



physiquepourtous.unistra.fr

Écouter, regarder l'emprise des sens

Pierre Gilliot



Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg

La physique du son et de la lumière ?

- Comment nos sens appréhendent le monde et le façonnent ?
- « Voir » le monde ? Quels sont les processus par lesquels passe notre perception du réel ?
- Que voient les mouches ? Qu'entendent les chauve-souris, les chiens ?
- Qu'est ce le monde sub-micronique ? Pourquoi les schémas mentaux que forgent nos sens nous posent tant de problèmes pour appréhender le nanomonde de la physique quantique où « voir » n'a plus de sens ?

Arts et sciences

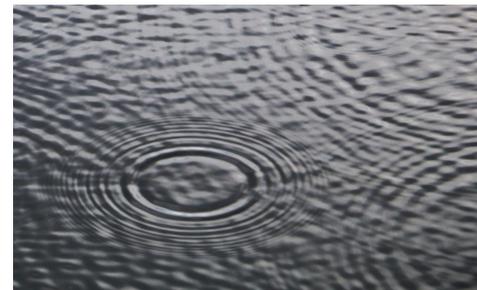
- Comprendre les mécanismes physiques qui sont mis à contribution dans l'ouïe et la vue
 - avec l'ambition d'aller un peu au-delà des frontières de la physique en allant picorer dans l'art, la biologie et des mathématiques
- ... donc soyez indulgents

Des maths ...

- fonction
 - sinus et cosinus
 - logarithme
- transformée de Fourier

Ondes & vibrations - la vision et l'ouïe

mardi 21 novembre



PLAN

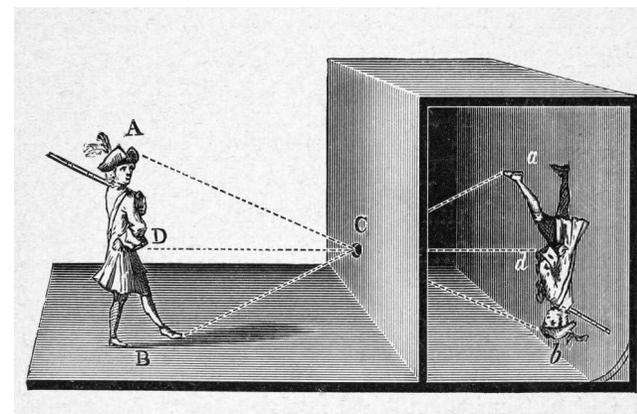


Spectres - des couleurs et des notes

mardi 28 novembre

Espace - relief & perspectives

mardi 5 décembre



Audio et vidéo - la reproduction électronique des sons et des images

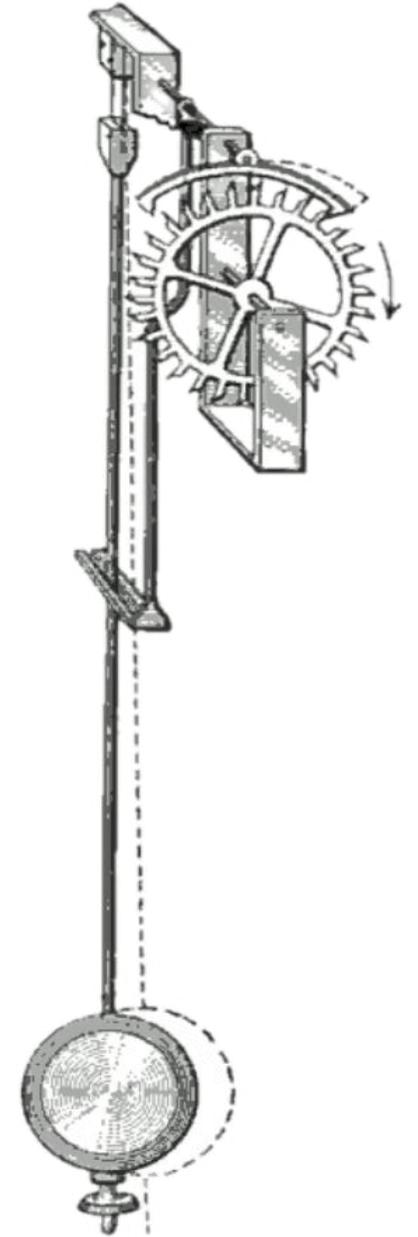
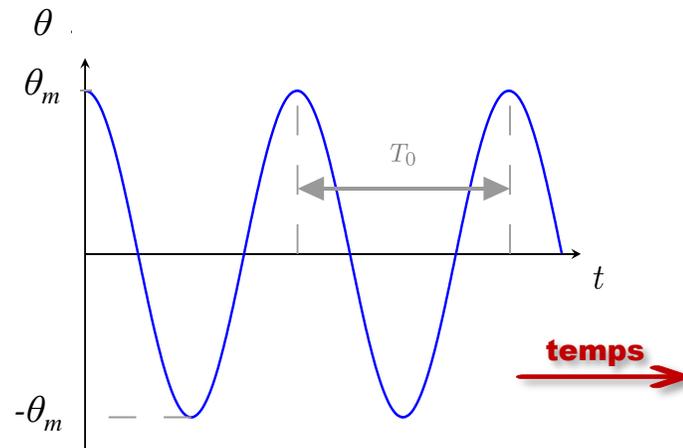
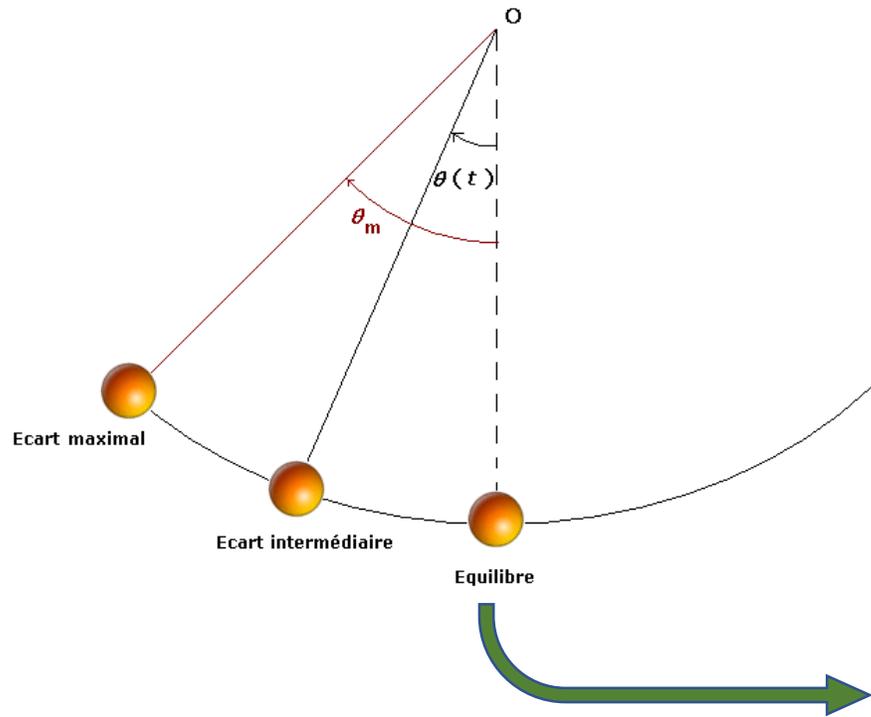
mardi 12 décembre

Écouter, regarder
-
l'emprise des sens

**Les vibrations
et les ondes**
vision et ouïe

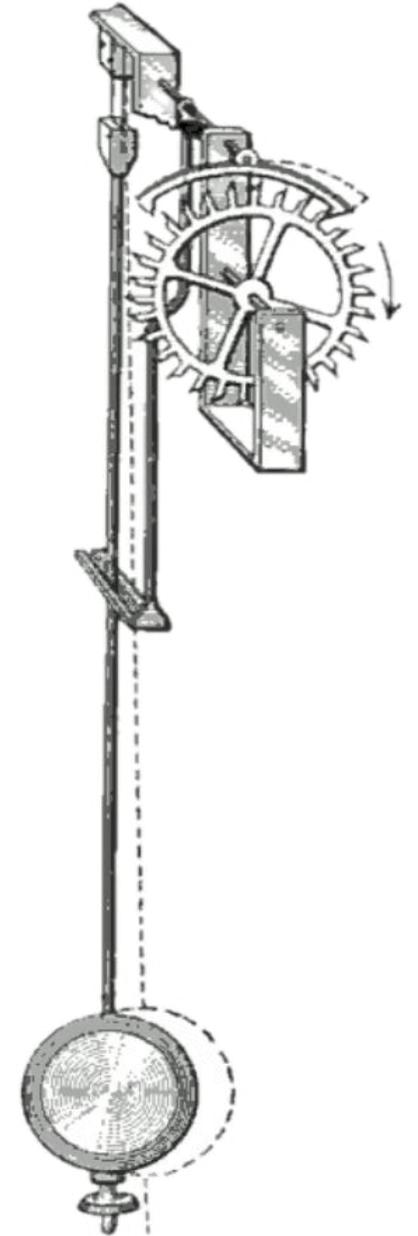
Vibrations

oscillateurs et pendules

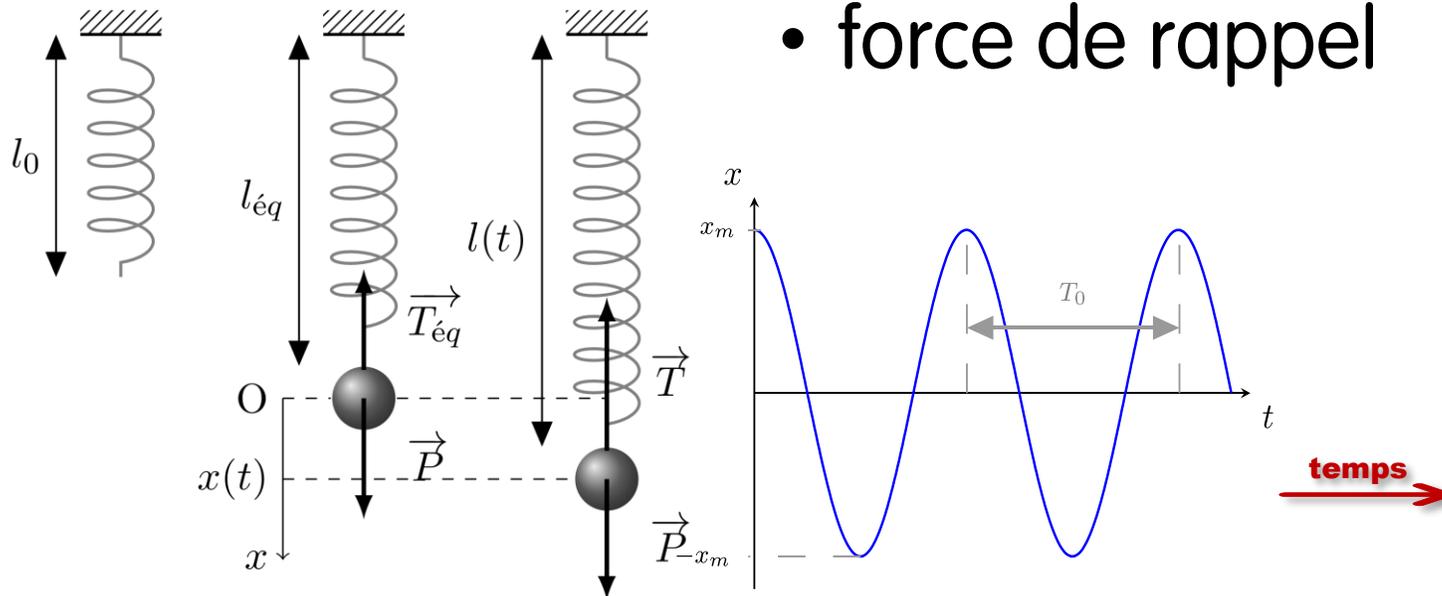


Vibrations

oscillateurs et pendules



- écart par rapport à équilibre
- force de rappel



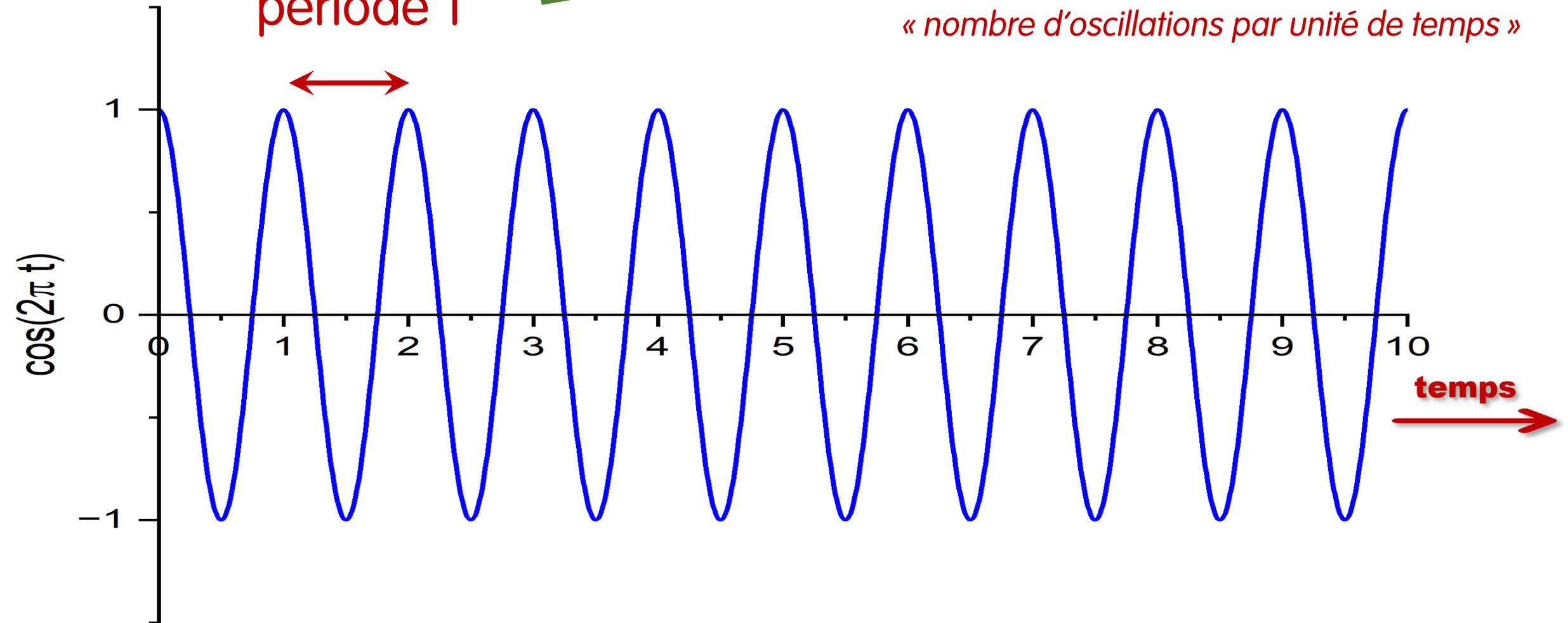
Vibrations

fréquence :

$$\nu = 1/T$$

« nombre d'oscillations par unité de temps »

période T



Vibrations

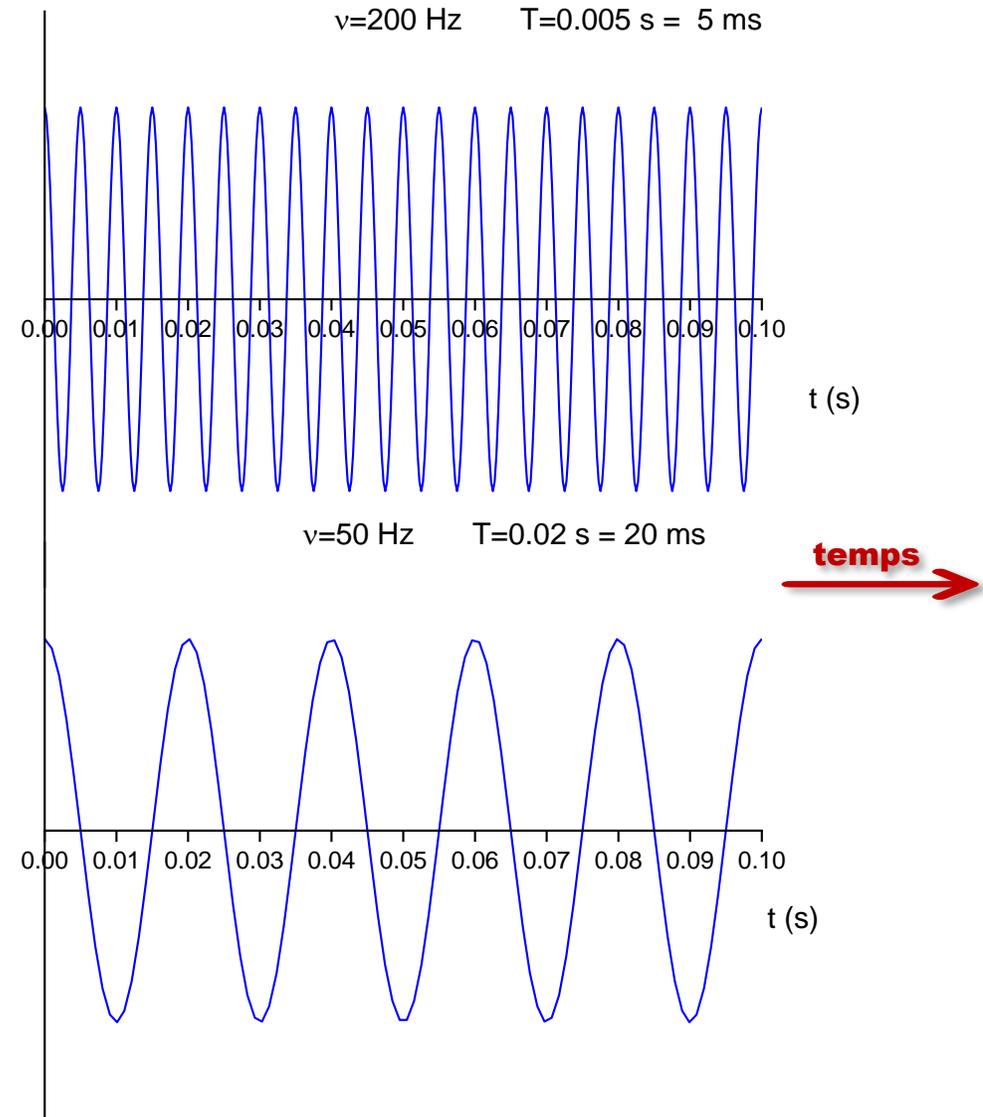
période T

« durée d'une oscillation »

fréquence :

$$\nu = 1/T$$

« nombre d'oscillations par unité de temps »



Vibrations

oscillateurs et pendules

Musique :

- hautbois clarinette : anche (lame de roseau)
- accordéon, harmonium, harmonica : lame métallique
- trompette : lèvres de l'instrumentiste
- violon, piano, guitare : corde



Vibrations

oscillateurs et pendules

Oscillateur à ressort :

période $T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$

fréquence $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$

Pendule :

période $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

fréquence $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$

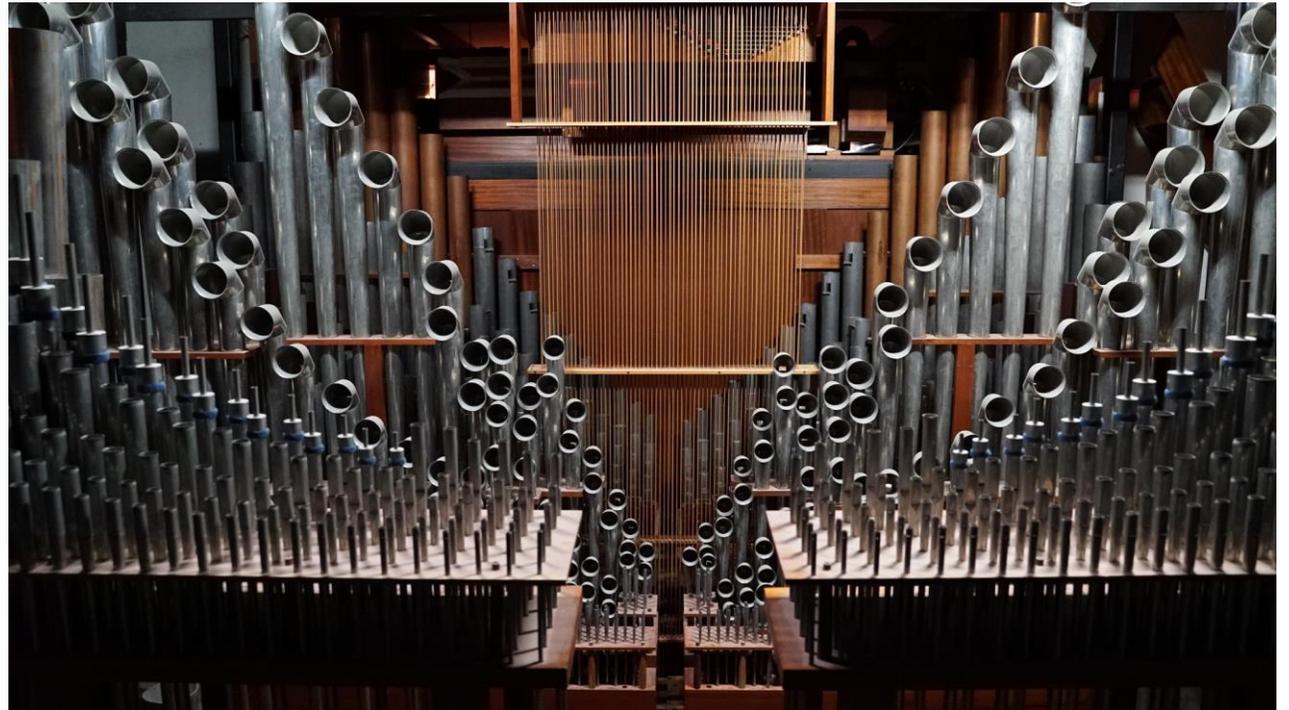
1m → 2s

Vibrations



Accord d'un instrument :

- instrument à corde : longueur, section & tension de la corde
- instrument à vent : longueur du tuyau



Vibrations – fréquences typiques

unité : le Hertz, nombre de périodes par seconde

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

Sons

- fréquences
de 20 Hz à 20 000 Hz
- périodes
de 5 centièmes de
seconde
à 50 microsecondes

Lumière

- fréquences
de 375 THz à 650 THz
- périodes
de 2,7 fs à 1,3 fs

1 THz = 10^{12} s, mille milliards de Herz

*1 fs = 10^{-15} s, un millionième de
milliardième de seconde*

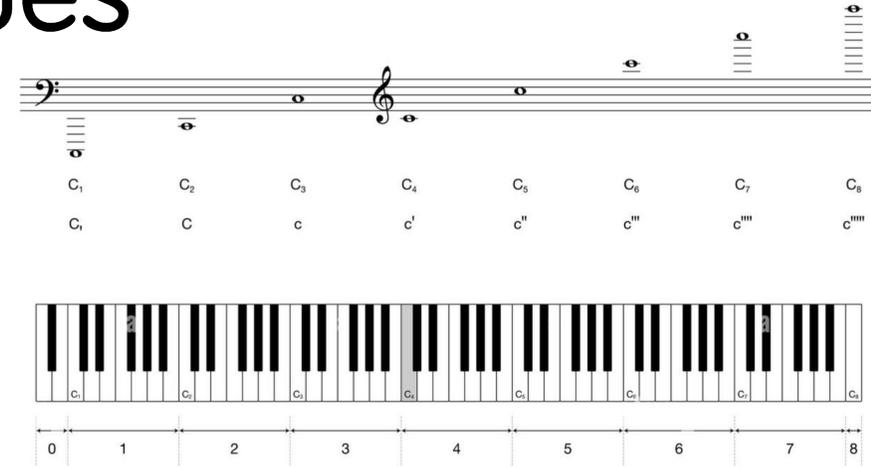
Vibrations – fréquences typiques

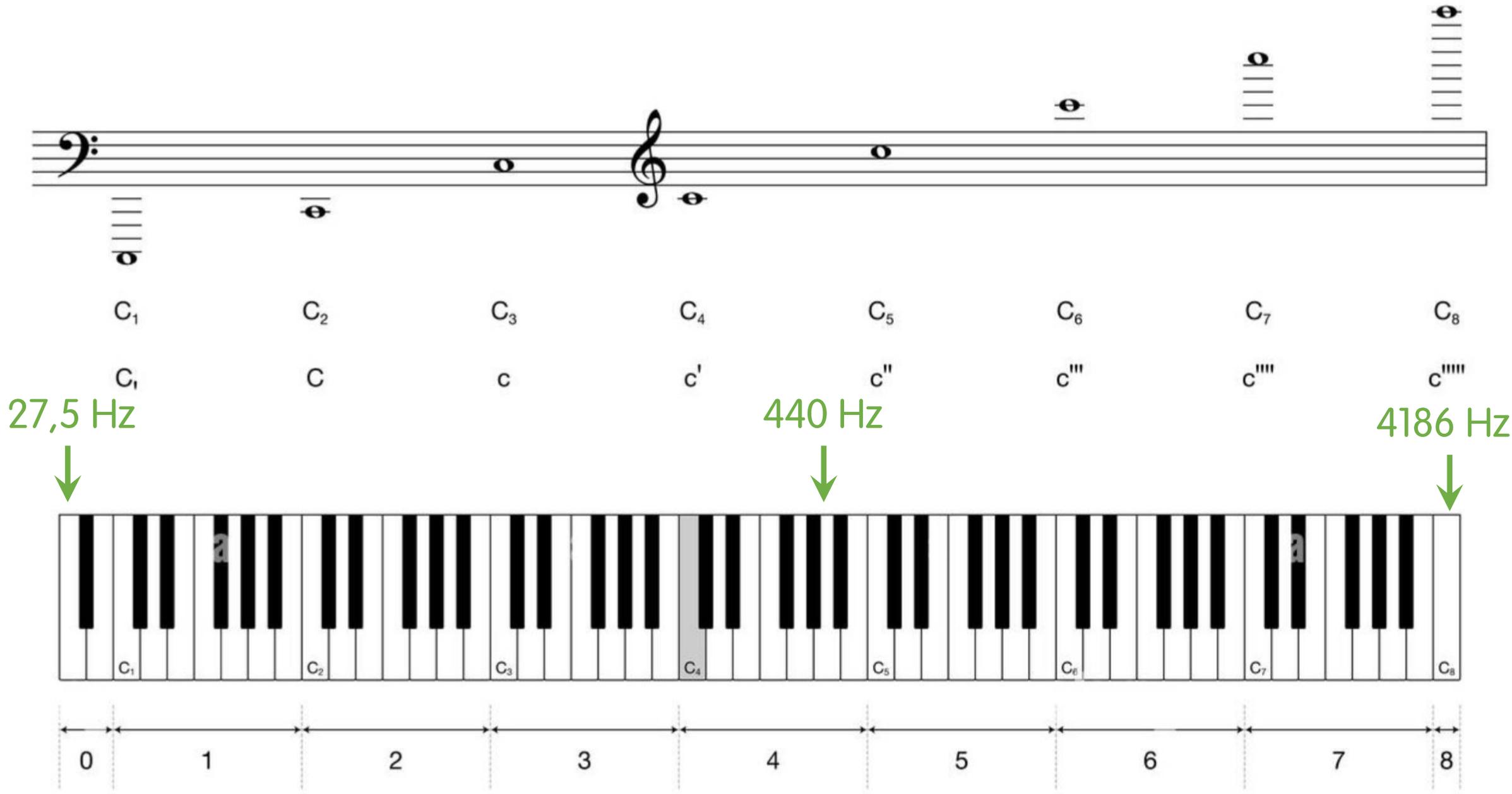
unité : le Hertz, nombre de périodes par seconde

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

- La fréquence donne la hauteur du son
de 20 Hz à 20 000 Hz
des sons très graves aux sons très aigus

- La fréquence donne la couleur de la lumière
de 375 THz à 650 THz
de la couleur rouge à la couleur bleue





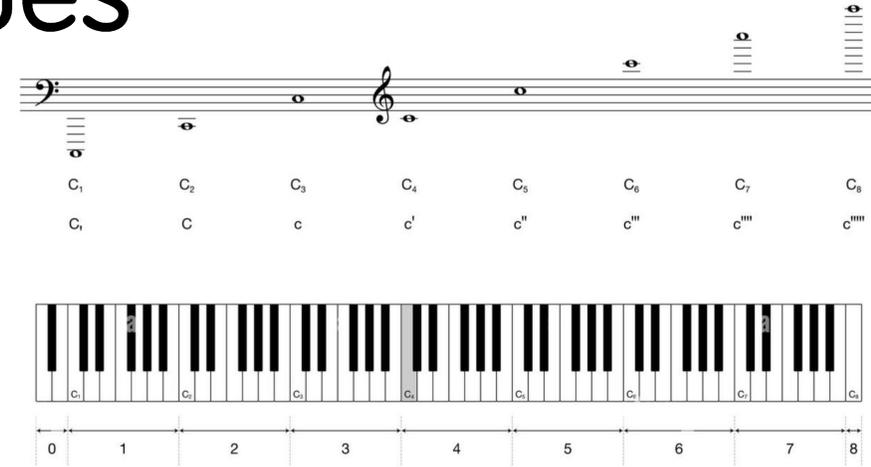
Vibrations – fréquences typiques

unité : le Hertz, nombre de périodes par seconde

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

- La fréquence donne la hauteur du son
de 20 Hz à 20 000 Hz
des sons très graves aux sons très aigus

- La fréquence donne la couleur de la lumière
de 375 THz à 650 THz
de la couleur rouge à la couleur bleue



Vibrations – fréquence

unité : le Hertz, nombre de pé

- La fréquence donne la hauteur de 20 Hz à 20 000 Hz des sons très graves à

- La fréquence donne la couleur de 375 THz à 650 THz de la couleur rouge à



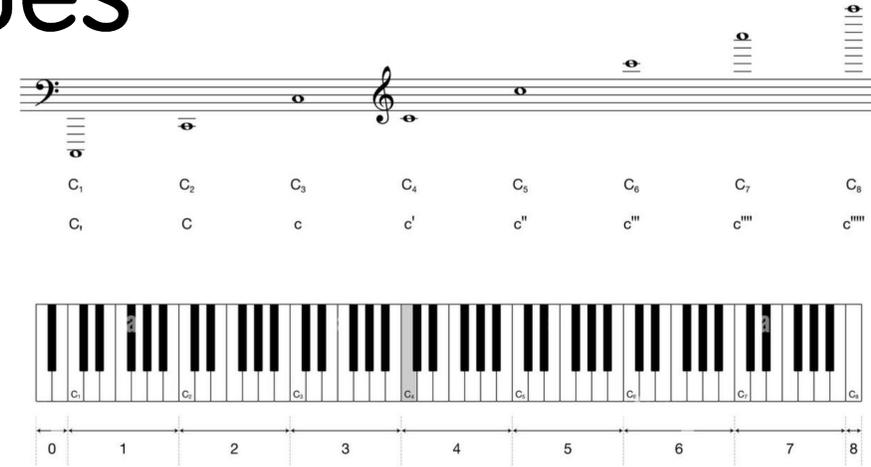
Vibrations – fréquences typiques

unité : le Hertz, nombre de périodes par seconde

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$$

- La fréquence donne la hauteur du son
de 20 Hz à 20 000 Hz
des sons très graves aux sons très aigus

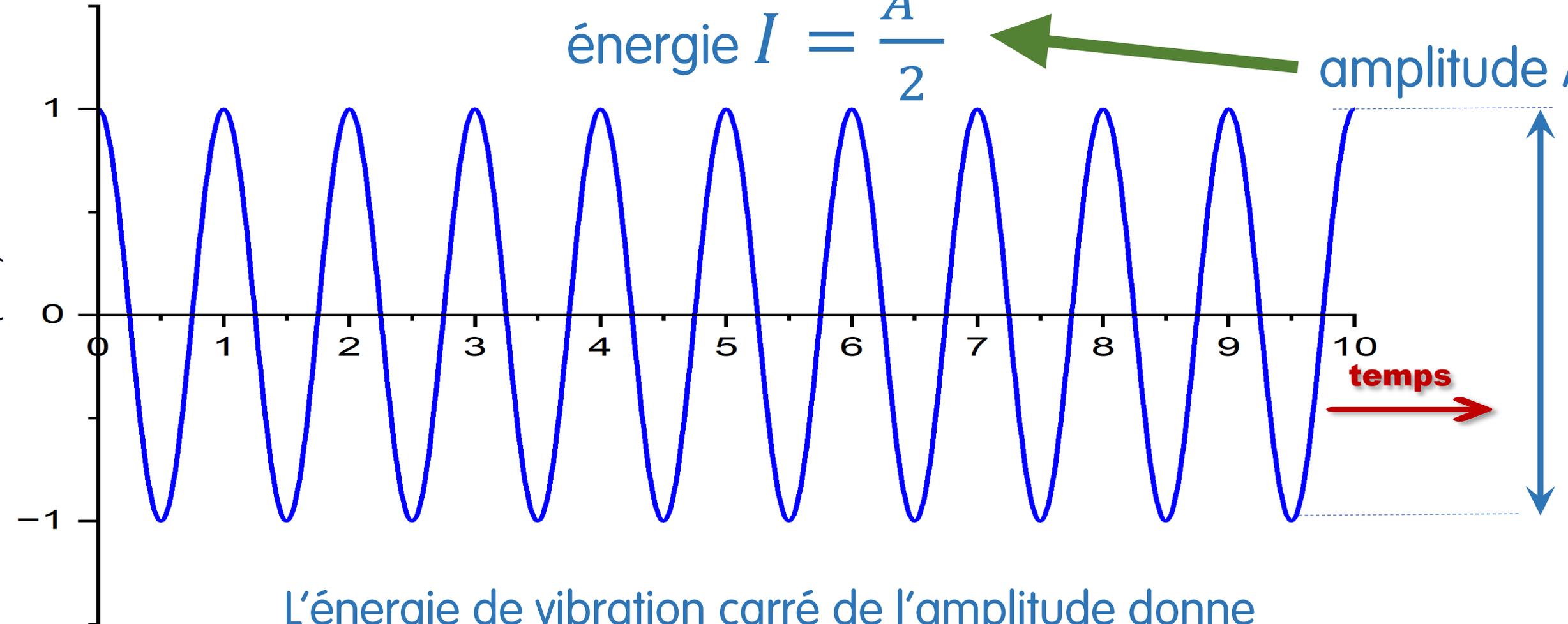
- La fréquence donne la couleur de la lumière
de 375 THz à 650 THz
de la couleur rouge à la couleur bleue



Vibrations – amplitude

$$\text{énergie } I = \frac{A^2}{2}$$

amplitude A



L'énergie de vibration carré de l'amplitude donne
l'intensité sonore et l'intensité lumineuse

Vibration ou ondes ?

Mais de quoi parle-t-on ?

Le son et la lumière ne sont-ils pas des

« ondes »

et non des « vibrations »

Qu'est-ce qu'une onde ?

Ondes ...

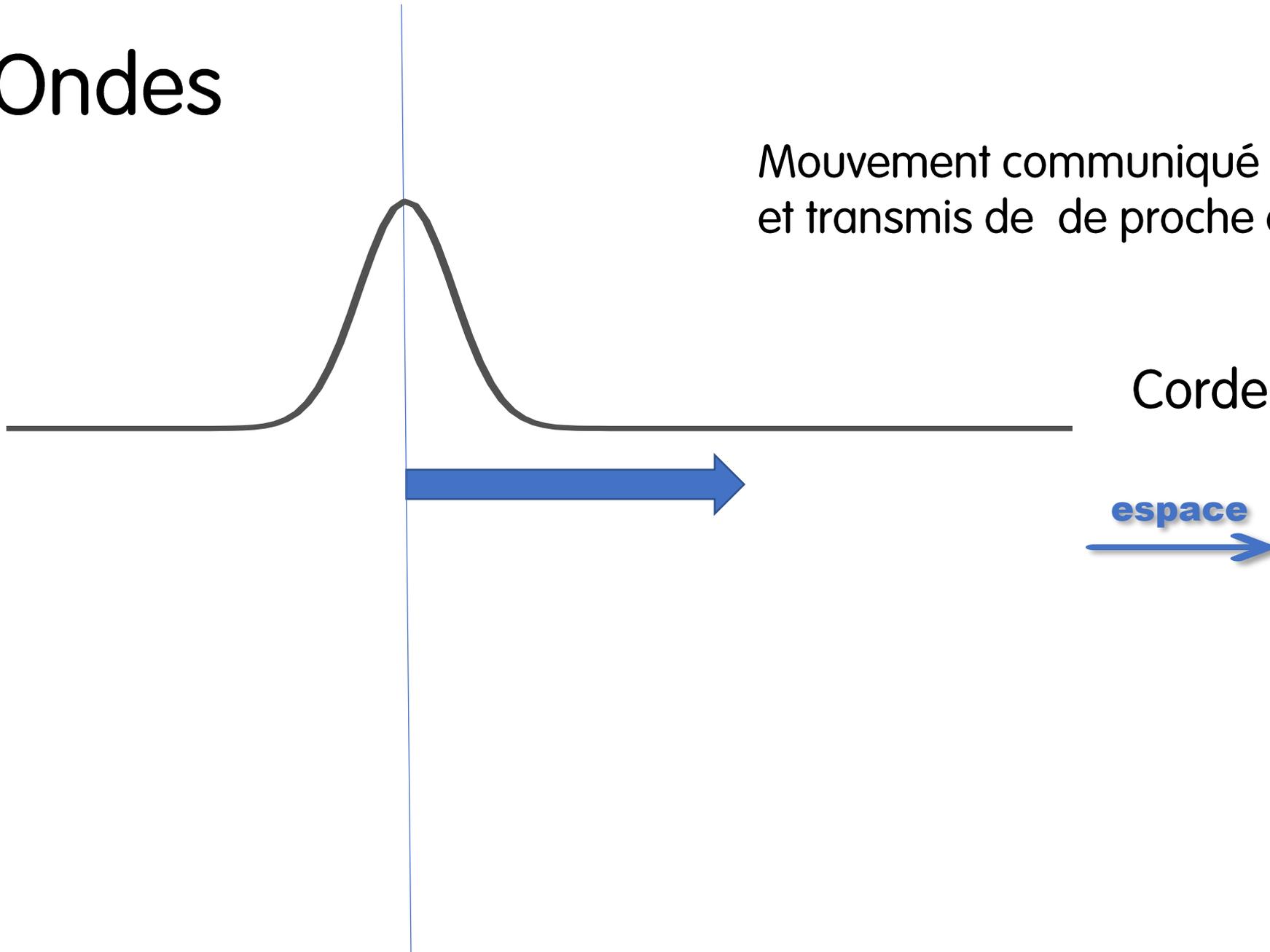
- exemple : une gola dans un stade

- transmission de proche en proche
- pas de transport de matière
- mais transport
 - d'énergie
 - d'information

Ondes

Mouvement communiqué au voisin
et transmis de proche en proche

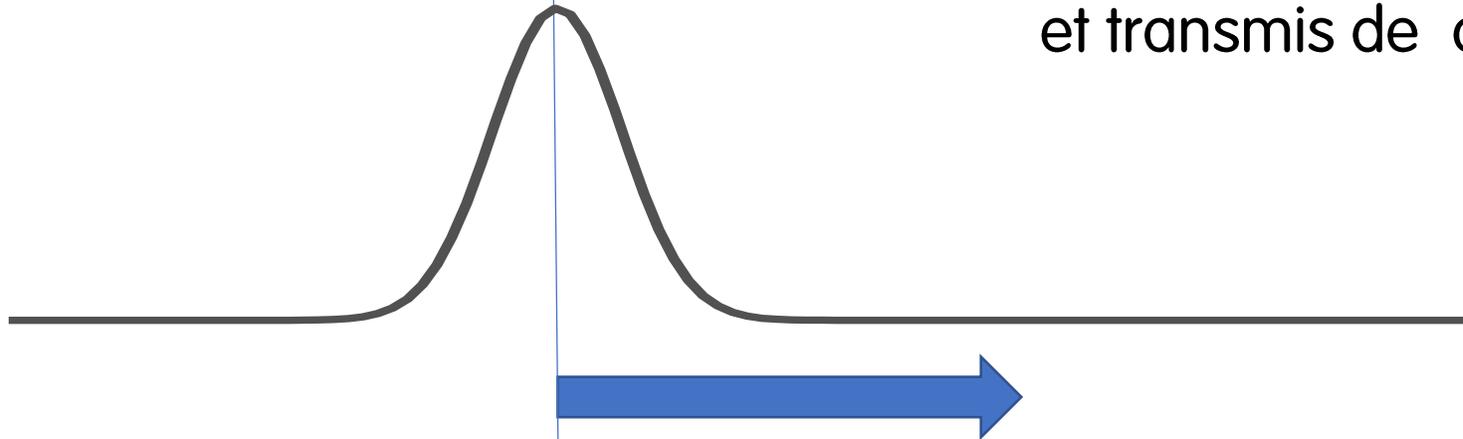
Corde : tension



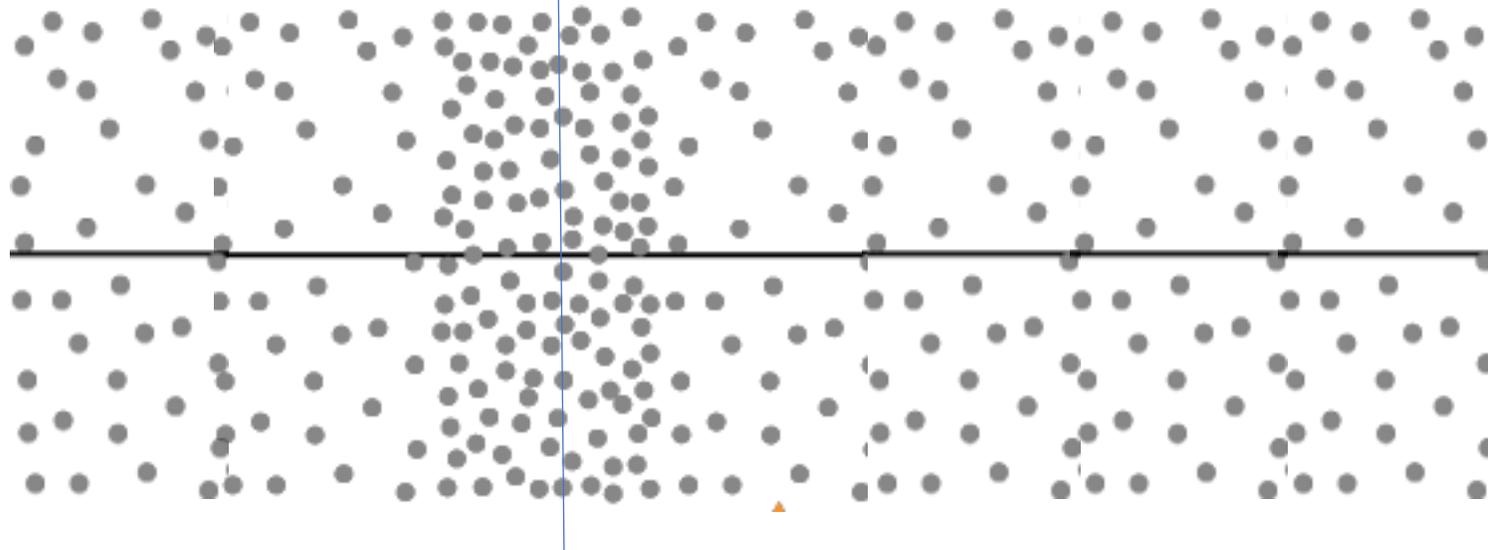
Ondes

Mouvement communiqué au voisin
et transmis de proche en proche

Corde : tension



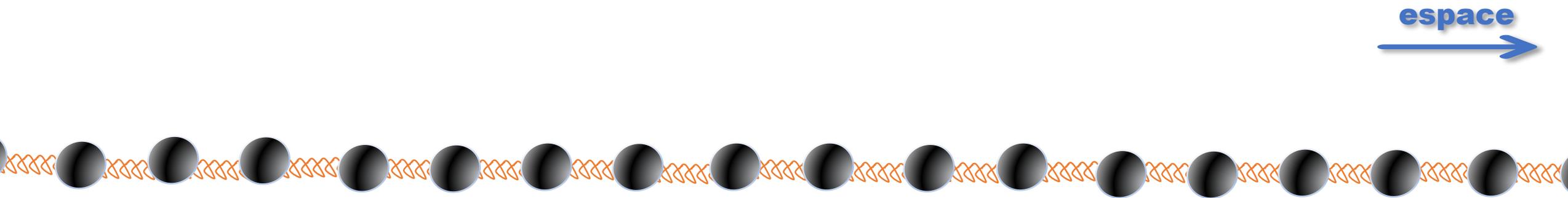
Gaz : pression



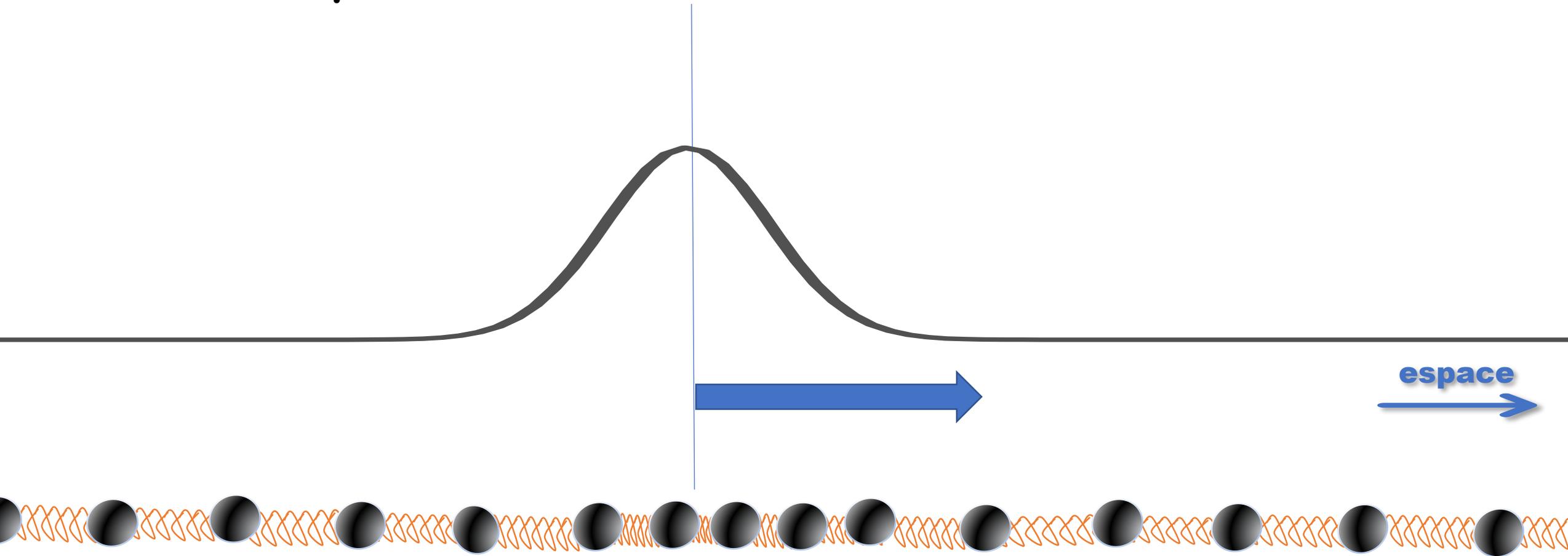
espace
→

Chaîne d'oscillateurs couplés

On représente les interactions entre voisins par des ressorts qui assurent une force de rappel



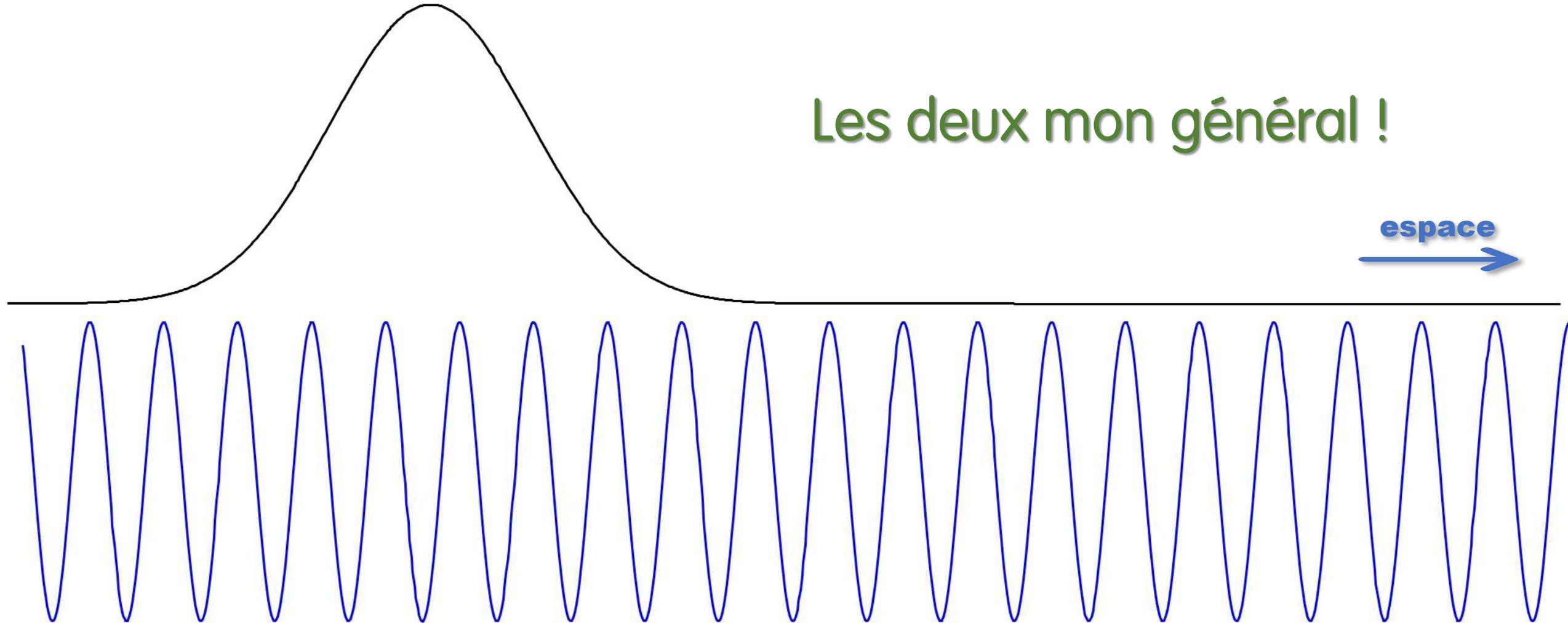
Chaîne d'oscillateurs couplés : impulsion



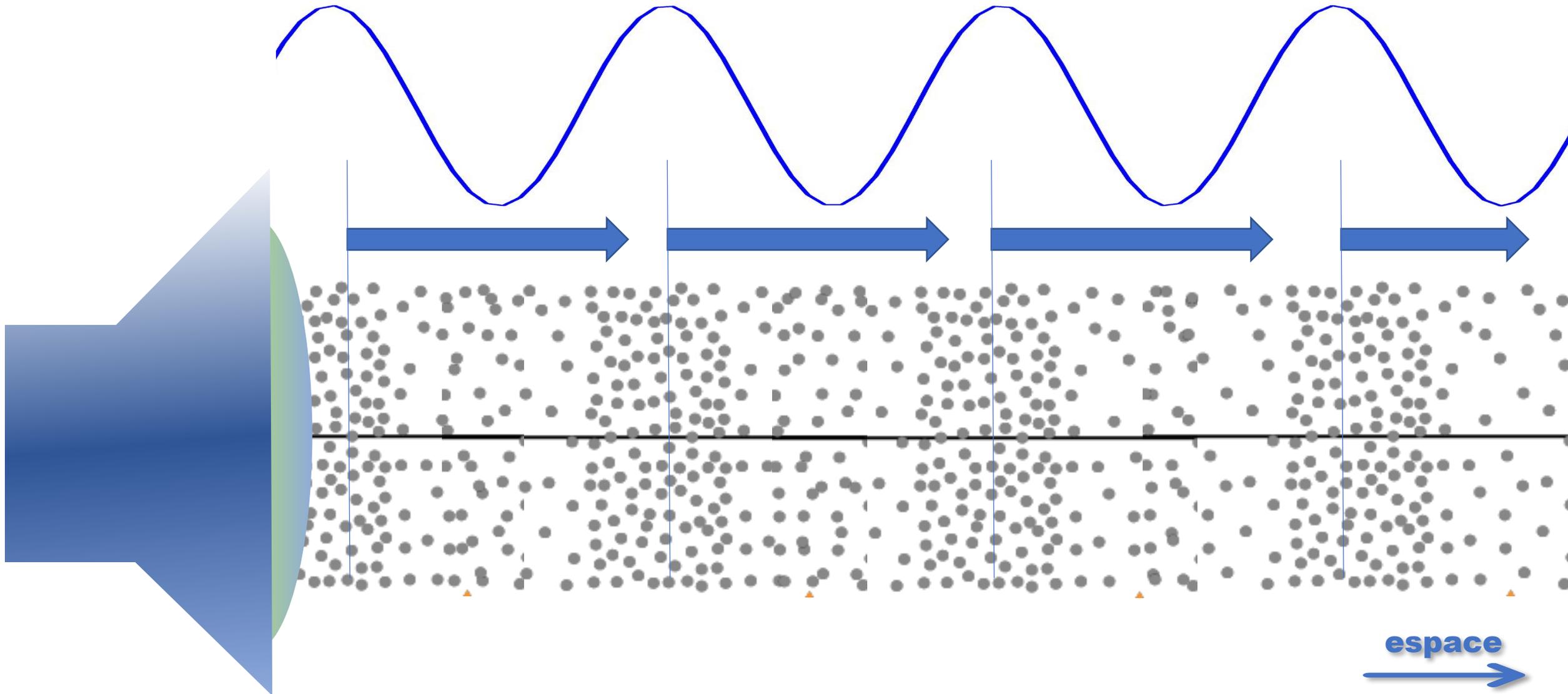
Une onde :
impulsion ou oscillation périodique ?

Les deux mon général !

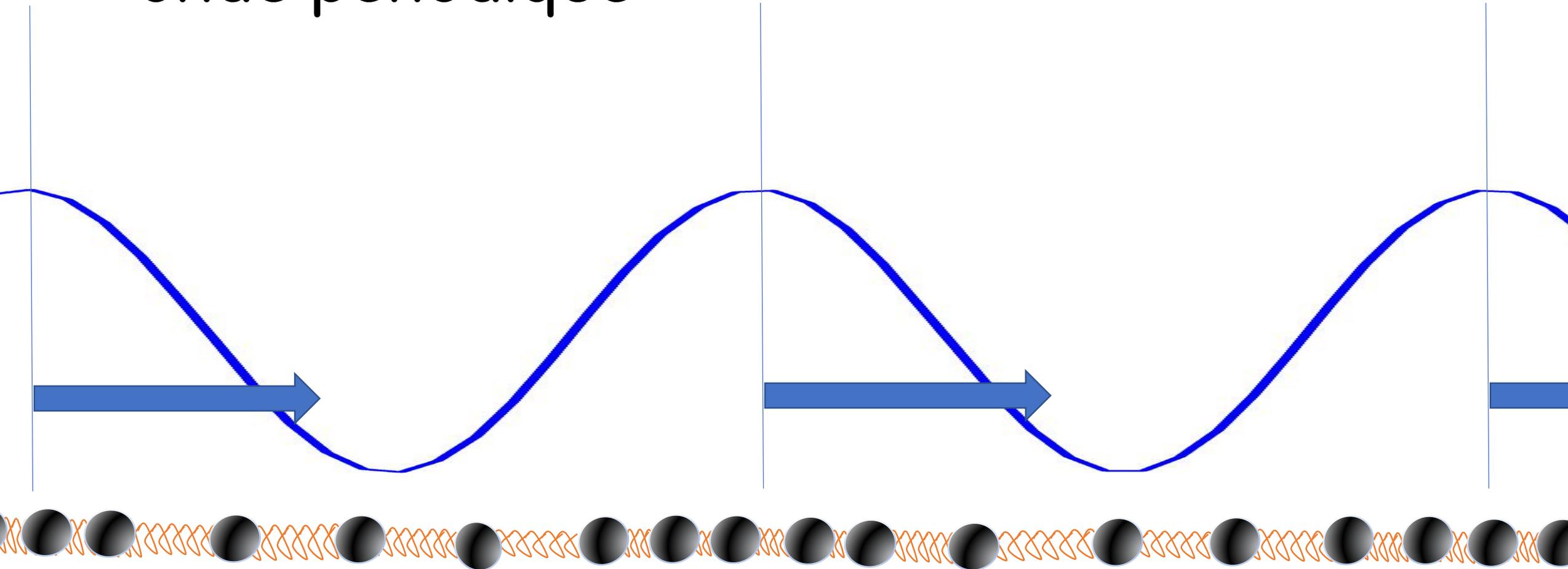
espace
→



Un oscillateur génère une onde périodique



Chaîne d'oscillateurs couplés : onde périodique

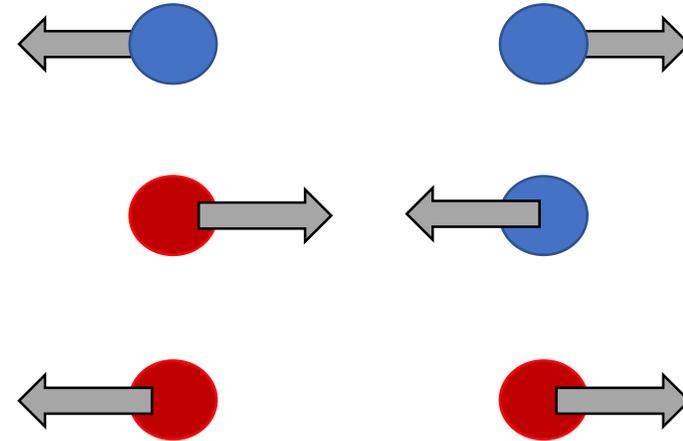
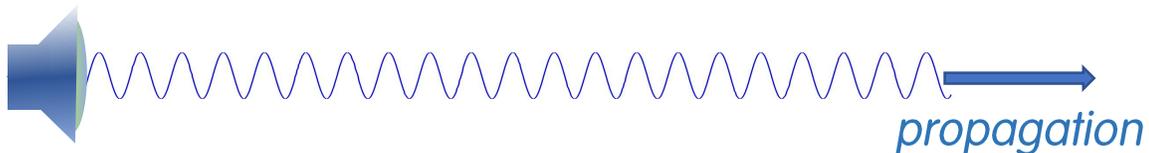


Nature des ondes

SON

Un objet qui oscille « pousse et tire » l'air qui l'entoure.

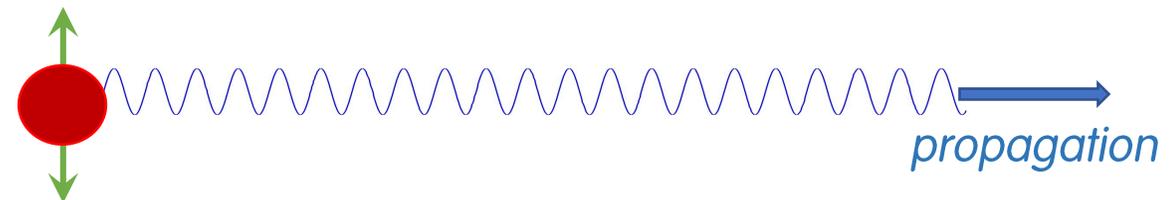
- onde de pression
- dans l'air (ou autres matériaux)



LUMIÈRE

Un électron « oscille » dans un atome.

- onde électromagnétique
- pas de support matériel (éther)



Amplitude / Énergie

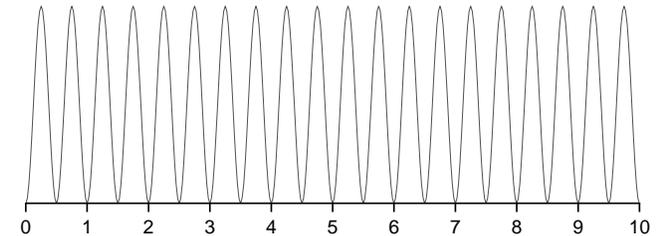
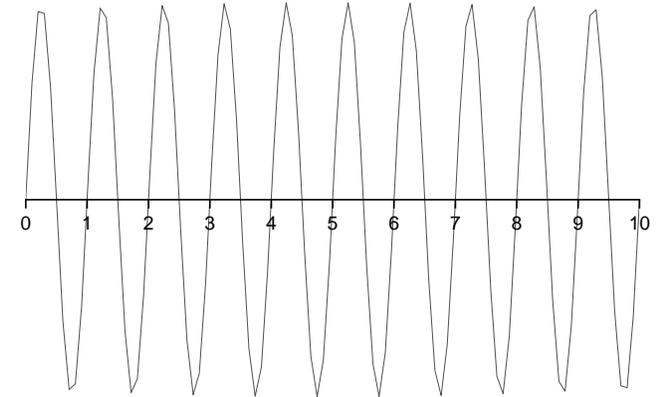
- Amplitude positive et négative : somme peut s'annuler → *interférences*

amplitude A

- Intensité (énergie) est un carré et donc est positive : juste addition des intensités

$$\text{énergie } I = \frac{A^2}{2}$$

Nous allons voir comment jouer avec les sommes d'ondes.



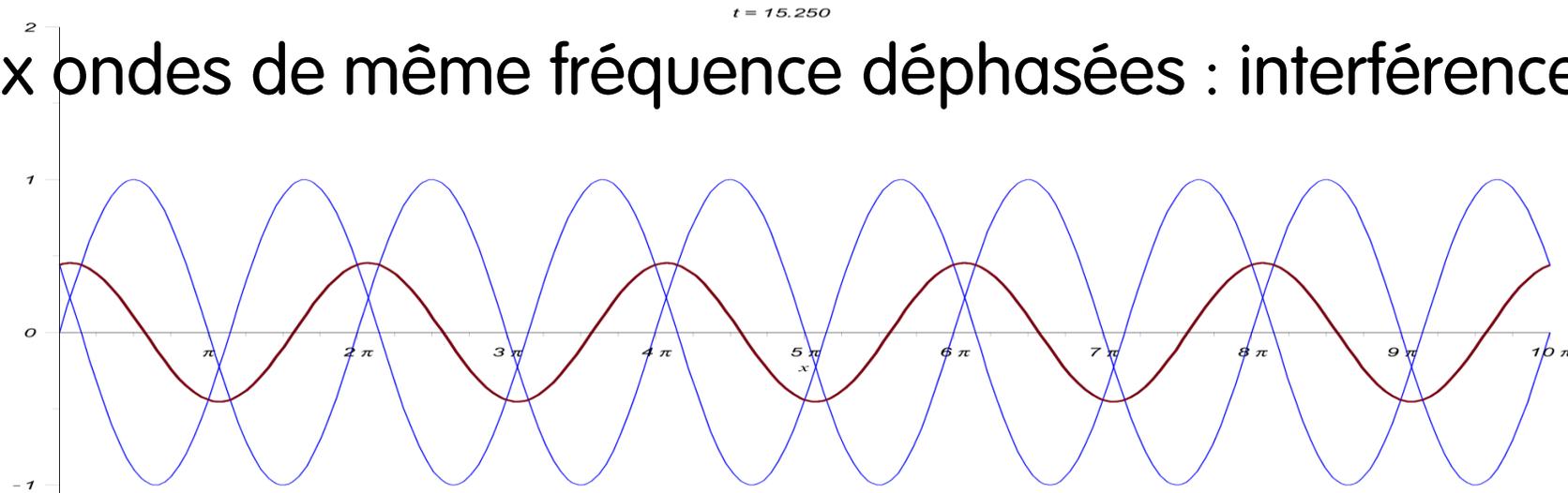
Phase et interférences



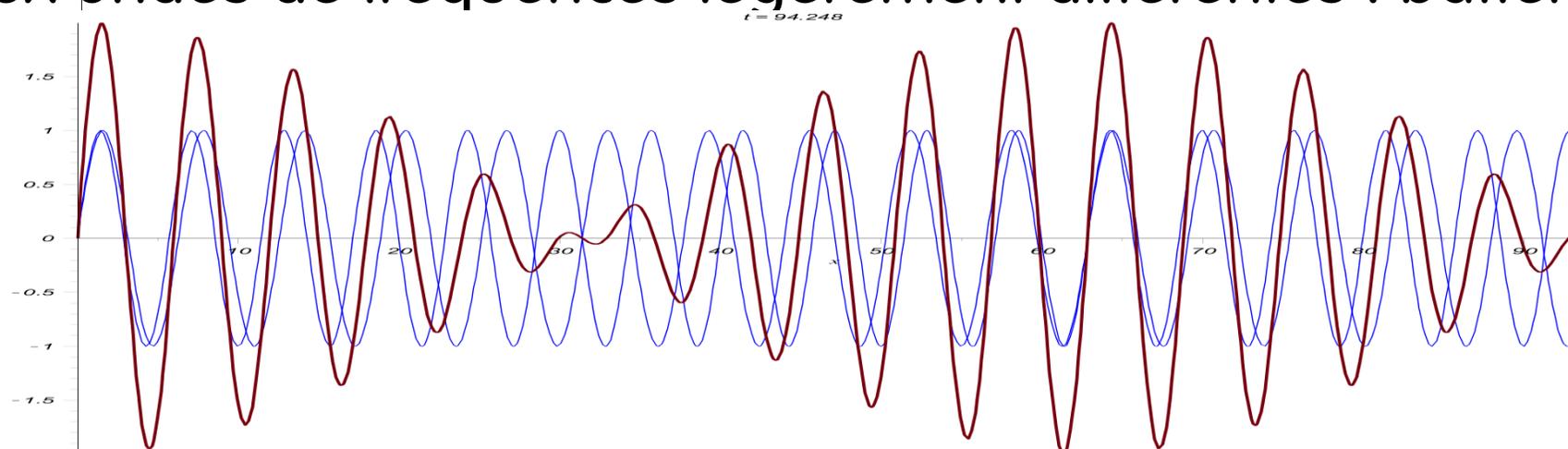
Phase et interférences



- Deux ondes de même fréquence déphasées : interférences



- Deux ondes de fréquences légèrement différentes : battements

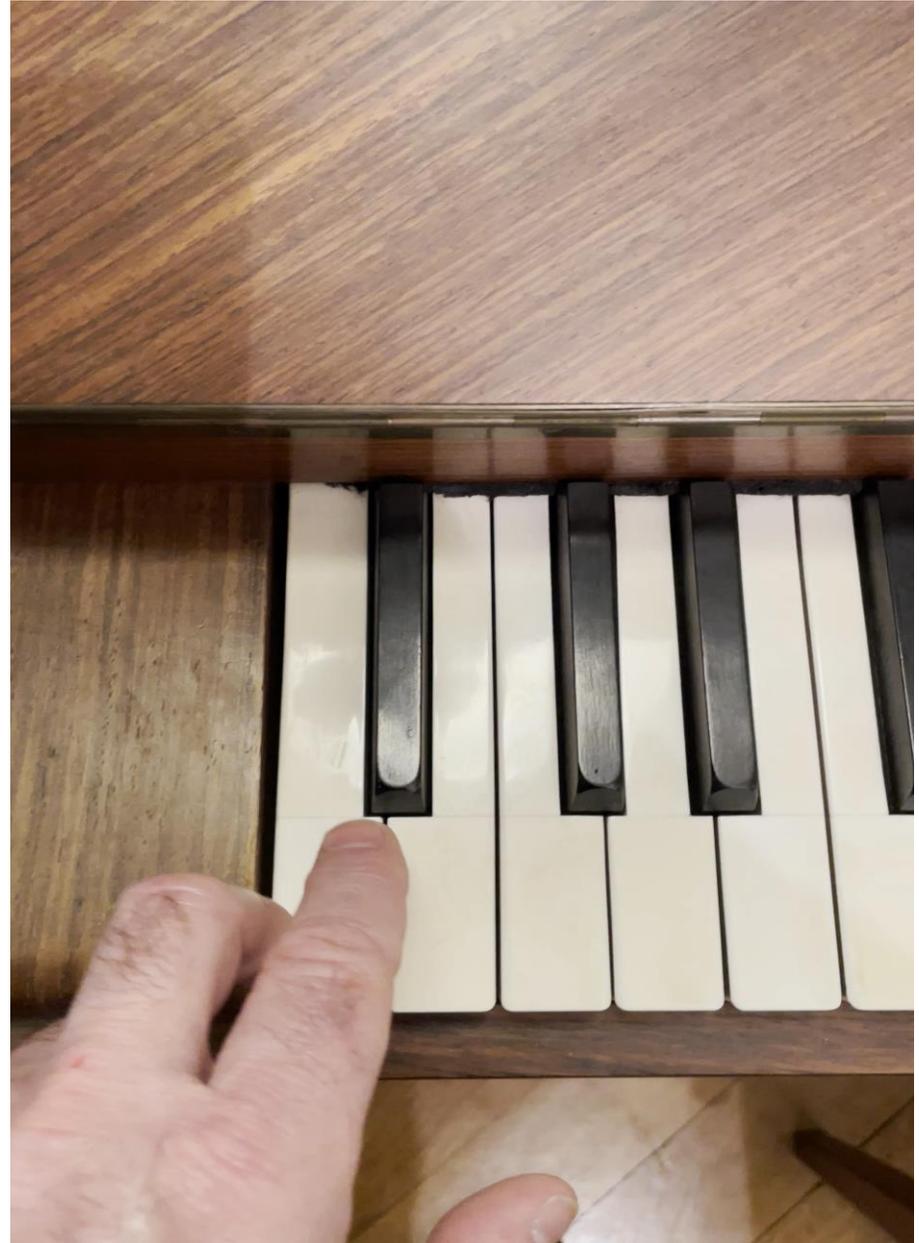


Battements sonores

la 0 : 27,5 Hz

sib 0 : 28,6 Hz

différence de fréquence : 5,6%



Battements visuels : stroboscopie

- stroboscopie

cinéma & TV

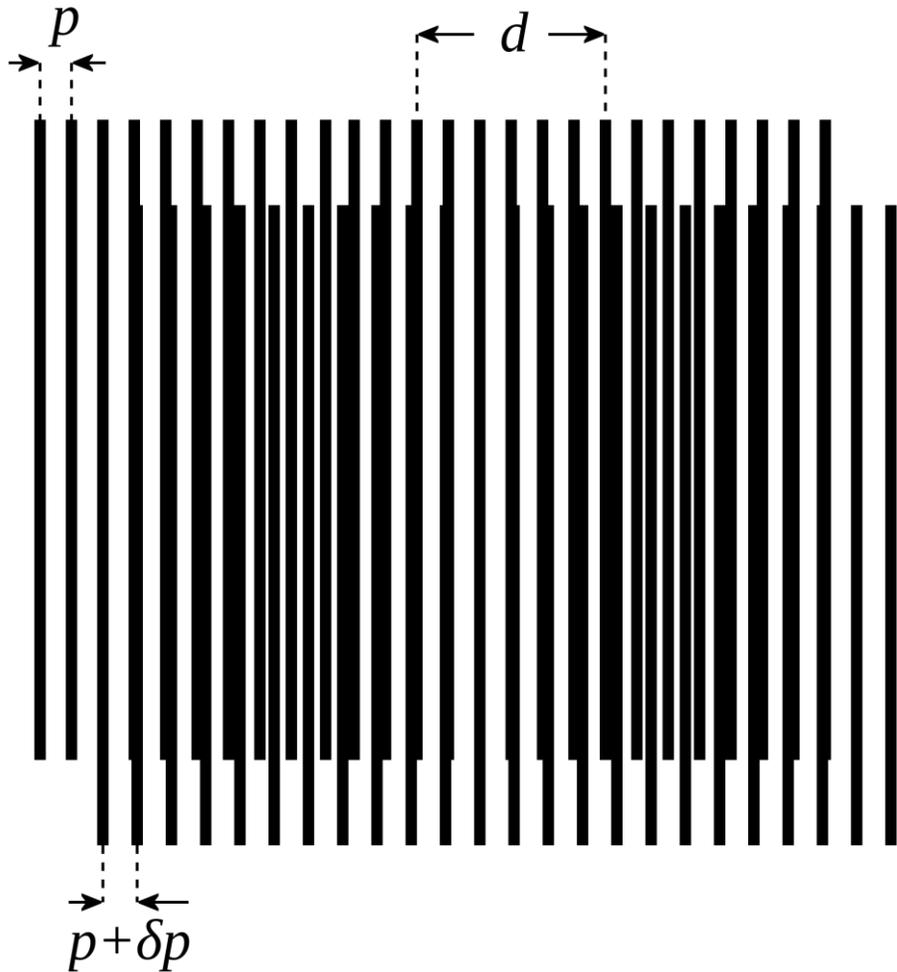
24 ou 25

images par
secondes

*mécanisme expliquant l'impression que les roues
d'un véhicule semblent tourner en arrière au
cinéma*

$$\cos 2\pi \nu t + \cos 2\pi (\nu + \delta) t = 2 \cos 2\pi \left(\nu + \frac{\delta}{2} \right) t \cos 2\pi \frac{\delta}{2} t$$

Battements spatiaux : moirés



Transformée de Fourier - Spectre

Tout signal se décompose (de façon unique) en une
somme de sinusoides

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dv \cos 2\pi v t f'(v) + \int_{-\infty}^{+\infty} dv \sin 2\pi v t f''(v)$$

S pour somme

... sur les fréquences

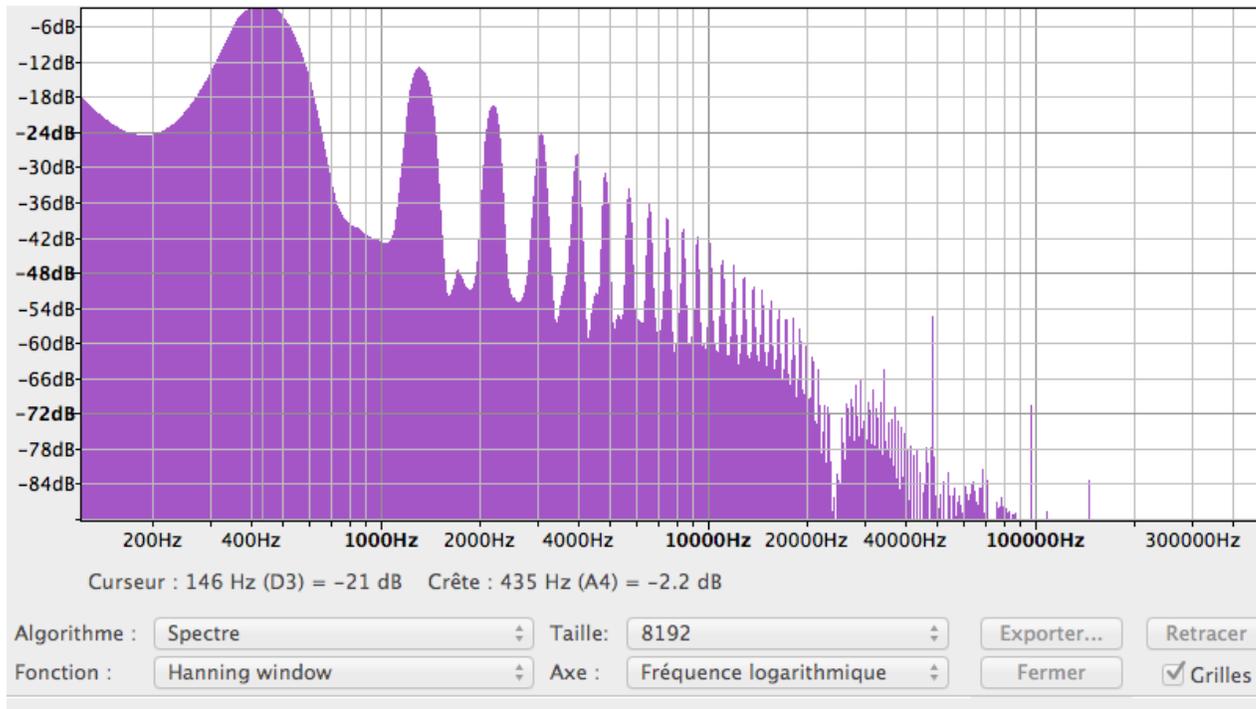
... d'oscillations sinusoidales

... avec chacune leur poids

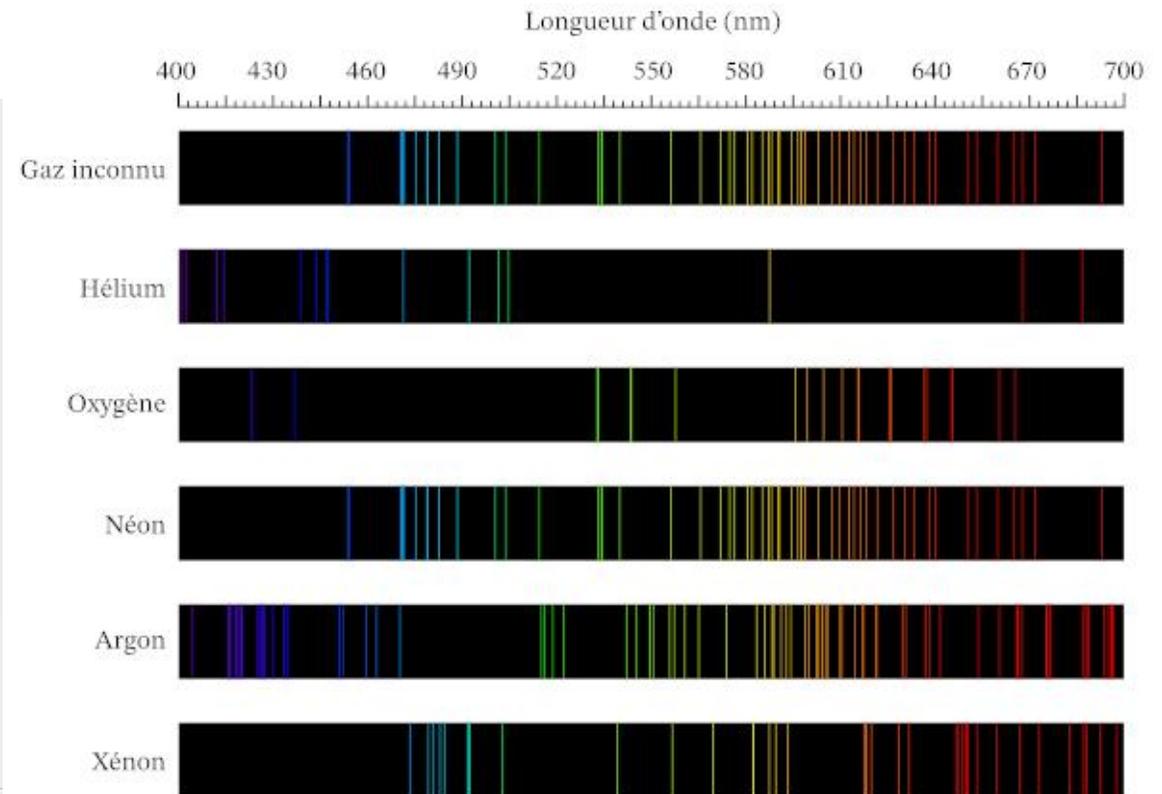
... avec deux contributions décalées

Transformée de Fourier - Spectre

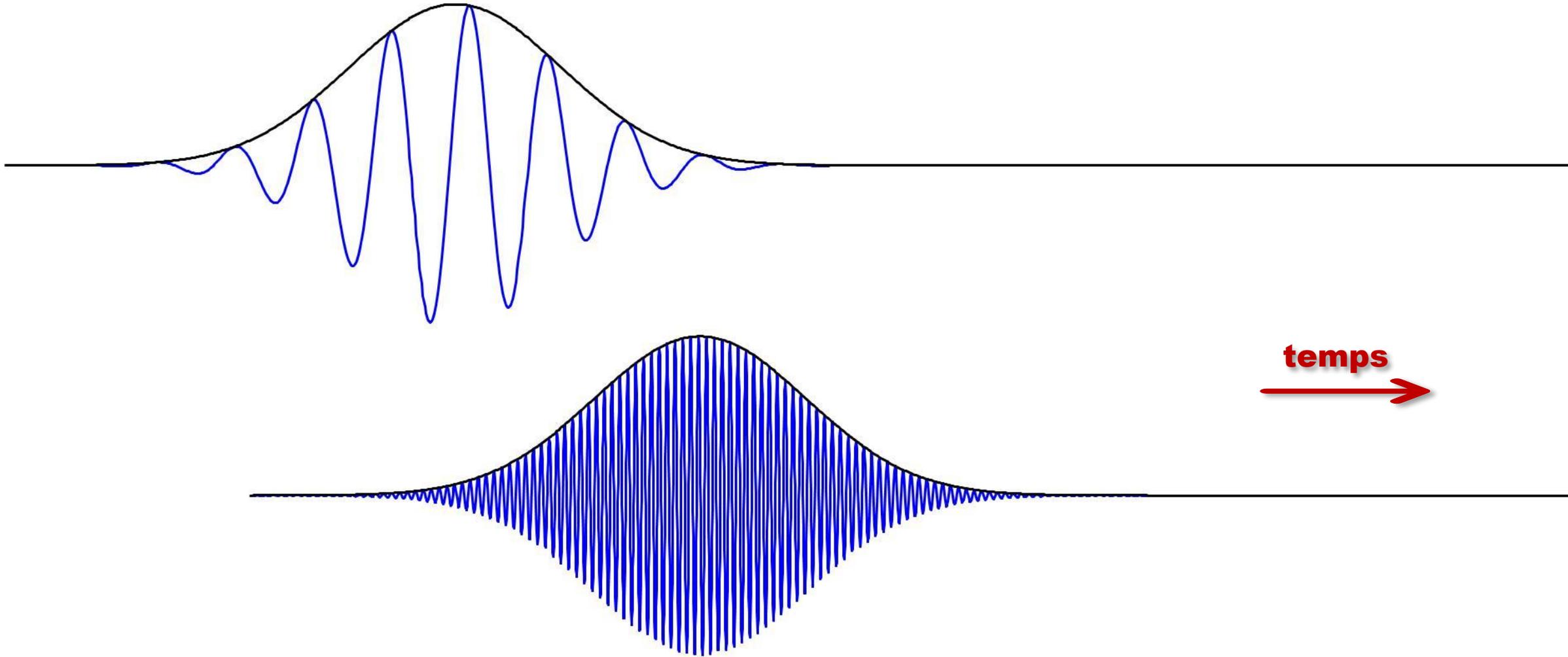
Un spectre montre les fréquences contenues
dans un son



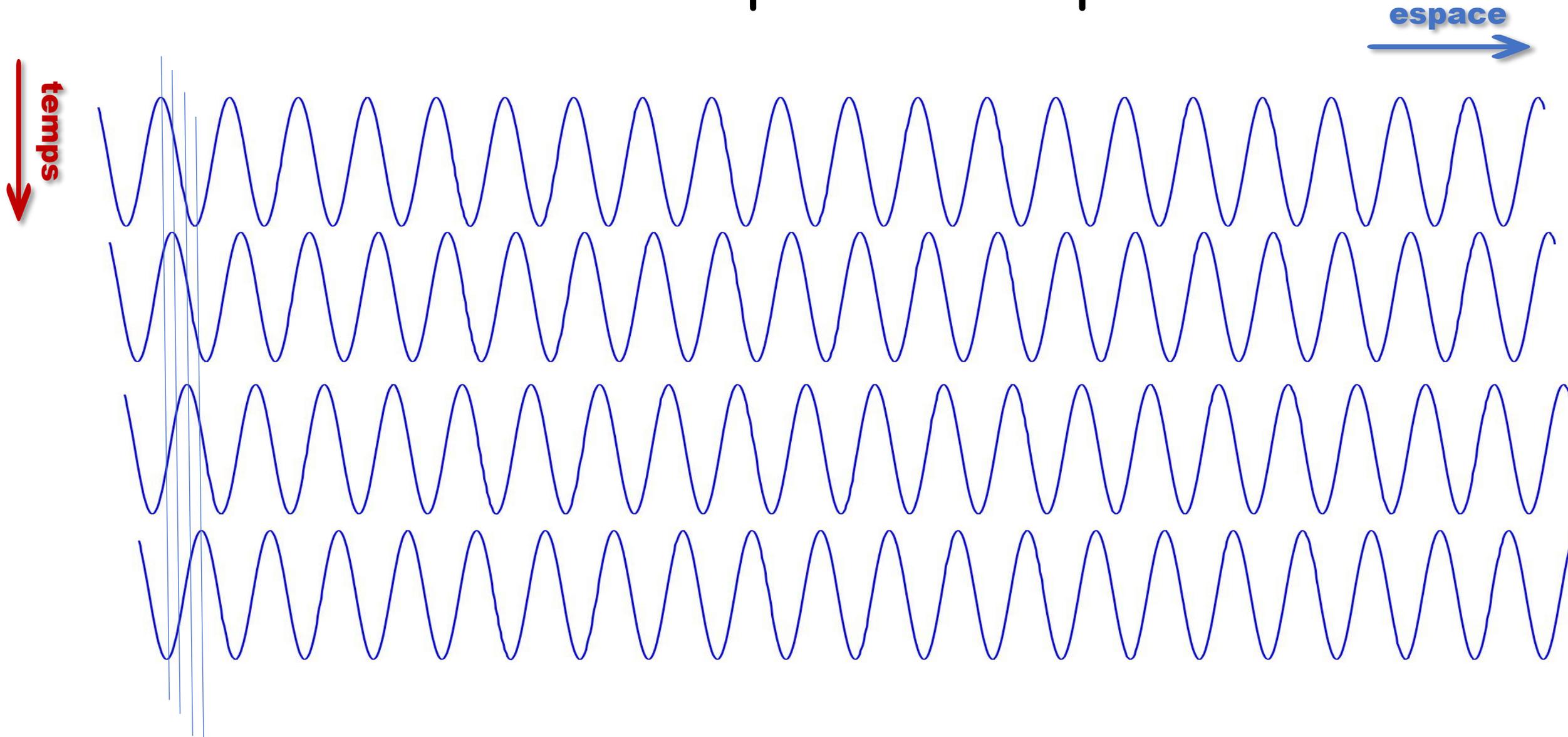
dans un faisceau lumineux



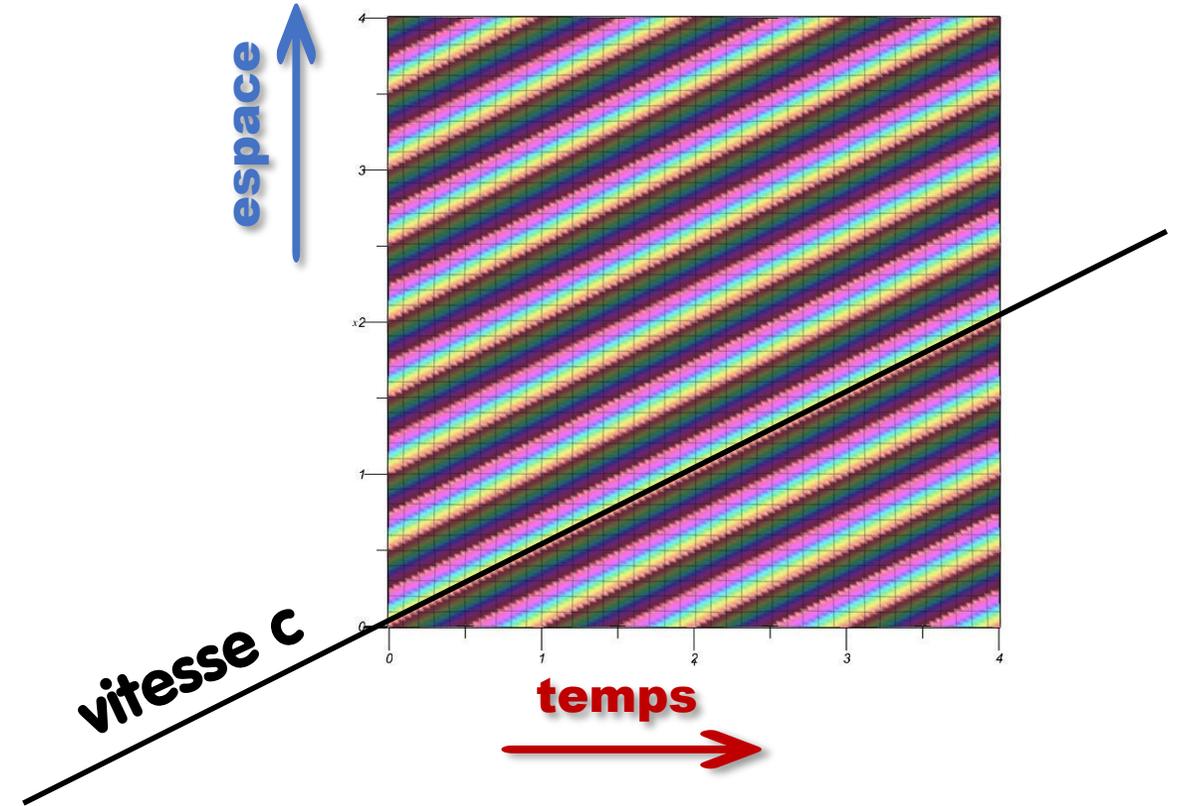
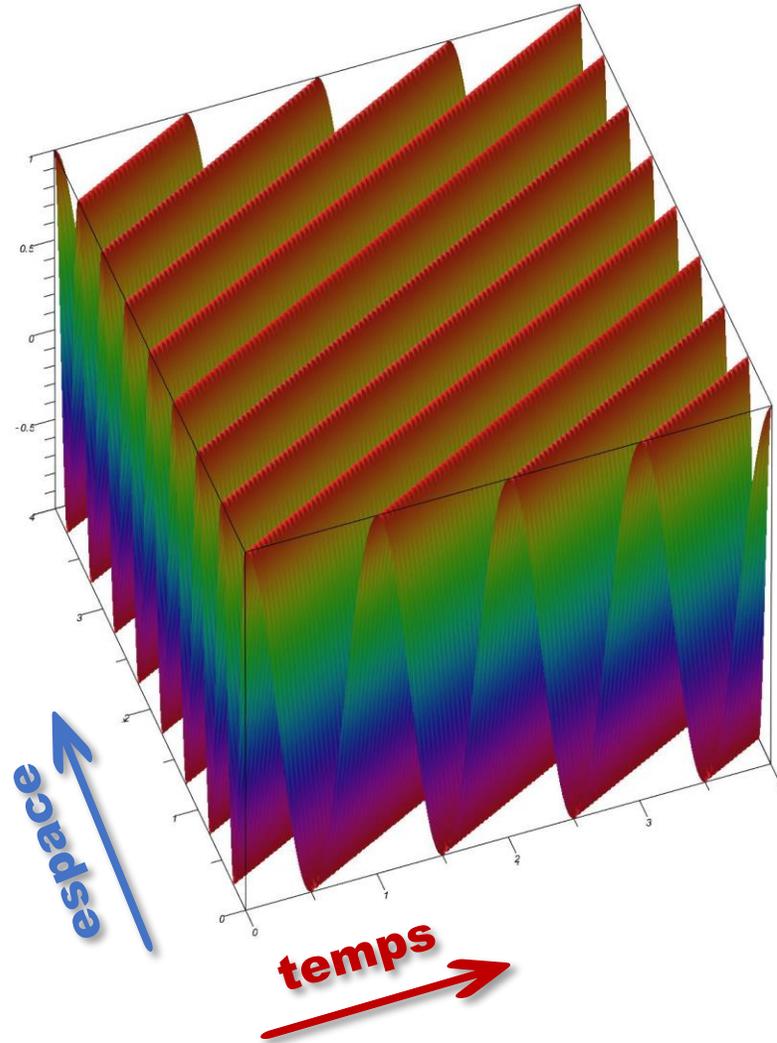
Une note de musique :
une oscillation avec un début et une fin



onde : oscillation temporelle & spatiale

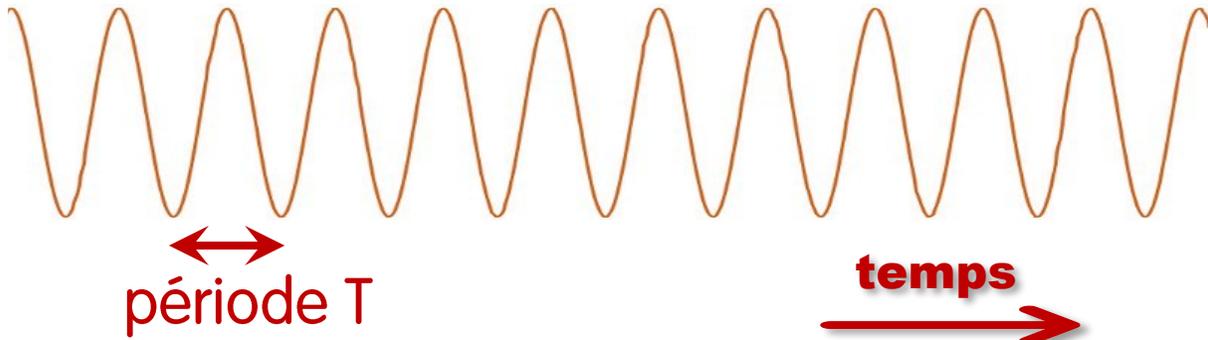


onde : oscillation temporelle & spatiale

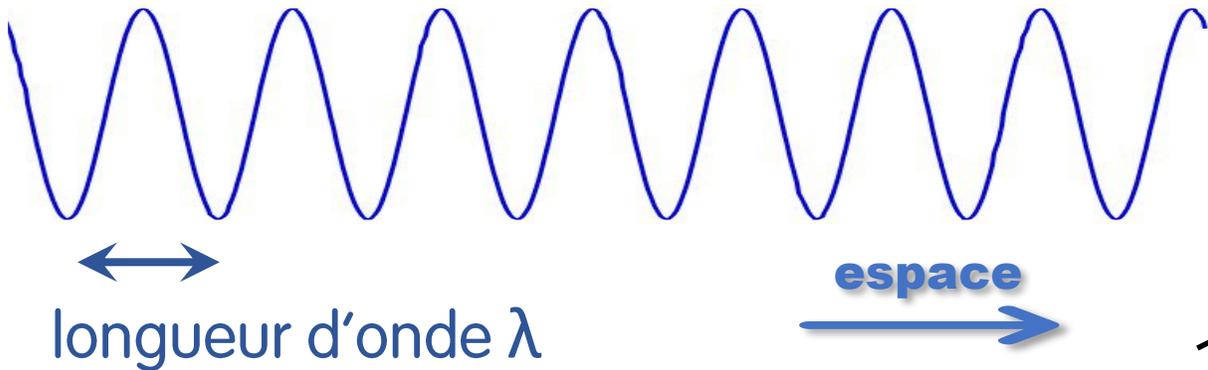


onde : oscillation temporelle & spatiale

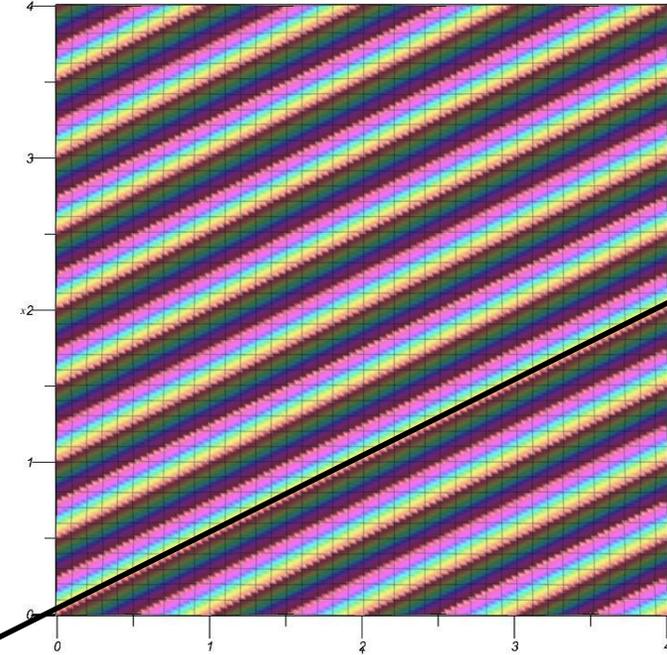
à un endroit donné : évolution dans le temps



à un moment donné : image de l'onde



espace ↑



temps →

$$\lambda = c \cdot T$$

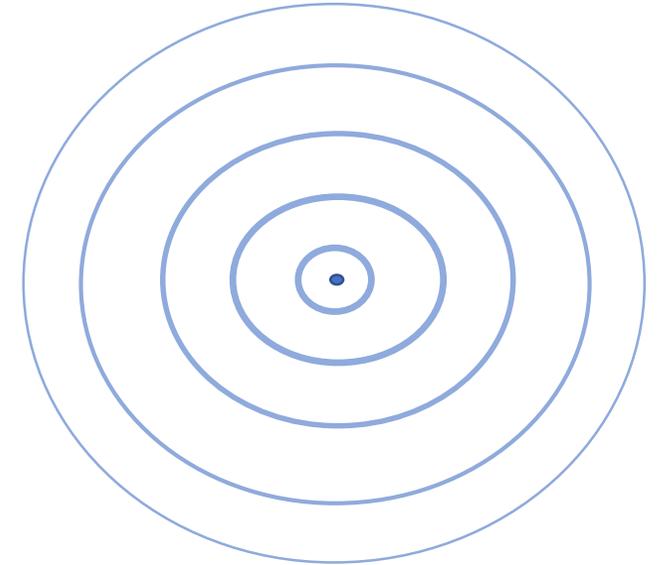
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Qu'est ce qui caractérise une onde périodique ?

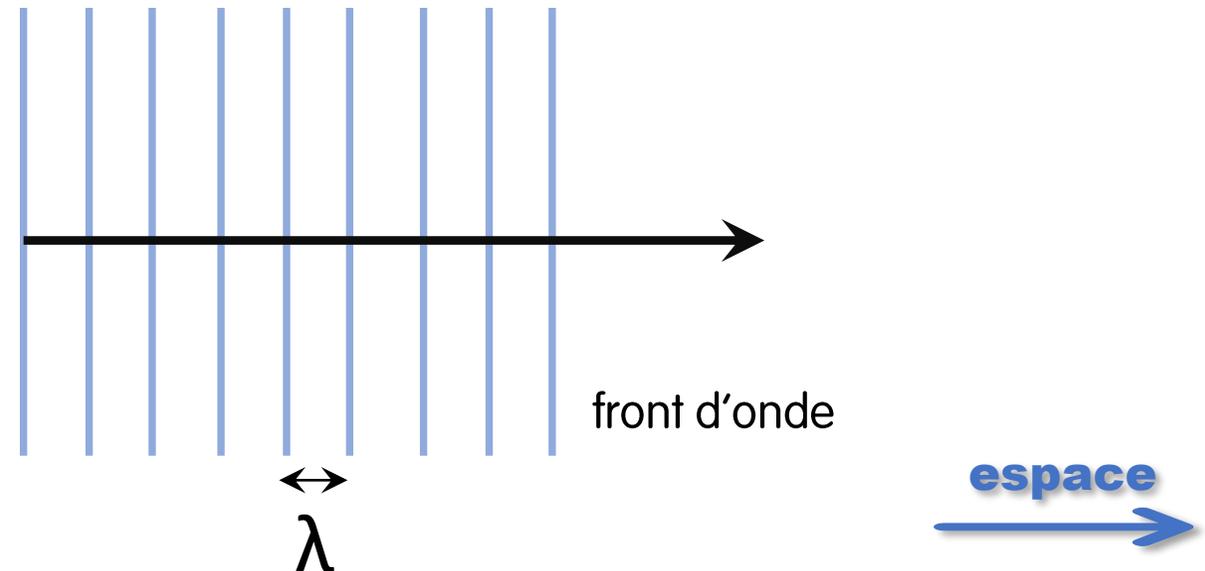
- fréquence – période – longueur d'onde

$$\lambda = c T = \frac{c}{\nu}$$

- forme spatiale :
 - onde sphérique qui part d'un point



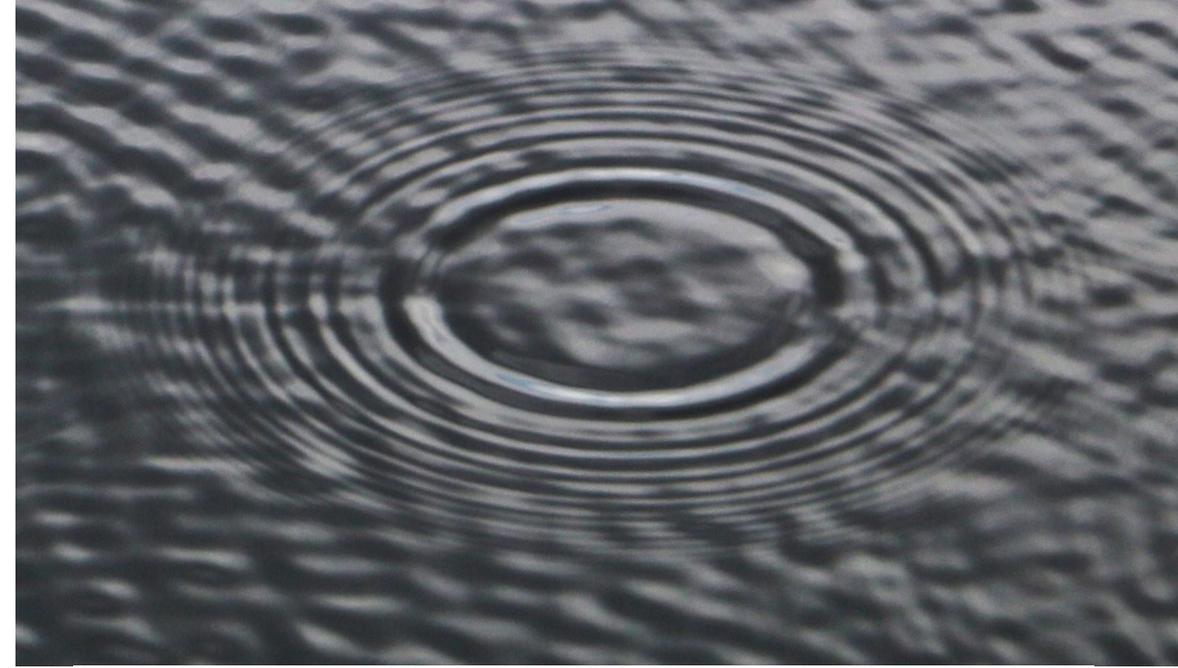
- onde plane qui a une direction



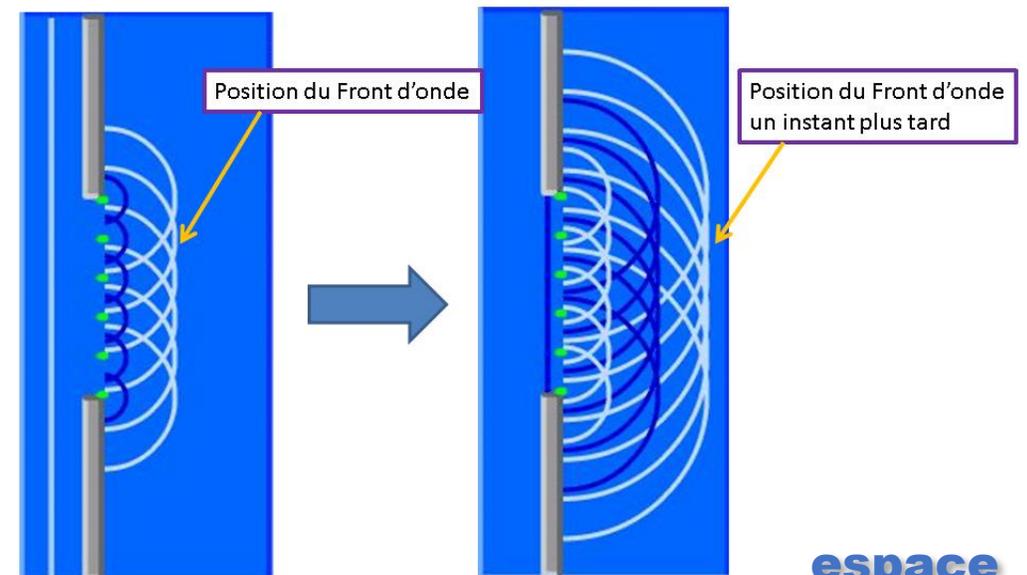
Longueur d'onde : diffraction & directionnalité

Principe de *Huygens-Fresnel*

- Chaque point d'un front d'onde est une source.
- Les ondes issues de différents points interfèrent un peu plus loin pour reformer le front d'onde.

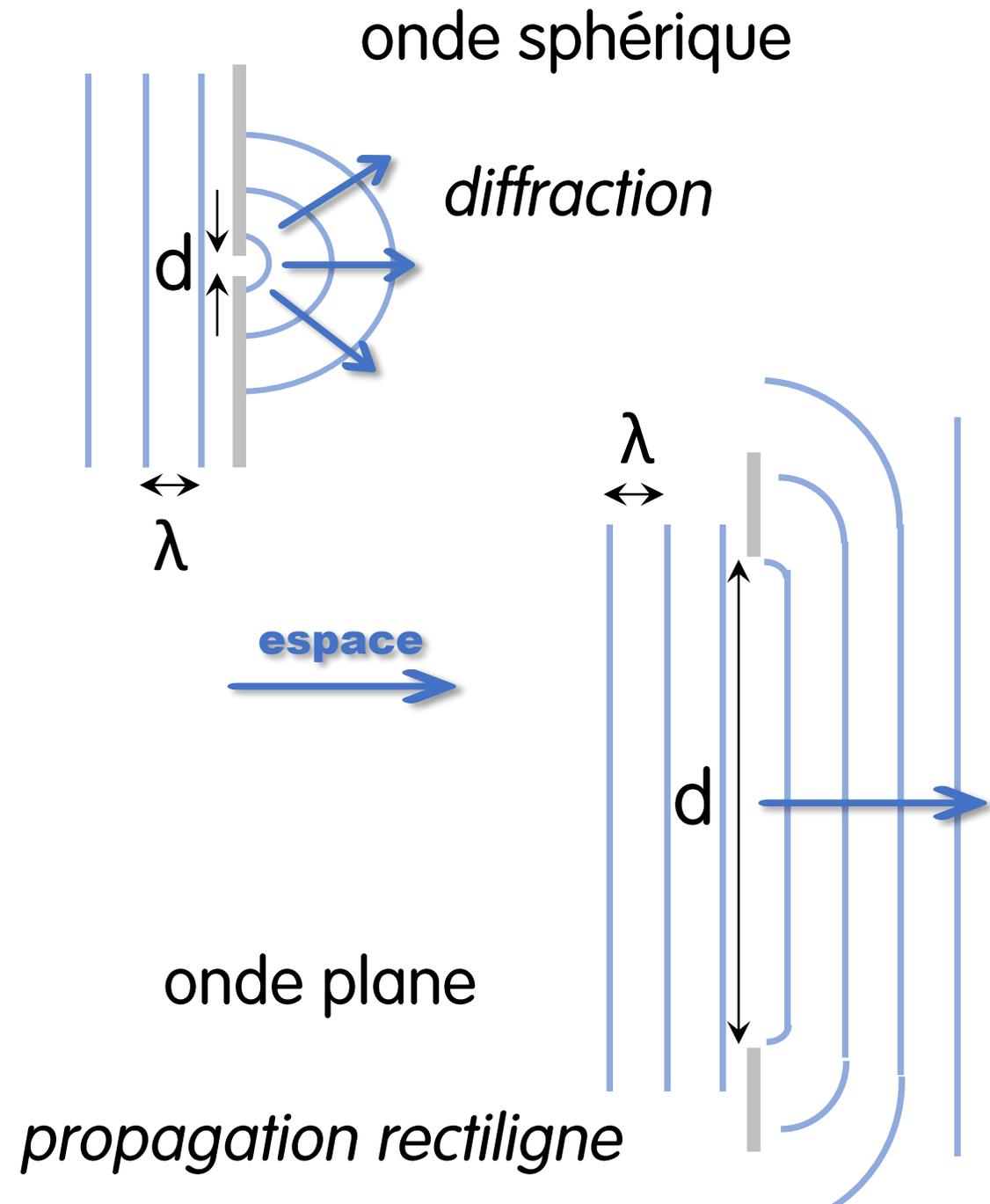


PRINCIPE DE HUYGENS



Longueur d'onde : diffraction & directionnalité

- Si le trou (ou l'objet) est petit devant la longueur d'onde : *diffraction*
- Si le trou (ou l'objet) est grand devant la longueur d'onde : propagation rectiligne non perturbée



Échelles des longueurs d'onde

Son

- fréquences de 20 Hz à 20 000 Hz
(périodes de 5 centièmes de seconde à 50 microsecondes)
- vitesse du son : 340 m/s
- longueurs d'ondes de 17 m à 17 mm

Lumière

- fréquences de 375 THz à 650 THz
(périodes de 2,7 fs à 1,3 fs)
- vitesse de la lumière : 300 km/s
- longueurs d'onde de 800 nm à 400 nm
(*1nm = 1 milliardième de mètre*)

- Un facteur d'un million entre longueurs d'ondes sonores et lumineuses.

- Une large variation de longueurs pour les ondes sonores une faible pour les ondes lumineuses

Propagations

- Un facteur d'un million entre longueurs d'ondes sonores et lumineuses.
- Une large variation de longueurs pour les ondes sonores, une faible pour les ondes lumineuses

Son

grande différence entre

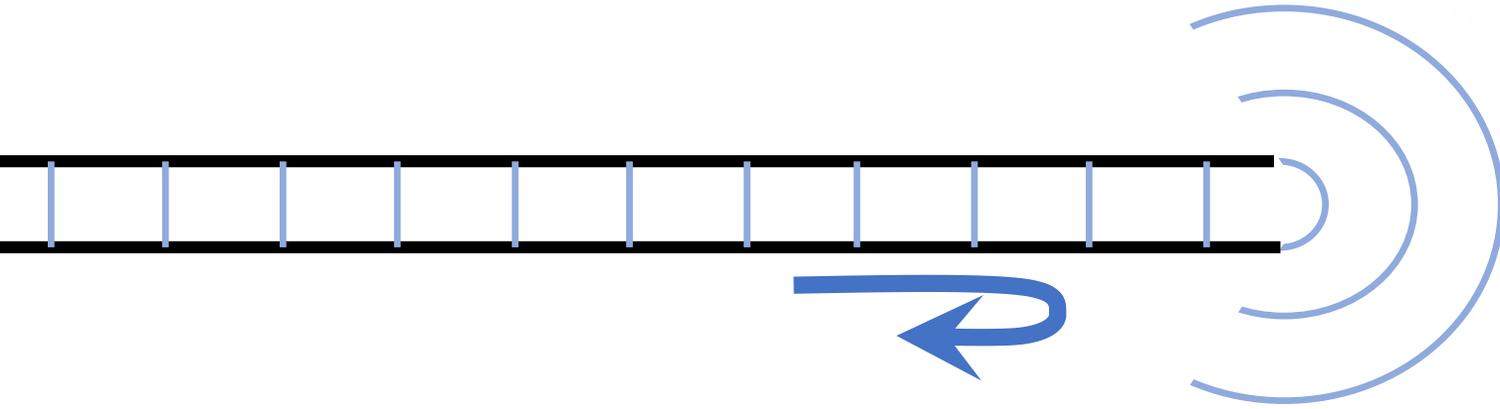
- sons aigus qui vont « tout droit » et sont arrêtés par un obstacle
- sons graves qui contournent les obstacles
- *emplacement caissons de graves et enceintes*
- *connaissance de la position d'un émetteur*

Lumière

- la lumière est directionnelle : elle ne peut contourner un obstacle qui va produire une ombre
- on va pouvoir décrire l'optique à l'aide de « **rayons** »
- la diffraction n'apparaît que sur des objets de petites dimensions
- *mais c'est elle qui limite notre possibilité de voir des objets plus petits que la longueur d'onde tels que des électrons: critère de Rayleigh*

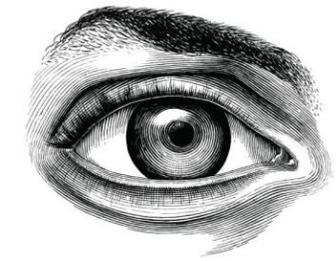
Impédance

transition entre deux milieux : par exemple passage d'un tuyau à l'extérieur

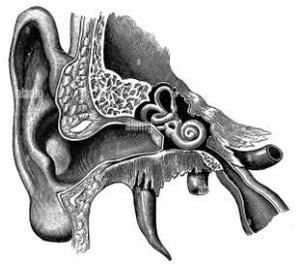


- L'onde rebondit : c'est utilisé dans les instruments à vent pour faire une onde stationnaire (voir prochain cours)
- adaptation d'impédance : pavillon d'une trompette, pavillon de l'oreille, cornet acoustique





vue et ouïe



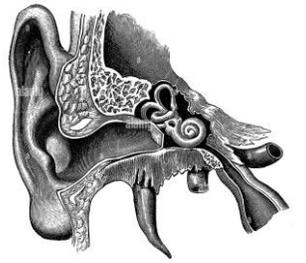
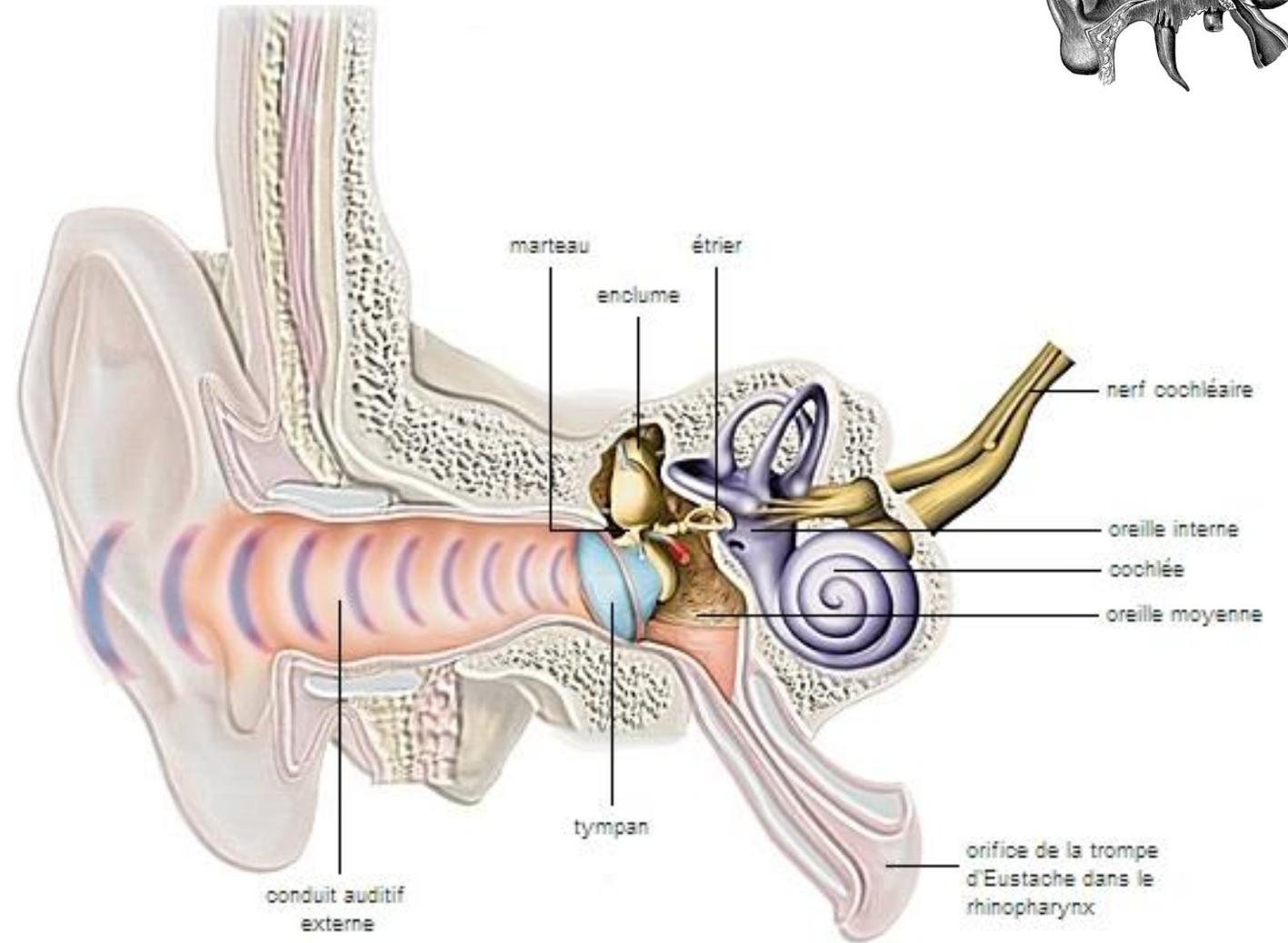
Que ce soit l'œil ou l'oreille, leurs capteurs sont sensibles à deux caractéristiques de l'onde lumineuse ou de l'onde sonore :

- l'intensité (pas l'amplitude et donc pas la phase)
- la fréquence (hauteur du son et couleur de la lumière)

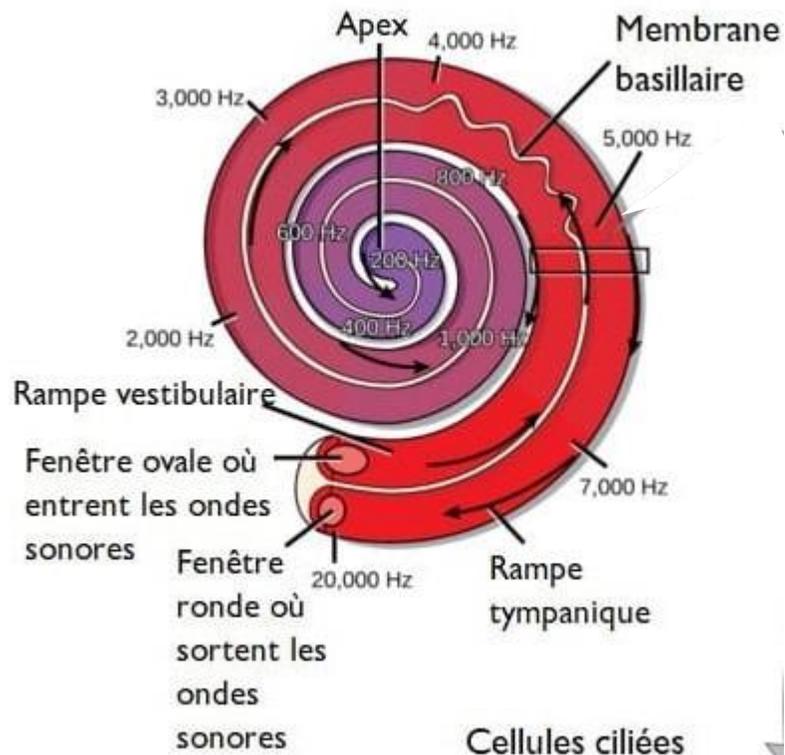
Mais l'ouïe comme la vue donnent des informations spatiales ...

vue et ouïe *l'oreille*

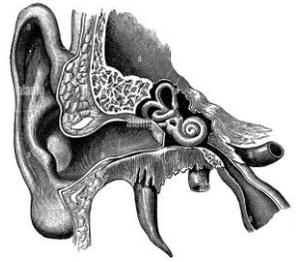
- pavillon : adaptateur d'impédance
- tympan : vibration air vers vibrations osselets
- marteau enclume étrier adaptateurs d'impédance vers liquide
- cochlée : capteurs et analyseur de fréquences



vue et ouïe l'oreille



dans la cochlée : l'organe de Corti

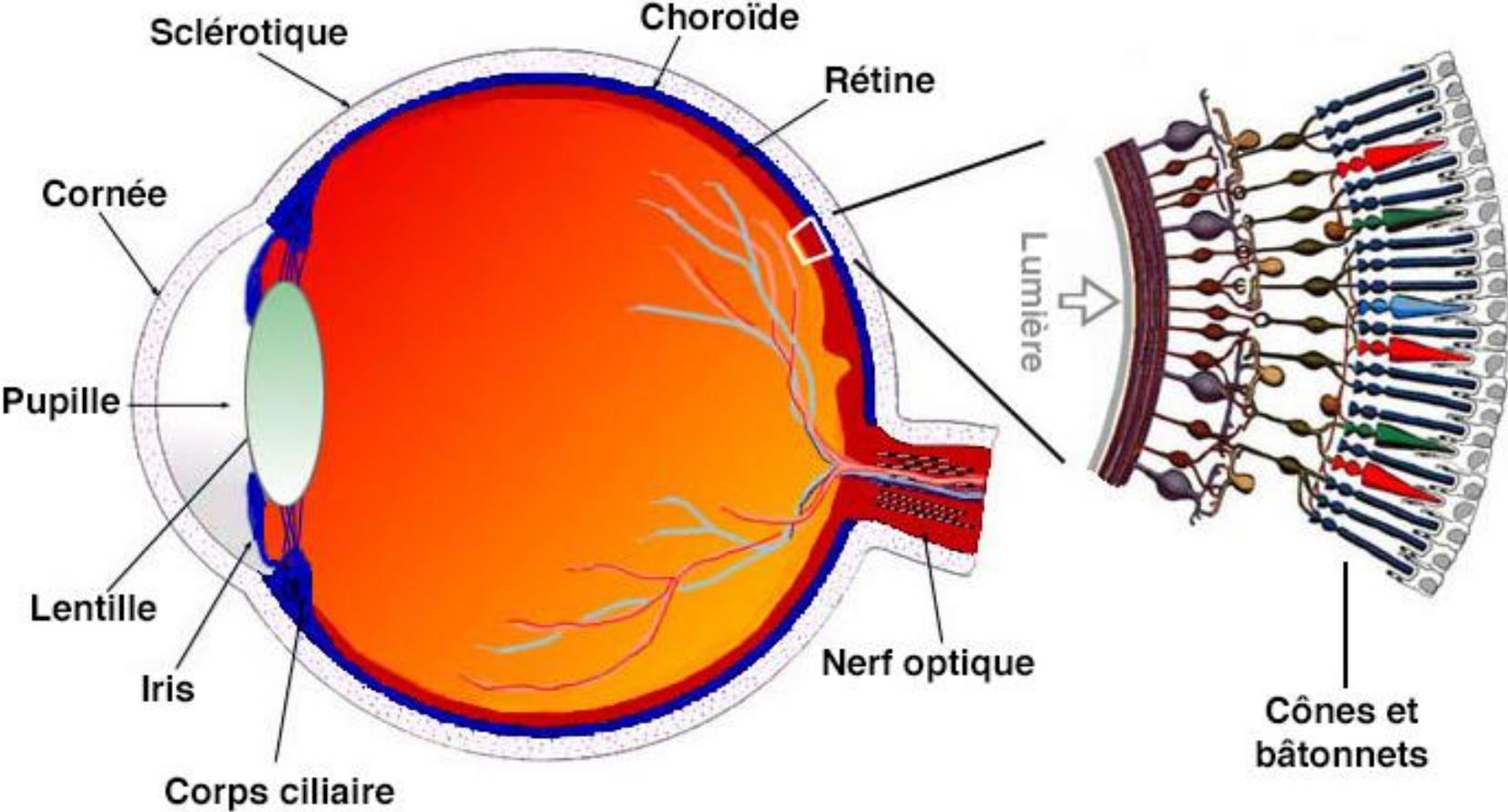


- Les cellules ciliées transforment la vibration du liquide en signal nerveux transmis au cerveau
- Le diamètre diminue tout du long de la propagation. Les sons aigus traversent les membranes basillaires et sont captés au début. Plus les sons sont graves plus les vibrations progressent loin

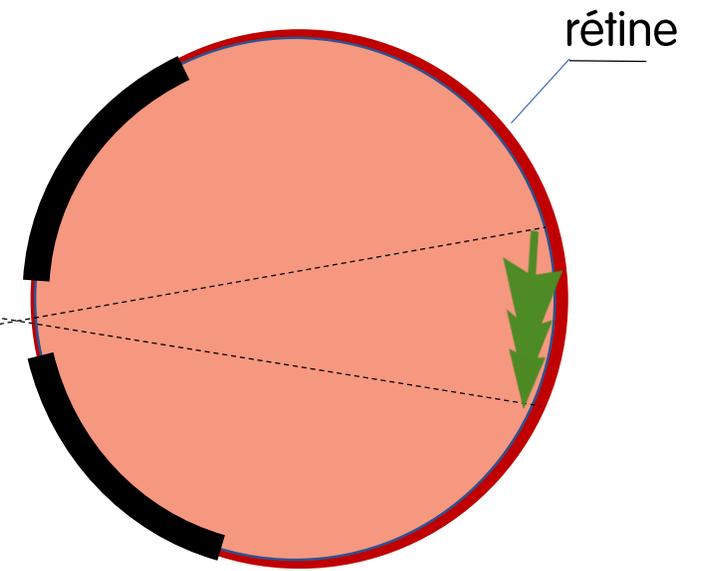
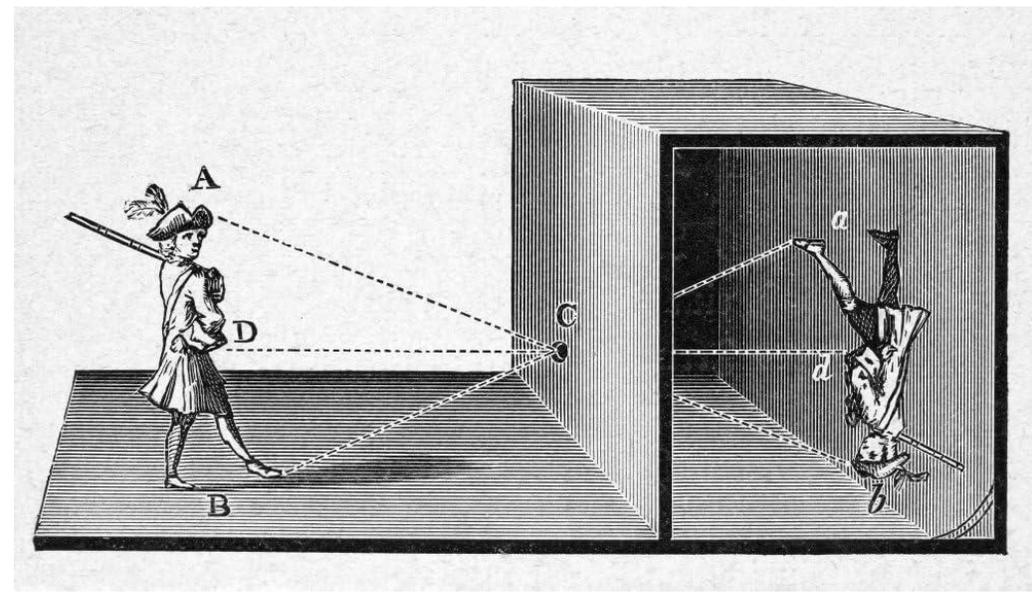
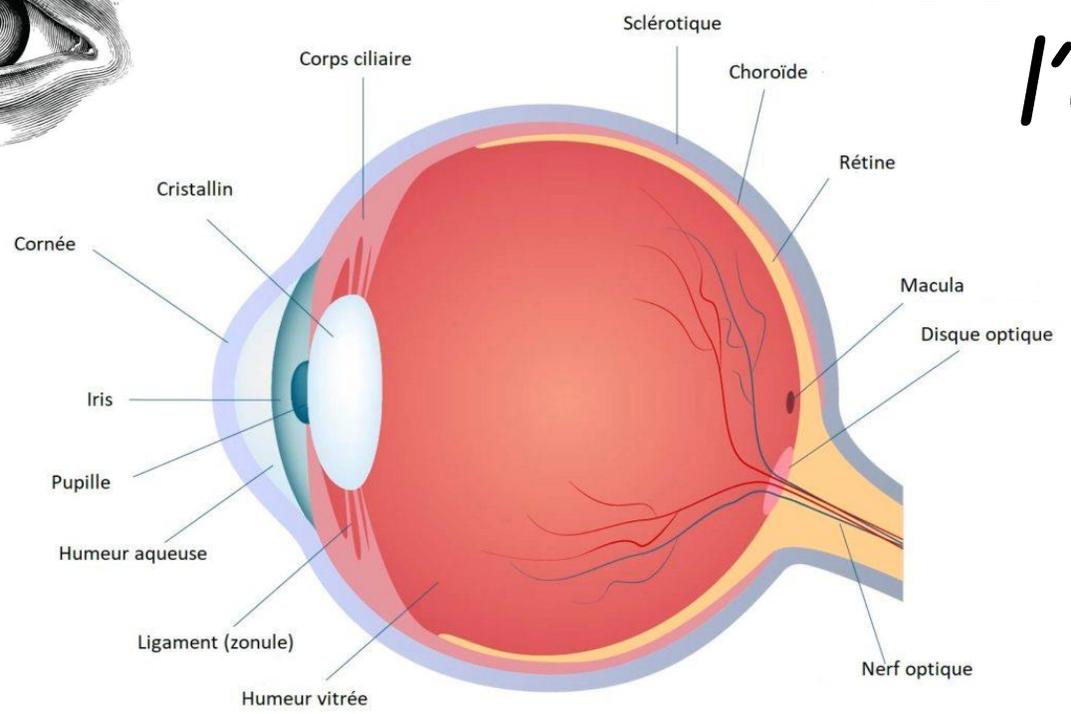
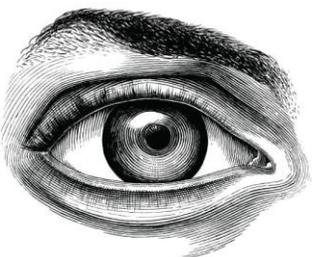
*analyse de spectre
discrimine 3Hz à 1000 Hz*



vue et ouïe *l'œil*



vue et ouïe *l'œil*



dans le prochain épisode ...

dans le prochain épisode ...

- les spectres



dans le prochain épisode ...

- les spectres



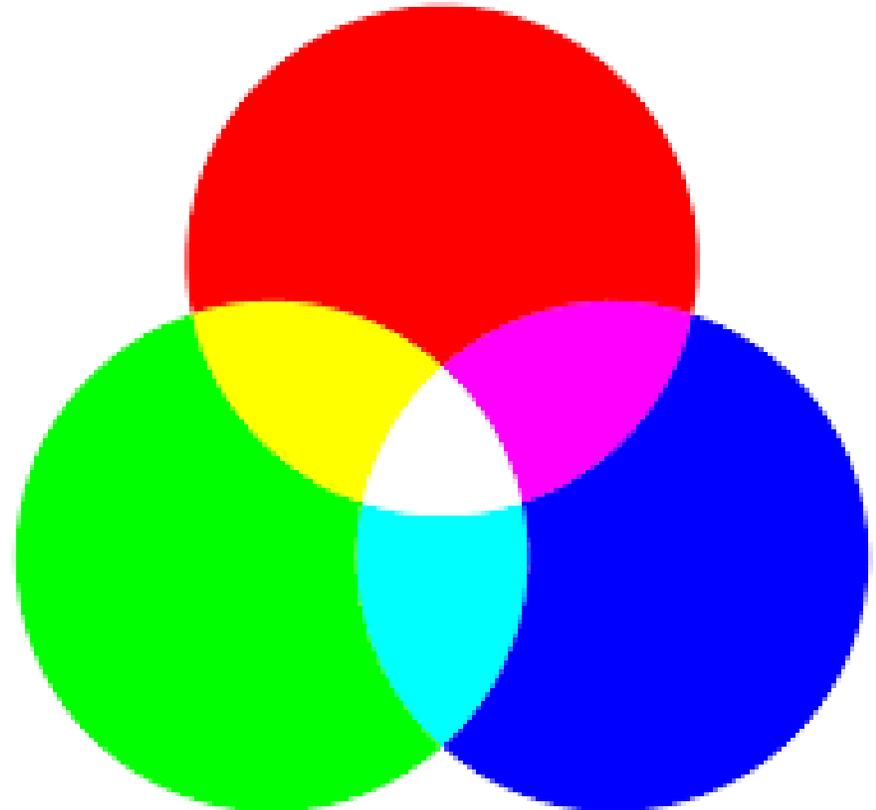
dans le prochain épisode ...

- les spectres
- la vision des chats



dans le prochain épisode ...

- les spectres
- la vision des chats
- les couleurs



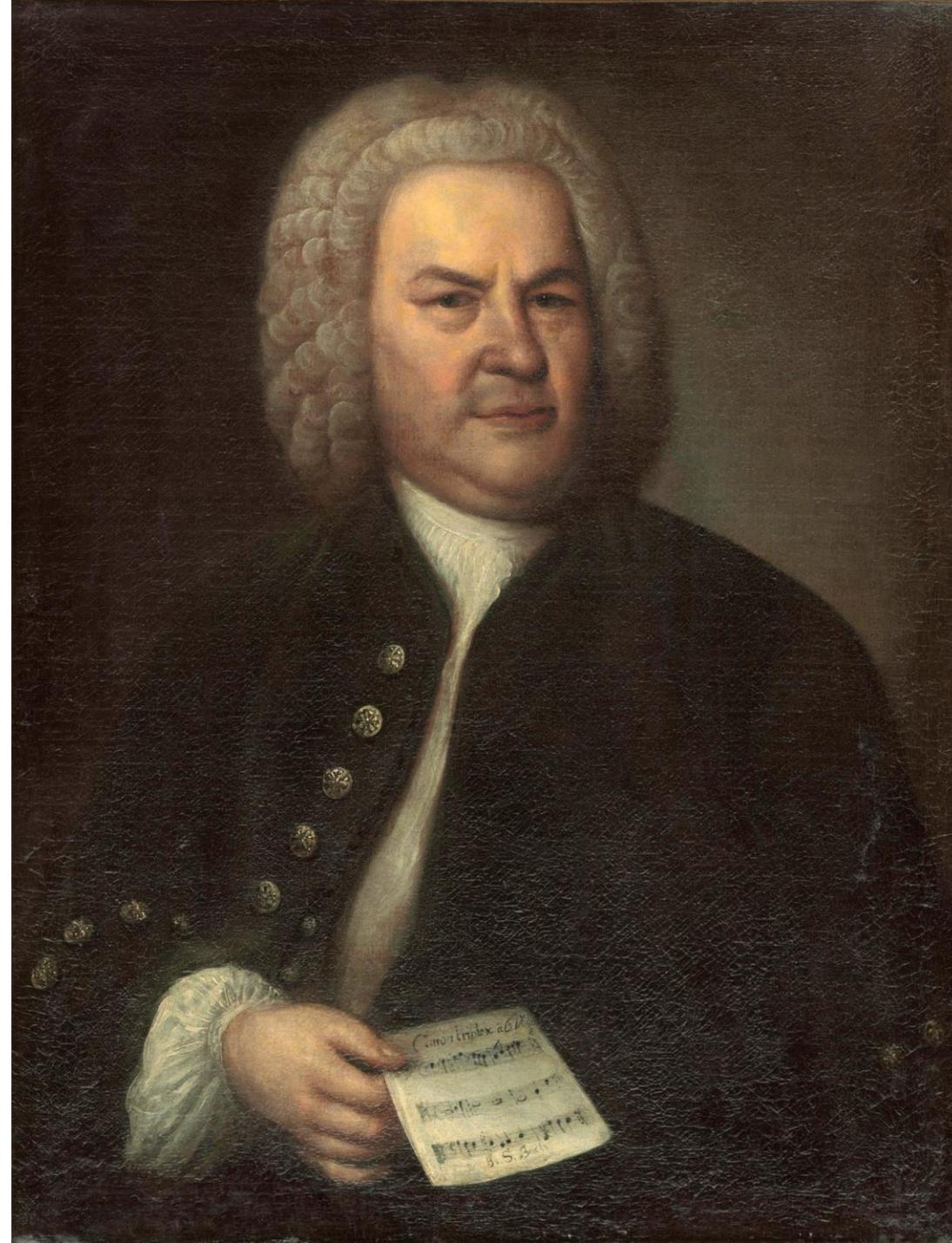
dans le prochain épisode ...

- les spectres
- la vision des chats
- les couleurs
- le piano logarithmique



dans le prochain épisode ...

- les spectres
- la vision des chats
- les couleurs
- le piano logarithmique
- le tempérament de Bach



dans le prochain épisode ...

- les spectres
- la vision des chats
- les couleurs
- le piano logarithmique
- le tempérament de Bach
- etc ...

