,t)$ le signal physique transporté par cette onde. L'onde émise en $x0$ est caractérisée par la fonction $f(t)$ de l'unique variable t : $y(x=0,t)=f(t)$.

Q1. Représenter l'allure du signal en $x=0$ et en x en fonction du temps.

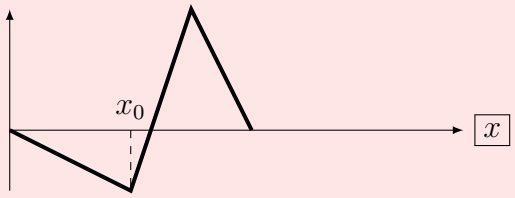
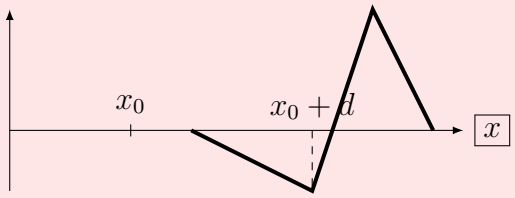
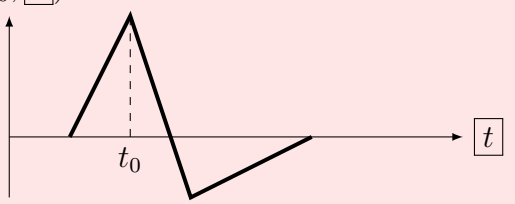
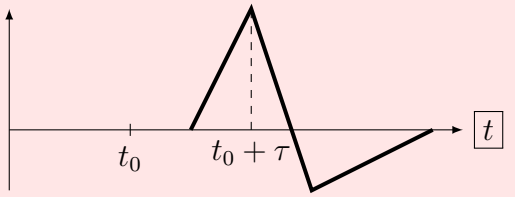
Q2. Déterminer l'expression du retard temporel avec lequel l'onde arrive en M (d'abscisse $x>0$).

Q3. La perturbation qui se trouve en x à l'instant t était en $x=0$ à quel instant ? En déduire l'expression de $y(x,t)$ en fonction de $y(x=0,???)$ (? ? ? à compléter).

Q4. En déduire l'expression du signal $y(x,t)$ en M à l'instant t en fonction de la fonction f.

II.4 Bilan

À retenir : Écriture des signaux progressifs

Représentation spatiale	**Représentation temporelle**
En fonction de x, à un instant t_0 donné. *Ex : on prend une photo d'une corde à un instant donné.*	En fonction du temps t, en l'enregistrant en un point fixe de l'espace d'abscisse x_0. *Ex : son enregistré par un micro fixe, hauteur d'une vague enregistré par un capteur fixe dans l'eau.*
À deux instants différents : Signal mesuré à l'instant t_0 , en fonction de x : $s(\boxed{x},t_0)$  Signal mesuré à l'instant $t_1>t_0$, en fonction de x : $s(\boxed{x},t_1)$  	**En deux points différents** : Signal mesuré à une abscisse x_0, en fonction de t : $s(x_0,\boxed{t})$  Signal mesuré en $x_1>x_0$, en fonction de t : $s(x_1,\boxed{t})$ 
Écriture pour une propagation selon $+\overrightarrow{u_x}$: $s(x,t)=s(x-ct,0)=f(x-ct)$	Écriture pour une propagation selon $+\overrightarrow{u_x}$: $s(x,t)=s\left(0,t-\dfrac{x}{c}\right)=f\left(t-\dfrac{x}{c}\right)$
Écriture pour une propagation selon $-\overrightarrow{u_x}$: $s(x,t)=s(x+ct,0)=g(x+ct)$	Écriture pour une propagation selon $-\overrightarrow{u_x}$: $s(x,t)=s\left(0,t+\dfrac{x}{c}\right)=g\left(t+\dfrac{x}{c}\right)$

III Ondes progressives harmoniques

III.1 Écriture du signal transporté par une onde progressive sinusoïdale

Soit une source, située en $x = 0$, qui émet une onde sinusoïdale $s_{\text{émise}}(t) = S_m \cos(\omega t + \varphi_0)$, qui se propage dans le sens des x croissants. D'après le paragraphe précédent, en x, l'onde perçue est donnée par :

$$s(x,t) = s\left(0, t - \frac{x}{c}\right) = s_{\text{émise}}\left(t - \frac{x}{c}\right) = S_m \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right)$$

À connaître : Onde progressive sinusoïdale

Une **onde progressive sinusoïdale (=harmonique=monochromatique)** est un cas particulier d'onde progressive pour lequel la fonction associée au signal est une fonction sinusoïdale.

Le signal transporté par une **onde progressive sinusoïdale se propageant dans le sens des x croissants** s'écrit :

$$s(x,t) = S_m \cos\left(\omega\left(t - \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right) = S_m \cos\left(\omega t - \frac{\omega}{c}x + \varphi_0\right)$$

- S_m l'amplitude (de la même unité que s), avec $S_m > 0$;
- ω la pulsation temporelle (en rad · s^{-1}) ;
- c la célérité de l'onde (en m · s^{-1}) ;
- φ_0 la phase à l'origine (des temps et des abscisses) en rad.

Le signal transporté par une **onde progressive sinusoïdale se propageant dans le sens des x décroissants** s'écrit : $s(x,t) = S_m \cos\left(\omega\left(t + \frac{x}{c}\right) + \varphi_0\right) = S_m \cos\left(\omega t + \frac{\omega}{c}x + \varphi_0\right)$

III.2 Double périodicité spatiale et temporelle

Capacité exigible : Établir la relation entre la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.

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

Démonstration à maîtriser n°5 – Double périodicité spatiale et temporelle

On étudie une onde progressive sinusoïdale se propageant dans la direction des x croissants. On note S_m son amplitude, c sa célérité, ω sa pulsation et φ_0 sa phase à l'origine des temps et des positions.

Q1. Représenter le signal en fonction du temps à x fixé. Déterminer l'expression de la période temporelle T définie comme étant la plus petite durée non nulle telle que $\forall x$ et $\forall t$, $s(x, t+T) = s(x,t)$.

Q2. Représenter le signal en fonction de la position x à t fixé. Déterminer l'expression de la période spatiale λ définie comme étant la plus petite distance non nulle telle que $\forall x$ et $\forall t$, $s(x+\lambda, t) = s(x,t)$.

Q3. En déduire un lien entre périodicité spatiale et la périodicité temporelle.

À connaître : Relations pour les ondes progressives harmoniques

■ **Caractéristiques temporelles**
- Période temporelle : T en seconde (s)
- Fréquence : $f = \frac{1}{T}$ en Hertz (1 Hz=1 s^{-1})
- Pulsation : $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ (rad · s^{-1})

■ **Caractéristiques spatiales**
- Longueur d'onde : λ en mètre (m)
- Nombre d'onde : $\sigma = \frac{1}{\lambda}$ en m^{-1}
- Vecteur d'onde : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ en m^{-1}

■ **Liens entre les caractéristiques temporelles et spatiales** : $\lambda = cT$ $\quad k = \frac{\omega}{c}$

III.3 Déphasage

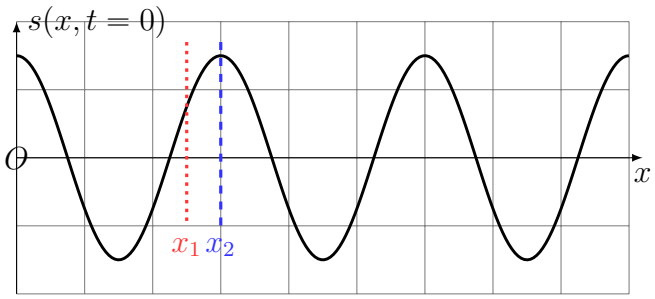
Capacité exigible : Relier le déphasage entre les signaux perçus en deux points distincts au retard dû à la propagation.

Un son sinusoïdal de fréquence f est émis par un haut-parleur situé à l'origine de l'axe (Ox) :

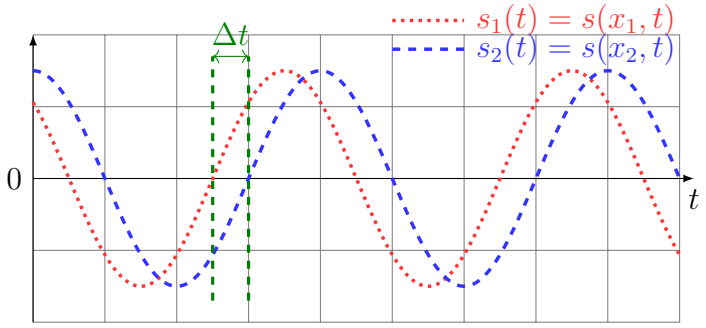
$$s(x=0,t) = S_m \cos(\omega t)$$

et se propage dans le sens des x croissants, donc $s(x,t) = s\left(x=0, t-\dfrac{x}{c}\right) = S_m \cos\left(\omega\left(t-\dfrac{x}{c}\right)\right)$

Deux microphones sont placés aux abscisses $x_1 > 0$ et $x_2 > x_1$.



Signaux mesurés en x_1 et x_2 en fonction du temps :



➞ Signal mesuré en x_1 :

$$\begin{aligned} s_1(t) &= s(x_1,t) \\ &= s\left(x=0, t-\frac{x_1}{c}\right) \\ &= S_m \cos\left(\omega t \underbrace{-\omega\frac{x_1}{c}}_{\varphi_1}\right) \end{aligned}$$

➞ Signal mesuré en x_2 :

$$\begin{aligned} s_2(t) &= s(x_2,t) \\ &= s\left(x=0, t-\frac{x_2}{c}\right) \\ s_2(t) &= S_m \cos\left(\omega t \underbrace{-\omega\frac{x_2}{c}}_{\varphi_2}\right) \end{aligned}$$

➞ Expression du déphasage de $s_2(t)$ par rapport à $s_1(t)$, noté $\Delta\varphi_{2/1} = \varphi_2 - \varphi_1$, où φ_1 (resp. φ_2) est la phase à l'origine des temps de s_1 en x_1 (resp. s_2 en x_2) :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{2/1} &= \varphi_2 - \varphi_1 \\ &= -\omega\frac{x_2}{c} + \omega\frac{x_1}{c} \\ &= -\frac{\omega}{c}\left(x_2 - x_1\right) \end{aligned}$$

➞ Le déphasage $\Delta\varphi_{2/1}$ peut s'exprimer en fonction du retard Δt (=durée mise par l'onde pour aller de x_1 vers x_2) lié à la propagation entre les deux microphones :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{2/1} &= -\frac{\omega}{c}\left(x_2 - x_1\right) \\ &= -\omega\Delta t \\ &= -2\pi f \Delta t \end{aligned}$$

À retenir : Mesurer un déphasage

Une fois le retard temporel Δt (=la plus petite durée séparant deux points identiques des signaux) mesuré, la valeur absolue du déphasage s'obtient :

$$\left|\Delta\varphi_{2/1}\right| = 2\pi f \Delta t$$

$\Delta\varphi_{2/1} < 0$ si le signal 2 est en retard sur le signal 1
$\Delta\varphi_{2/1} > 0$ si le signal 2 est en avance sur le signal 1

III.4 Milieu dispersif et vitesse de phase

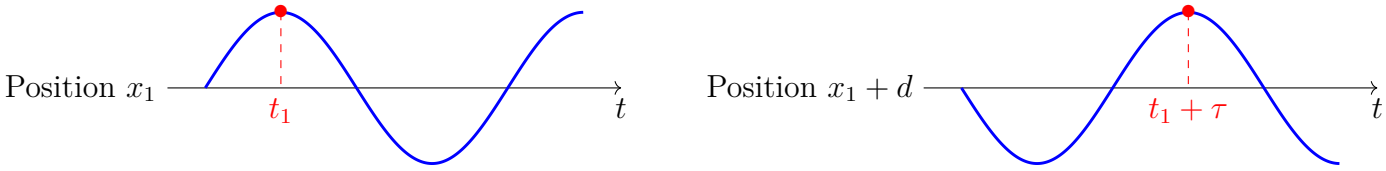
Définition : Vitesse de phase

La **vitesse de phase** est la vitesse à laquelle se déplacent les surfaces équiphases d'une onde monochromatique.

Pour une onde monochromatique $s(x,t) = S_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$, on définit la phase en x à l'instant t :

$$\Phi(x,t) = \omega t - kx + \varphi_0$$

Si à l'instant t_1 à la position x_1 : $\Phi(x_1,t_1) = \omega t_1 - kx_1 + \varphi_0$
L'onde se propage d'une distance d en une durée τ : $\Phi(x_1+d, t_1+\tau) = \omega(t_1+\tau) - k(x_1+d) + \varphi_0$



On peut alors écrire :

$$\begin{aligned}
\Phi(x_1,t_1) &= \Phi(x_1+d, t_1+\tau) \\
\omega t_1 - kx_1 + \varphi_0 &= \omega(t_1+\tau) - k(x_1+d) + \varphi_0 \\
0 &= \omega\tau - kd \\
\frac{d}{\tau} &= \frac{\omega}{k} \\
\frac{d}{\tau} &= \frac{2\pi f}{\frac{2\pi}{\lambda}} \\
\frac{d}{\tau} &= f\lambda
\end{aligned}$$

L'onde parcourt la distance d en une durée τ, on en déduit l'expression de la vitesse de phase : $v_\Phi = \dfrac{d}{\tau} = \dfrac{\omega}{k} = \lambda f$

Définition : Milieu dispersif

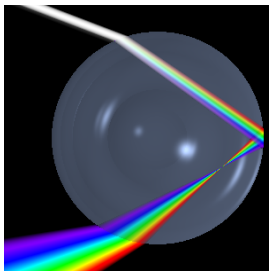
Un **milieu est dit dispersif** si la vitesse de phase v_Φ dépend de la fréquence ou de la longueur d'onde. Pour un milieu non dispersif, on définit la célérité de l'onde comme la valeur commune des vitesses de phases.

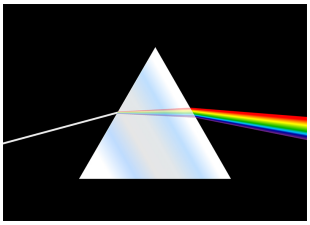
Si le milieu est dispersif, les différentes composantes spectrales d'un signal ne vont pas à la même vitesse et donc le signal peut se déformer lors de la propagation. Il s'agit de la principale limite des transmissions réelles.

Une onde non sinusoïdale se propageant dans un milieu dispersif va nécessairement se déformer, et ne peut donc pas être une onde progressive.

Exemple 3. Propagation dispersive/non dispersive

La propagation de la lumière dans l'air est non dispersive. La propagation de la lumière dans l'eau ou dans le verre est dispersive : les radiations lumineuses ne se propagent pas à la même vitesse et sont alors dispersées. On observe ainsi les arcs-en-ciel, et les spectres de lumières polychromatiques à l'aide des prismes.





III.5 Décomposition d'une onde progressive

À retenir : Développement en série de Fourier d'un signal périodique

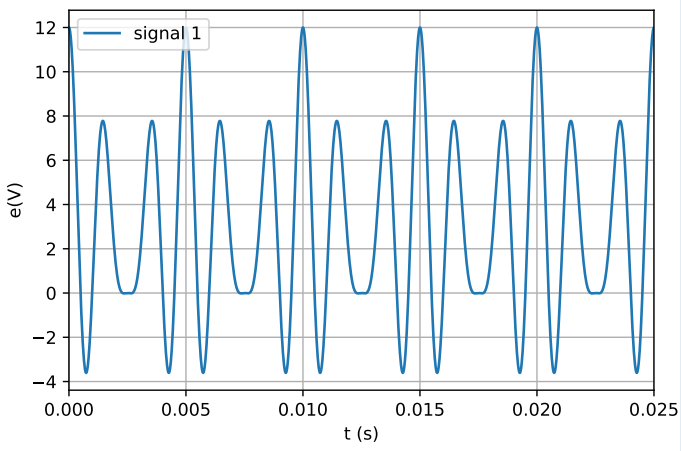
Un **signal y périodique de période T et de fréquence f** peut s'écrire comme la **somme de signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence f du signal $y(t)$.**

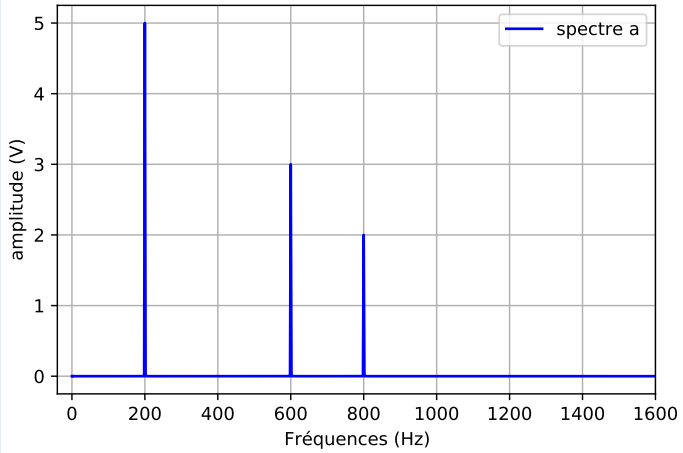
Le **développement en série de Fourier** de y s'écrit : $y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_n \cos(2\pi n f t + \varphi_n)\right)$, avec :

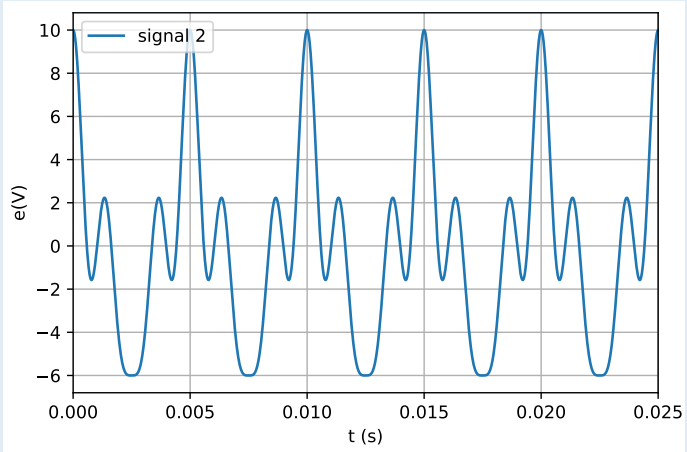
- A_0 : composante continue, c'est la valeur moyenne du signal ;
- f : fréquence de $y(t)$, également la **fréquence du fondamental** f_1 $(n = 1)$;
- $f_n = nf$: fréquence de l'**harmonique de rang** n ;
- A_n : amplitude de l'harmonique d'ordre n ;
- φ_n : la phase à l'origine des temps de l'harmonique d'ordre n .

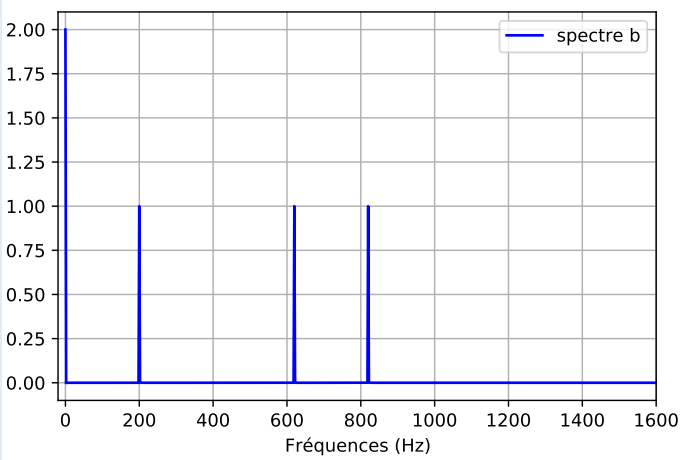
Activité n°6 – Comprendre un spectre

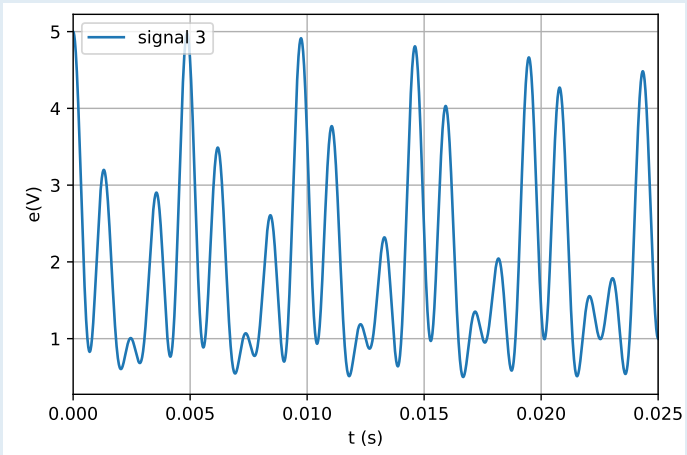
Q1. En justifiant précisément, attribuer à chaque signal son spectre. Les termes « composante continue » , « harmonique » , « périodique » , « multiple » doivent apparaître.

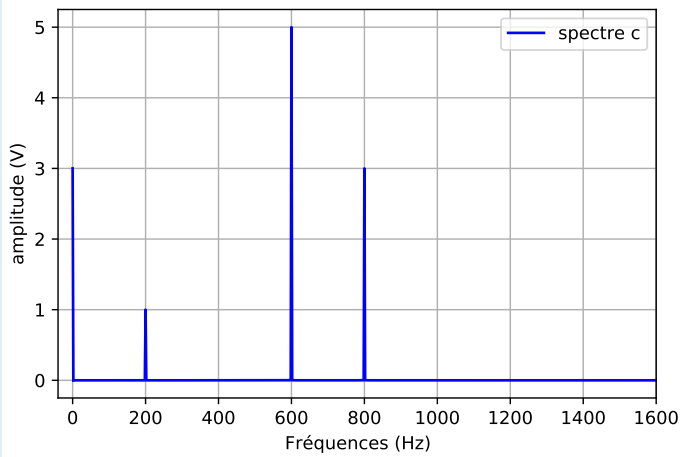






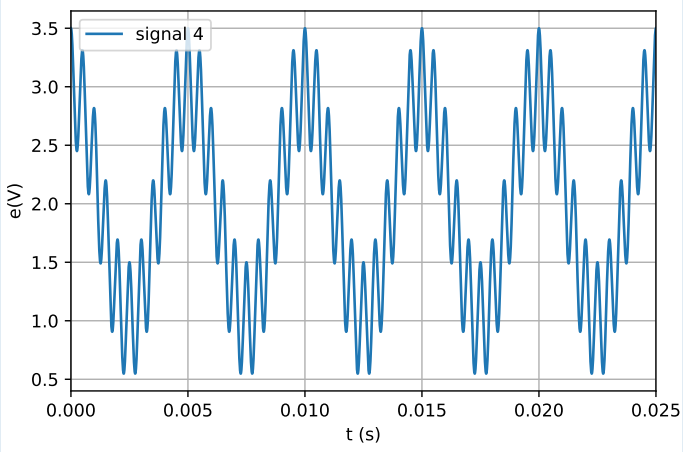


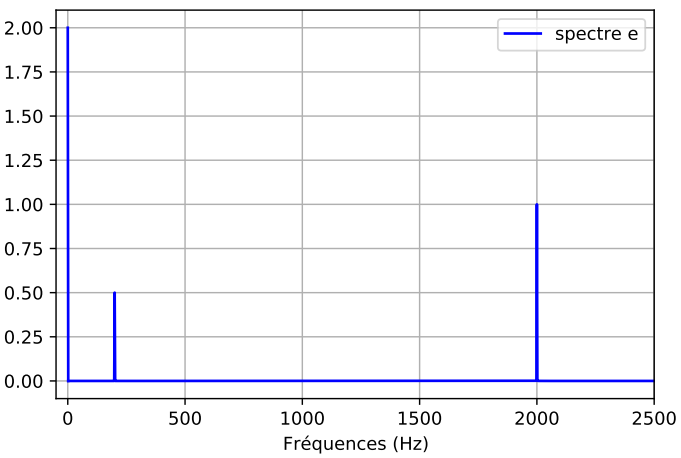


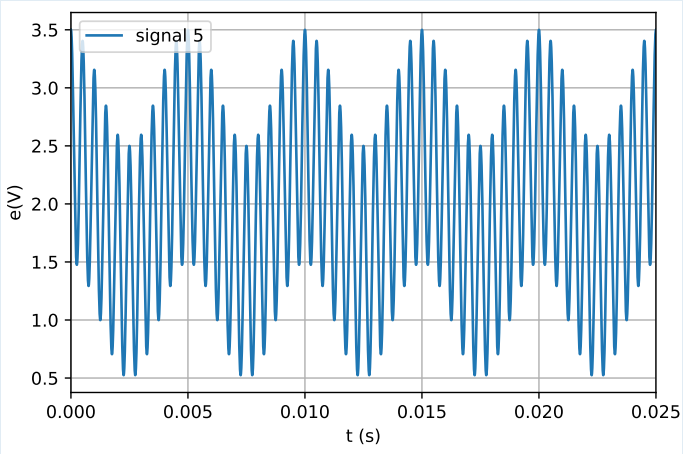


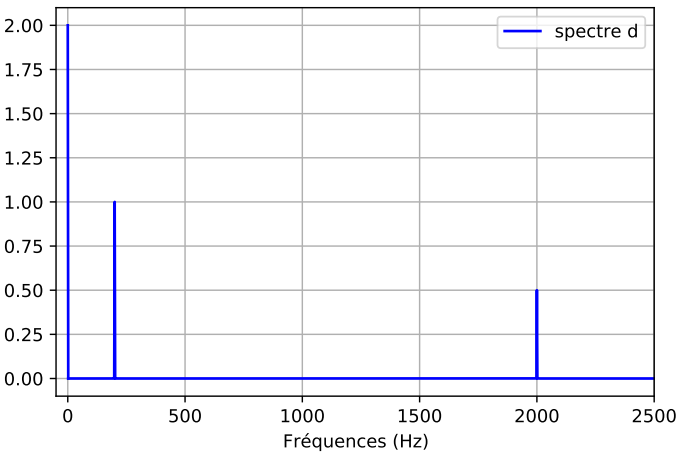
Q2. Associer entre-eux en les comparant les spectres et signaux ci-dessous. Associer à chaque pic des spectres la « partie » du signal temporel correspondant. Enfin, leur attribuer les expressions ci-dessous.

$$e(t) = 2 + 0.5\cos(400\pi t) + \cos(4000\pi t) \quad (1)$$
$$e(t) = 2 + \cos(400\pi t) + 0.5\cos(4000\pi t) \quad (2)$$



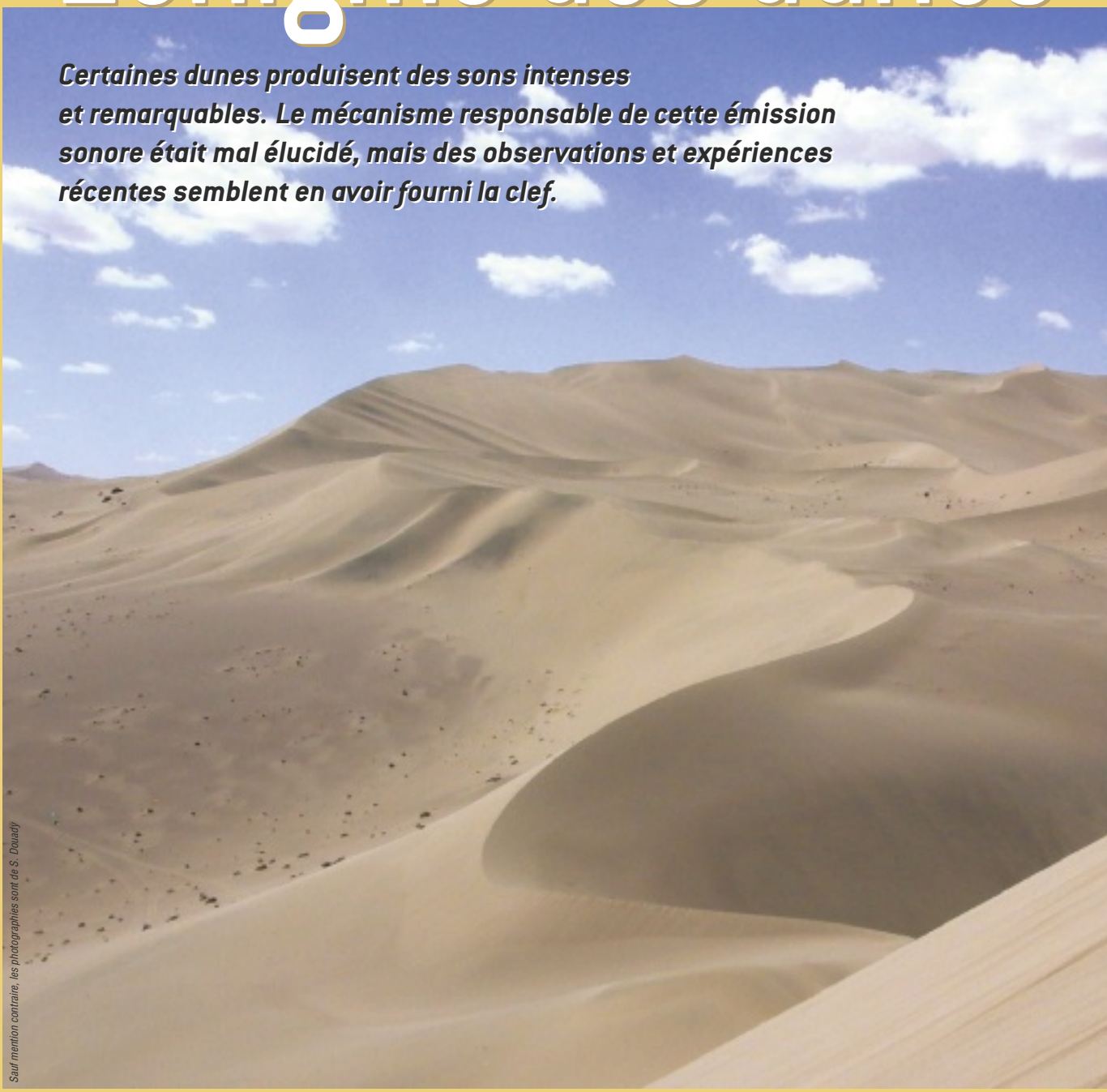






L'énigme des dunes

Certaines dunes produisent des sons intenses et remarquables. Le mécanisme responsable de cette émission sonore était mal élucidé, mais des observations et expériences récentes semblent en avoir fourni la clef.



Sauf mention contraire, les photographies sont de S. Douady

Vous vous promenez, dans le désert, sur une dune de sable. Vous décidez de quitter le sable dur qui recouvre le dos de la dune et de descendre la face la plus pentue, là où se produisent de temps en temps des avalanches. Pendant que vos pieds s'enfoncent et remontent dans le sable mou, celui-ci grogne. Puis, conséquence des avalanches de sable déclenchées par vos mouvements, un autre bruit bien plus remarquable apparaît : un grondement puissant, qui se maintient pendant quelques secondes, voire plusieurs minutes. C'est ce qui arriva en 2001 à notre petite équipe composée de Laurent Quartier, Bruno Andreotti et Pascal Hersen, sous la direction de Stéphane Douady, à l'occasion de nos travaux sur la morphogenèse et la dynamique des dunes du Sud-Ouest marocain. Nous venions de découvrir une dune qui « chante ». L'émission de bruits intenses par certaines dunes est un phénomène connu de longue date, et plusieurs dizaines de sites dans le monde en sont le théâtre. On peut même trouver des enregistrements sur *Internet*, quoique leur écoute ne suscite pas la même émotion que celle ressentie sur le terrain.

Le phénomène des dunes chantantes, déjà mentionné par Marco Polo dans le récit de ses voyages en

chantantes

S. Douady • P. Hersen • A. Manning

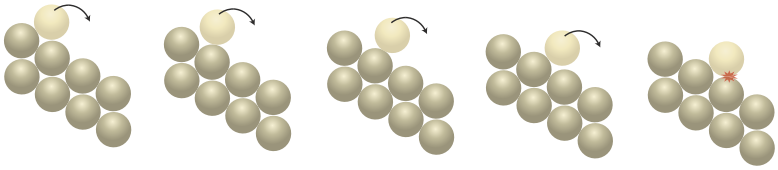
1. Quelques dunes chantantes : la dune Ming Sha Shan (la « montagne de sable qui chante ») près de DunHuang en Chine *(à gauche)*, El Cerro Bramador (le « mont qui brame ») près de Copiapo au Chili *(ci-dessus en haut, la zone de sable chantant étant le triangle gris près du sommet, flèche)*, et la dune de Ghord Lamar, découverte par les auteurs au Sud-Ouest du Maroc *(ci-dessus en bas)*.

Chine *(voir l'encadré page 65)*, est suffisamment énigmatique pour que ses descriptions aient été teintées de surnaturel, d'où une certaine incrédulité vis-à-vis de sa réalité, même encore aujourd'hui.

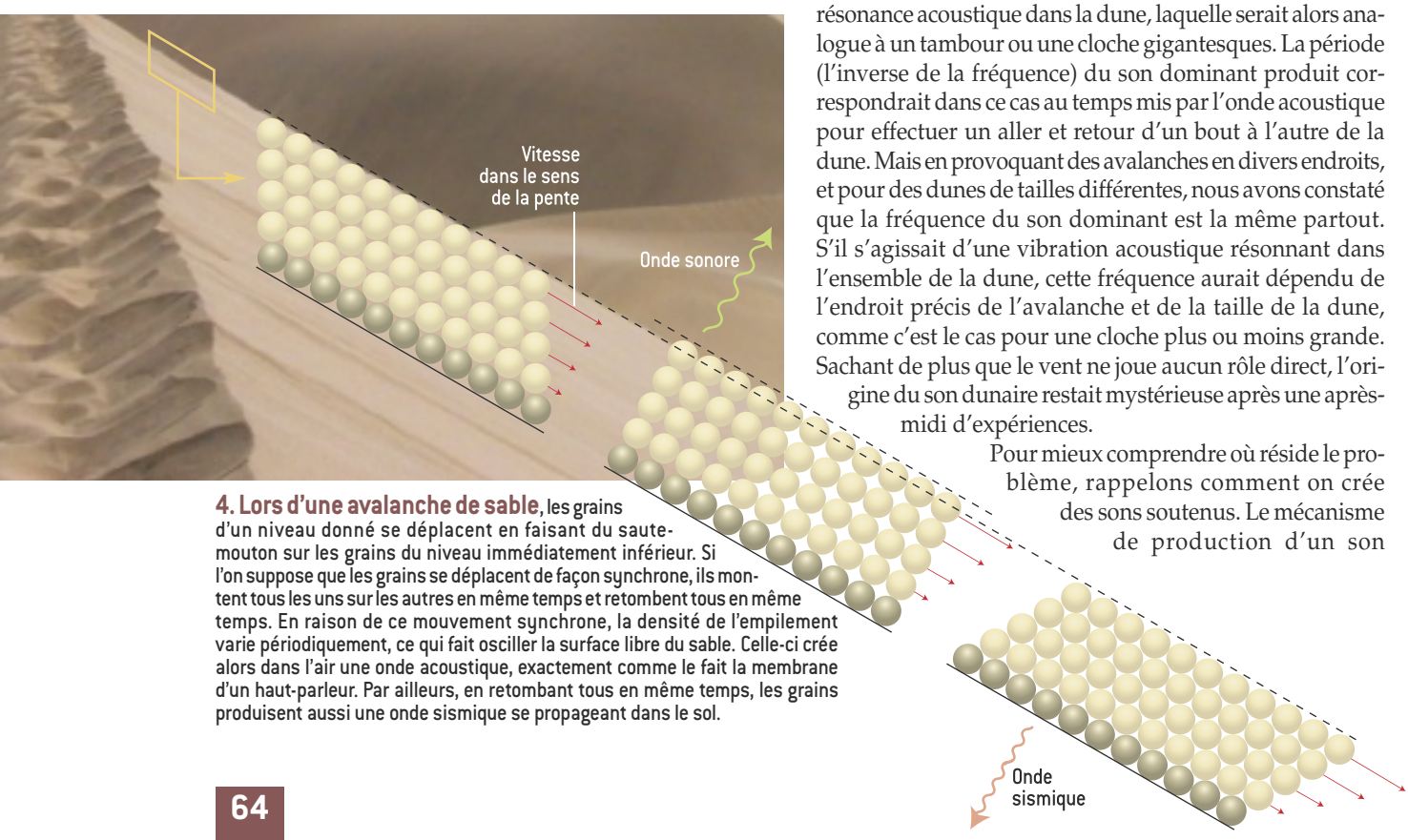
Le son produit par une telle dune fascine et intrigue parce que l'on se sent baigné par lui, et que l'on a du mal à le localiser et à déterminer son origine. Les grognements autour des pieds, bien que surprenants, ressemblent vaguement à ceux entendus lorsqu'on marche avec peine dans de la boue, et ils sont clairement liés au mouvement des pieds. Mais quelle est la cause de ce grondement, puissant et constant ?

L'un d'entre nous (S. Douady) avait lu un article intitulé *La musique des sables* et paru dans le numéro de décembre 1997 de *Pour la Science*. Nous savions ainsi que le phénomène des dunes chantantes restait globalement inexpliqué. Nos observations effectuées au Maroc, puis sur des dunes en Chine et au Chili, ainsi que des expériences réalisées sur le terrain et en laboratoire, nous ont permis de mieux comprendre le mugissement des dunes. Même s'il reste des questions en suspens, nous pensons avoir élucidé, dans ses grandes lignes, le mécanisme responsable. Commençons par décrire quelques-unes des propriétés de ces sons ; nous verrons ensuite quelles sont les principales

2. Sur la face arrière d'une dune, le sable accumulé par le vent au sommet dégringole en avalanches successives. Si l'avalanche est assez épaisse et si le sable a les bonnes propriétés, la dune peut émettre un son puissant. Cette émission sonore ne fait intervenir que la couche supérieure de sable sec et mou, qui repose sur une couche durcie par le vent et parfois humidifiée par des pluies récentes.



3. Le mouvement des grains de sable, assimilés ici à de petites boules, est une sorte de saute-mouton : chaque grain est amené à surmonter un grain de niveau inférieur, et à retomber sur le grain suivant. Dans une avalanche, la durée de ce mouvement est déterminée par l'accélération de la pesanteur et par le diamètre des grains. Dans le cas des sables musicaux, cette durée coïncide avec la période (l'inverse de la fréquence) des sons émis.



4. Lors d'une avalanche de sable, les grains d'un niveau donné se déplacent en faisant du saute-mouton sur les grains du niveau immédiatement inférieur. Si l'on suppose que les grains se déplacent de façon synchrone, ils montent tous les uns sur les autres en même temps et retombent tous en même temps. En raison de ce mouvement synchrone, la densité de l'empilement varie périodiquement, ce qui fait osciller la surface libre du sable. Celle-ci crée alors dans l'air une onde acoustique, exactement comme le fait la membrane d'un haut-parleur. Par ailleurs, en retombant tous en même temps, les grains produisent aussi une onde sismique se propageant dans le sol.

explications proposées et ce qu'indiquent les travaux les plus récents sur la question des sables musicaux.

Certaines propriétés du chant des dunes sont aisément perceptibles. En promenant l'oreille, on se rend vite compte que le son provient seulement du sable qui coule, de l'avalanche naturelle ou déclenchée. Il ne s'agit pas d'un bruit provoqué par le vent, ou par une autre partie de la dune, car l'intensité de ce bruit décroît à mesure que l'on s'éloigne de la zone perturbée par les avalanches.

La fréquence sonore varie peu

Le son émis par les dunes chantantes est continu et de basse fréquence, autour de 110 hertz au Maroc. Il peut être puissant et atteindre 110 décibels, le seuil de douleur étant à 120 décibels – heureusement, sa basse fréquence le rend moins pénible. Comme l'a fait remarquer P. Hersen, dès notre première après-midi sur la dune marocaine, l'ordre de grandeur de l'intensité sonore nous était révélé : en plaçant l'oreille dans le sable pour écouter, le son était assez puissant pour être douloureux.

Le son des dunes peut être « rugueux », et on l'a souvent comparé au grondement de tonnerre, ou plus récemment au vrombissement d'un avion bimoteur. Il peut aussi être très « pur », plus proche d'un chant – Marco Polo évoquait des appels de compagnons – et on l'a dans ces cas comparé au son produit par un instrument de musique (violon basse, didjeridoo, trompe, orgue…).

Comment une avalanche de sable peut-elle produire un tel son ? Dès le début de nos observations, nous nous sommes rendu compte que l'interprétation imaginée à la lecture de l'article de *Pour la Science* n'était pas la bonne : ce n'était pas du sable s'écoulant en plaques et glissant de façon saccadée, tel un pneu qui crisse. Le sable qui coule est en effet très fluide, présente des vagues et est presque turbulent.

Selon une autre hypothèse, l'avalanche exciterait une résonance acoustique dans la dune, laquelle serait alors analogue à un tambour ou une cloche gigantesques. La période (l'inverse de la fréquence) du son dominant produit correspondrait dans ce cas au temps mis par l'onde acoustique pour effectuer un aller et retour d'un bout à l'autre de la dune. Mais en provoquant des avalanches en divers endroits, et pour des dunes de tailles différentes, nous avons constaté que la fréquence du son dominant est la même partout. S'il s'agissait d'une vibration acoustique résonnant dans l'ensemble de la dune, cette fréquence aurait dépendu de l'endroit précis de l'avalanche et de la taille de la dune, comme c'est le cas pour une cloche plus ou moins grande. Sachant de plus que le vent ne joue aucun rôle direct, l'origine du son dunaire restait mystérieuse après une après-midi d'expériences.

Pour mieux comprendre où réside le problème, rappelons comment on crée des sons soutenus. Le mécanisme de production d'un son

éphémère, par percussion, est assez simple : on frappe sur à peu près n'importe quoi et il en sort un son ; tel est le cas avec un piano ou une batterie. Il est plus délicat de créer un son qui se maintient dans le temps. On peut produire un tel son en faisant grincer un archet sur une corde tendue, comme dans un violon, ce qui correspond à des séries de petits glissements par à-coups. Chaque glissement relâche la tension et engendre une onde sur la corde. Lorsque celle-ci revient après un aller et retour, elle favorise le décrochement de l'archet, qui réémet une onde, et ainsi de suite.

Un principe semblable est à l'œuvre dans les instruments à vent. En soufflant sur l'arête du biseau de la flûte, on crée un tourbillon qui entraîne une onde de pression. L'onde émise effectue aussi un aller et retour, et, à son retour, favorise le décrochement d'un nouveau tourbillon. En soufflant sur une anche d'une clarinette, ou entre les lèvres pour une trompette, on crée une onde de pression avant que l'anche ou les lèvres ne se collent et stoppent l'écoulement, et l'onde de retour favorise la réouverture et le passage de l'air. La voix, l'instrument le plus courant, est un mélange des deux : les cordes vocales vibrent un peu comme les lèvres du trompettiste, mais créent aussi des tourbillons comme le biseau de la flûte. Ces ondes aérodynamiques effectuent un aller et retour dans le larynx, la bouche et même les fosses nasales, ce qui détermine leur fréquence et, partant, la hauteur de la voix.

De façon plus générale, un instrument produit un son soutenu en utilisant d'abord une « instabilité » (grincement de l'archet, sifflement de l'arête du biseau, battement de l'anche). En lui-même, ce phénomène n'est pas très régulier, mais l'aller et retour de l'onde ainsi créée et son couplage avec l'instabilité conduisent à l'établissement d'une note pure – c'est-à-dire un son de fréquence bien définie.

Or pour les dunes chantantes, aucun de ces mécanismes ne s'applique. Parmi les nombreuses explications proposées, trois théories sont encore en compétition. La première est défendue par Melany Hunt du *Caltech*, l'Institut de technologie de Californie. Elle reprend l'idée d'une résonance et stipule qu'elle ne s'applique pas à l'ensemble de la dune, mais seulement à la partie sèche et molle constituée par les avalanches les plus récentes.

Précisons en quelques mots cet aspect. Le vent emporte le sable au sommet des dunes et forme des congères, lesquelles s'écroulent en avalanches. Les avalanches s'empilent donc les unes sur les autres, ce qui fait avancer la dune *(voir la figure 2)*. Une avalanche récente laisse une couche de sable peu tassée et molle. Quand le vent tourne, par exemple en hiver, le sable qu'il transporte peut tasser la surface et laisser une couche dure. Les pluies d'hiver tassent également les couches correspondant aux anciennes avalanches.

L'été, lorsque les dunes sont assez sèches pour que les avalanches chantent, on trouve ainsi une couche dure ou humide de sable sous la surface. M. Hunt a mesuré la vitesse du son dans la couche de sable superficielle et molle des dunes du Sud-Ouest des États-Unis. Cette vitesse, assez faible, est d'environ 80 mètres par seconde. En tenant compte de cette valeur, les durées d'aller et retour d'une onde acoustique parcourant l'épaisseur de cette couche molle de sable correspondent bien, en ordre de grandeur, aux fréquences sonores du chant dunaire.

Toutefois, la dune que nous avons découverte au Maroc chante tout au long de l'année. Nous l'avons même fait chanter deux jours seulement après une des rares pluies d'hiver, dès que le soleil a séché suffisamment de sable pour que se produise une avalanche fluide. À l'inverse, en automne, juste avant l'affaiblissement des alizés, la quantité de sable mou est très importante. Or dans tous les cas, la fréquence du son constatée était la même. Autrement dit, l'épaisseur de la couche molle ne joue pas de rôle, ce qui va à l'encontre de l'interprétation de M. Hunt.

Il faut donc revenir au mouvement du sable. Ayant travaillé auparavant sur les avalanches sableuses, nous savions que le sable, malgré son aspect fluide, ne coule pas comme un liquide. Lorsque du sable s'écoule, les grains sont obligés de passer les uns au-dessus des autres, puis de retomber sur ceux d'en dessous *(voir la figure 3)*. La période caractéristique de ce mouvement d'ascension puis de retombée est déterminée par la taille des grains et par la gravité, qui les entraîne. Pour des grains sphériques, on calcule que la fréquence de ce mouvement est à peu près égale à 0,4 fois la racine carrée du rapport entre l'accélération de la pesanteur et le diamètre des grains.

Les grains d'un niveau donné font ainsi du saute-mouton sur les grains du niveau immédiatement inférieur. Ce schéma, qui se répète à l'identique d'un niveau à l'autre, implique que la différence de vitesse (dans la direction de l'écoulement) entre deux monocouches de grains

Les dunes chantantes de Marco Polo (1298)

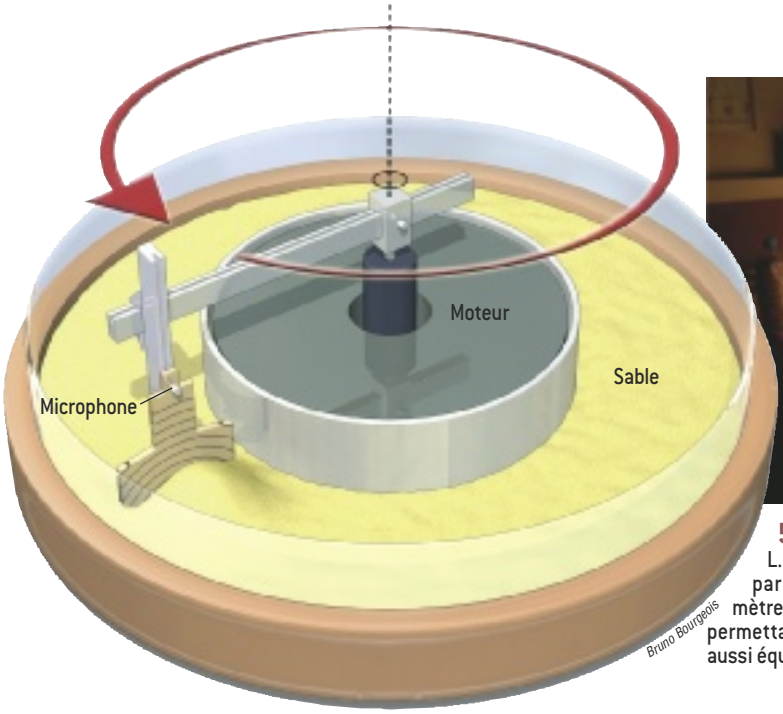
Mais vous dis qu'en traversant ce désert, on y trouve une telle merveille que je vous conterai.

Les gens donnent pour chose manifeste que dans ledit désert habitent nombre d'esprits qui produisent aux voyageurs de grandes et surprenantes illusions pour les faire périr. Et il est vrai que lorsqu'on chevauche de nuit par ce désert, et qu'un des marchands ou autre reste en arrière [...], lors souvent arrive qu'il ouïsse en l'air esprits malins parler en manière que semblent être ses compagnons ; car souventes fois l'appellent par son nom, et souventes fois, lui faisant croire qu'ils sont de ses compagnons, il suit ces voix et sort de la bonne route [...]. Et vous dis encore que la chose advient non seulement la nuit, mais aussi de jour ; des hommes oient ces voix d'esprits, et vous semble maintes fois que vous oyez résonner dans l'air maints instruments de musique et notamment des tambours, et le choc des armes.

[...] Parfois, dans la nuit, on entend comme une ruée de monde en autre direction, et croyant que ce sont les compagnons, les gens vont où ils entendent la marche de la cavalcade [...]. Et on a vu pour qui, lorsqu'ils voyageaient, les esprits ont pris la forme d'une armée et les ont chargés d'assaut ; eux, pensant que ce fussent voleurs, se prirent à fuir, et ayant quitté la bonne route, ne surent plus la retrouver et périrent donc misérablement de faim, car il s'étend à l'infini.

Ainsi, ceux qui ne s'engardent pas bien de ces déceptions parviennent à une fin misérable. Ce sont choses merveilleuses à ouïr, et difficiles à croire, ce que font ces esprits. Et pourtant, c'est comme vous ai dit, et encore bien plus surprenant.

Extrait de Le devisement du Monde, chapitre LVII : De la cité de Lop, & du grand désert (traduction L. Hamblis, 1955)



5. Dans ce dispositif de laboratoire monté par L. Quartier, une partie du sable disposé en anneau est poussée par une palette tournant autour du centre de l'anneau (le diamètre est de un mètre). Sur la palette sont tracés des arcs de cercle permettant de mesurer la quantité de sable poussé. La palette est aussi équipée d'un microphone qui enregistre les sons produits.

en contact est constante, c'est-à-dire la même à travers toute l'épaisseur de la couche de sable en mouvement. Ou encore, de façon équivalente : la vitesse des grains de sable augmente proportionnellement à la distance qui les sépare de la limite inférieure de la couche en mouvement.

Ce qui précède sous-entend que les grains ont tous la même taille. Cela correspond-il à la réalité ? Au sommet d'une grande dune, le vent trie assez bien le sable : il ne parvient pas à déplacer les très gros grains, tandis qu'il entraîne au loin les grains très fins (les poussières du Sahara remontent même jusqu'en Suède ou aux États-Unis…). Nous avons mesuré la taille des grains dans notre dune du Maroc : leur diamètre est de 160 micromètres, à 25 pour cent près. Tous les grains étant à peu près de même taille, ils peuvent avoir le même mouvement. On peut ainsi attribuer les faibles variations (quelques pour cent) de fréquence sonore, constatées en différents points au sein de la même dune, aux différences dans la taille moyenne des grains de sable.

La relation entre le diamètre des grains et la fréquence de leur mouvement de saute-mouton fournit bien la fréquence sonore observée, 110 hertz, à 5 hertz près. Cette relation est également vérifiée pour les quelques autres dunes chantantes que nous avons étudiées en Chine, au Chili ou en Arabie.

Les sables de ces dunes ont d'ailleurs des dons musicaux même en l'absence d'avalanches. En les triturant avec les mains ou les jambes, on peut en tirer différents sons, comme nous l'avons fait avec nos jambes au Maroc – et cela même en laboratoire *(voir la figure 5)*, ce qui prouve que la dune elle-même n'est pas indispensable. En poussant le sable de façon contrôlée, on peut en tirer des notes différentes, sur plus d'une octave. En mesurant le cisaillement imposé (la différence de vitesse imposée entre le haut et le bas de la couche de sable), on vérifie que c'est bien le mouvement des grains les uns par rapport aux autres, ce mouvement de saute-mouton, que l'on entend.

Cependant, comment se fait-il que l'on entende un son ? En effet, on peut souvent créer un écoulement de grains ou déclencher des avalanches sur d'autres dunes que celles dont nous parlons, et cela sans rien entendre. Pourtant, le mouvement des grains est *a priori* le même que dans les sables musicaux…

La différence ne peut provenir que de la cohérence des mouvements granulaires. Chaque grain, quand il saute au-dessus des autres et retombe, émet bien un son ; mais celui-ci peut interférer avec les ondes sonores émises par tous les autres grains. Si tous les grains bougent dans le désordre – bien qu'ils aient tous le même mouvement en moyenne, ils sont aléatoirement décalés dans le temps –, les sons produits se détruisent mutuellement. Dans ce cas, on entend juste un bruit faible si l'on tend bien l'oreille dans un désert très silencieux (sans bruits de vent).

Les grains sont animés d'un mouvement synchrone

En revanche, si tous les grains se mettent à bouger en même temps, de façon synchrone, chaque petit son se superpose aux autres de façon cohérente, et l'on peut obtenir à la fin un son extrêmement puissant. La situation est comparable à celle d'une troupe de soldats qui, en marchant librement, ne produit qu'un petit brouhaha, alors que si elle marche au pas, elle produit un son régulier et puissant.

L'idée que, lors d'une avalanche, les grains bougent de façon synchrone nous a été soufflée par la vue d'un film réalisé par le physicien François Chevoir, du Laboratoire central des ponts et chaussées. Ce film portait sur un écoulement de billes métalliques dans un canal, et faisait apparaître que les billes montent et descendent collectivement. Il en serait de même pour une avalanche de sable, la surface de la couche de sable en mouvement s'élevant et s'abaissant de façon périodique *(voir la figure 4)*. Une telle oscillation de la surface suffit pour émettre directement un son dans l'air, exactement comme un haut-parleur dont la membrane vibre et communique sa vibration à l'air ambiant.

Comment expliquer la puissance sonore émise par une dune chantante ? En supposant juste que les grains montent et descendent par un mouvement de saute-mouton, on en déduit facilement le mouvement de la surface, et donc la puissance émise, en fonction du nombre de couches de grains qui effectuent ce mouvement de façon synchrone. On constate avec surprise qu'il suffit d'une couche épaisse d'une vingtaine de grains et d'un mouvement global de l'ordre de grandeur de la taille d'un grain (une fraction de millimètre) pour engendrer une puissance de 110 décibels. Autrement dit, la « membrane » des haut-parleurs dunaires ne vibre qu'avec une très faible amplitude.

Le son audible n'est pas la seule conséquence du mouvement synchrone des grains. Comme les grains retombent sur leurs voisins du dessous en même temps, l'ensemble des chocs correspondants induit dans la dune une onde sismique (c'est-à-dire une onde sonore se propageant dans le sol, *voir la figure 4*). Cela rappelle l'onde sismique produite le 7 septembre 2001 par environ un million d'écoliers britanniques, à qui l'on avait demandé de sauter tous à la même heure de leur tabouret : l'onde sismique ainsi engendrée, bien que faible, a pu être détectée par les géologues britanniques.

Dans les dunes, l'onde sismique créée par la retombée des grains de sable est très perceptible. Lorsqu'une avalanche chante, on ressent directement la vibration dans les pieds. Dès que l'on s'éloigne un peu, on perçoit même plus facilement la vibration du sol que l'onde sonore émise directement dans l'air.

Maintenant que le mouvement synchronisé des grains a été reconnu comme étant à l'origine du chant dunaire, reste une question essentielle : pourquoi les grains auraient-ils un mouvement synchrone plutôt qu'un mouvement désordonné comme à leur habitude ?

C'est sur ce dernier point qu'un membre de notre équipe a introduit une deuxième interprétation du phénomène des dunes chantantes. Partant de nos observations que le mouvement synchrone des grains produit une onde sismique dans la dune, cette théorie inverse les rôles : selon elle, même désordonnés, les chocs des grains induiraient une onde sismique qui, en faisant vibrer le sol, ferait aussi vibrer les grains et en retour les forcerait à se synchroniser, les grains tendant à caler leur saut avec le mouvement du sol.

Cette explication pose problème, car il est difficile d'imaginer comment des chocs désordonnés peuvent conduire à une onde cohérente dans la dune. Le mouvement désordonné produit un bruit semblable à celui des vagues ou d'un torrent : bien qu'il contienne la bonne fréquence (la fréquence moyenne du mouvement de saute-mouton des grains), il en contient aussi beaucoup d'autres *(voir la figure 6)*. À moins, bien sûr, de revenir à l'explication de M. Hunt et d'invoquer une résonance qui sélectionne la bonne onde sismique parmi toutes celles présentes…

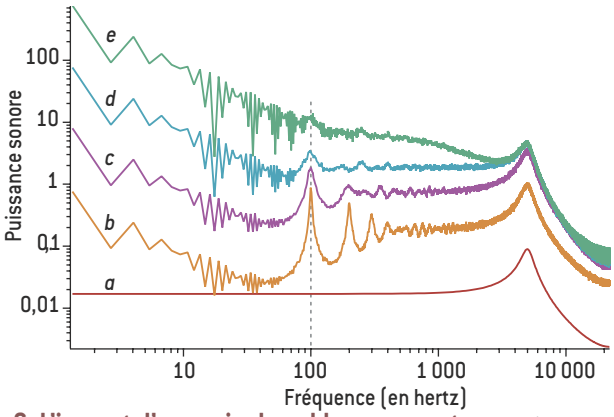
Comme nous sommes capables de faire des gammes en laboratoire, en l'absence de dune, nous nous sommes tenus à notre première idée, c'est-à-dire que le mouvement synchrone des grains est responsable de l'onde sismique. Pour expliquer le mouvement synchrone, nous sommes partis d'une observation simple : même sur une dune chantant aussi bien que notre dune marocaine, toutes les avalanches ne chantent pas. Lorsque l'épaisseur de l'avalanche sableuse est trop faible, aucun son n'est produit. De même, au laboratoire, toutes les poussées de sable ne produisent pas un son : il faut pousser au-dessus d'une certaine vitesse seuil. Cela nous a amenés à supposer l'existence d'une résonance qui n'a pas lieu dans toute la dune, mais seulement dans l'épaisseur de la couche en mouvement.

En quoi consiste cette résonance ? Considérons, au sein de la couche de sable en mouvement, un grain qui tombe sur les grains de dessous et émet une onde sonore à cet instant. Cette onde sonore se propage jusqu'à la surface libre, où elle est réfléchie, et revient. Si le retour de l'écho, avec la même phase ondulatoire, coïncide avec le moment où le grain a achevé un nouveau saut, c'est-à-dire si l'aller et retour de l'onde a duré un cycle de saute-mouton, on est dans une situation de résonance *(voir la figure 7)*. Sinon, l'écho sonore pousse légèrement le grain lui-même et finit ainsi par réguler son propre mouvement ainsi que celui des grains voisins, jusqu'à atteindre l'état de résonance. Il y aurait ainsi une autosynchronisation, un peu comme les applaudissements pour réclamer un bis à la fin d'un concert : les mouvements des grains s'autosynchroniseraient avec leurs propres échos sonores.

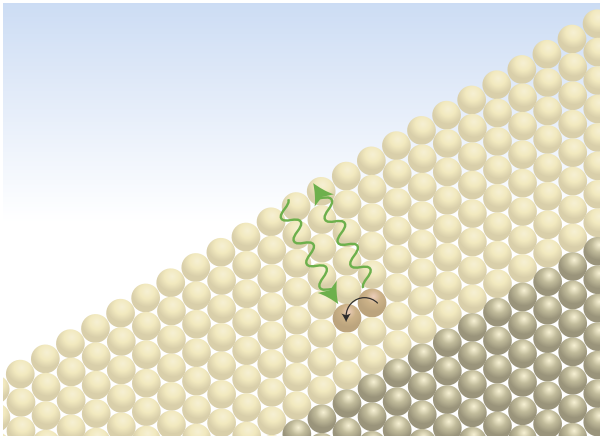
Une résonance explique la synchronisation

Contrairement au cas des instruments de musique, la résonance n'est pas là pour fixer la fréquence sonore, puisque celle-ci est déterminée par le mouvement des grains (lui-même régi par la gravité ou par les poussées de la main), mais seulement pour que les grains se synchronisent entre eux et émettent ainsi un son cohérent.

Cette interprétation a le mérite d'expliquer que seules les avalanches assez épaisses produisent un son : durant un cycle de saute-mouton, l'onde sonore doit effectuer un nombre entier de cycles ondulatoires, d'où l'on déduit que la profondeur minimale pour avoir une résonance est



6. L'impact d'un grain de sable sur un autre produit un son dont la fréquence dominante est de quelques kilohertz *(a)*. Si ce grain a des collisions à une certaine fréquence, on voit apparaître un autre pic à cette fréquence (ici 100 hertz, *b*). En considérant des grains indépendants et de plus en plus nombreux (10 grains pour *c*, 100 pour *d*, 1 000 pour *e*), les pics s'estompent : ils sont noyés dans un bruit incohérent. Ces résultats de simulations numériques indiquent qu'il doit y avoir, dans les sables musicaux, une synchronisation des grains pour que le son global fasse apparaître une fréquence bien définie.



7. Lors de son saute-mouton, un grain émet une onde acoustique à chaque impact avec les grains de dessous. Si, après s'être réfléchie à la surface libre du sable, cette onde revient sur le grain (avec la même phase) au moment même où il achève son saut, on a une situation de résonance. La synchronisation du mouvement des différents grains, dans les avalanches musicales, résulterait de cette résonance qui ne se produit que si l'épaisseur de la couche de sable en mouvement est suffisante.

égale au quart de la longueur d'onde sonore (la réflexion introduit un déphasage d'un quart de longueur d'onde). On montre que cela correspond aussi à ce que la vitesse des grains à la surface du sable dépasse un certain seuil (le quart de la vitesse du son dans le sable), comme on l'observe dans les expériences sur le terrain ou en laboratoire.

Cette interprétation repose indirectement sur la vitesse du son, qui détermine la durée d'aller et retour de l'onde sonore dans la couche de sable en mouvement. Et la condition de résonance stipule que ce temps doit être égal à la période de mouvement des grains (fixée par la gravité ou par le mouvement de la main). La mesure du seuil d'épaisseur des avalanches sur la dune du Maroc, ainsi que la mesure du seuil de vitesse pour le même sable en laboratoire s'accordent pour donner la même vitesse du son, ce qui est en faveur de la théorie. Mais on obtient une vitesse du son étonnamment basse, de l'ordre de un mètre par seconde seulement. Une telle valeur est-elle raisonnable ?

Seuls les grains vernis chantent

Audrey Manning nous fit remarquer à ce propos qu'il devrait y avoir quelque chose de particulier dans ces sables, puisque toutes les dunes ne chantent pas, et même celles qui chantent le font plus ou moins bien. D'après nos observations, le record de facilité du chant est détenu par une dune du Sud-Est du sultanat d'Oman, suivie de près par celle du Maroc, puis par la mer de dune de Copiapo au Chili. Pour les autres dunes, tels le fameux Cerro Bramador (le « mont qui brame ») de Copiapo décrit par Darwin ou l'aussi célèbre Ming Sha Shan (« montagne de sable qui chante ») de Dung-Huang, en Chine, il est déjà plus difficile d'obtenir un son. Ça l'a été encore plus dans le désert chinois de Badain Jirin où, pour produire un son, plusieurs personnes ont dû pousser ensemble le plus de sable possible.

Ces différences seraient simplement dues à des vitesses de son différentes. Si la vitesse du son est faible, il est facile d'atteindre la condition de résonance car, dans ce cas, il suffit d'une petite épaisseur de sable qui coule. Plus la vitesse du son est élevée, plus l'épaisseur nécessaire pour atteindre la condition de résonance est importante.

Pour confirmer notre théorie, ou pour l'infirmer, il faut donc mesurer directement la vitesse du son dans ces différents sables, en situation d'écoulement. Ces travaux sont en en cours et devraient livrer bientôt leurs résultats.

En attendant, continuons à nous demander ce qui fait la particularité de ces sables. Leur tri par le vent et leur forme arrondie, due à leur longue histoire mouvementée, ne suffisent pas à leur conférer des propriétés sonores : d'autres sables aussi bien triés et arrondis ne chantent pas. Et ces grains sont capricieux car, non seulement ils ont besoin d'une grande sécheresse et d'être dépourvus de poussières pour chanter, mais, en plus, ils s'épuisent. Ainsi, le sable de la dune marocaine, après avoir été trituré pendant un mois au laboratoire, a fini par perdre sa voix.

Comment expliquer cela ? Avec Philippe Walter, du Centre de recherche et de restauration des musées de France, nous avons remarqué que ces grains sont recouverts d'un dépôt particulier, une sorte de vernis composé notamment de silice. Cette « glaçure du désert », qui s'observe aussi sur les cailloux alentours, s'abrase avec l'usage. Or nous avons réussi à reconstituer ce vernis en reproduisant au laboratoire certaines conditions auxquelles sont soumis les sables chantants, telles que la proximité de lacs de sel. Cela a redonné toute sa voix à du sable rendu aphone par l'usure. Le rôle du vernis est ainsi démontré !

Ce vernis peut avoir un lien direct avec la vitesse du son, car le son est surtout transmis par les contacts entre grains. Étant mou, le vernis peut ralentir considérablement la vitesse du son. Un phénomène similaire intervient peut-être pour les sables des plages (telles que celles des Landes, ou du Massachusetts) qui couinent lorsqu'on marche dessus, mais cela reste à étudier.

La clef du mystère du chant des dunes et du sable musical se trouverait ainsi dans un autre mystère, celui d'une vitesse du son très faible… L'émulation scientifique et les prochaines expériences départageront sans doute les différentes hypothèses, de façon à donner une explication définitive à ce phénomène. Toutefois, même expliqué, le phénomène des dunes chantantes restera toujours aussi envoûtant à ceux qui auront la chance de l'entendre.

Stéphane DOUADY, directeur de recherches au CNRS, travaille au Laboratoire Matière et systèmes complexes de l'Université Paris 7. **Pascal HERSEN** est actuellement postdoctorant au Centre de génomique de l'Université Harvard, aux États-Unis. **Audrey MANNING** est preneuse de son.

Auteurs & Bibliographie

S. DOUADY *et al.*, *The song of the dunes as a self-synchronized instrument*, http://arxiv.org/abs/nlin.AO/0412047

B. ANDREOTTI, *The song of dunes as a wave-particle mode locking*, in *Physical Review Letters*, vol. 93, n° 238001(4), 2004.

R. A. BAGNOLD, *The physics of blown sand and desert dune* (2e édition, 1954), Dover Publications, 2005.

www.lps.ens.fr/~hersen/

www.lps.ens.fr/~douady/SongofDunesIndex.html