

Écouter, regarder l'emprise des sens

Pierre Gilliot

Special Guest Star

Mathieu Gallart



physiquepourtous.unistra.fr



Institut de physique et chimie des matériaux de Strasbourg



Écouter, regarder l'emprise des sens

Spectres

consonances & harmonies

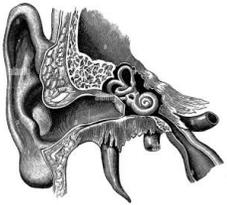
Mathias Grünewald
Retable d'Issenheim
(entre 1512 et 1516)
*Musée Unterlinden -
Colmar*

Spectres

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



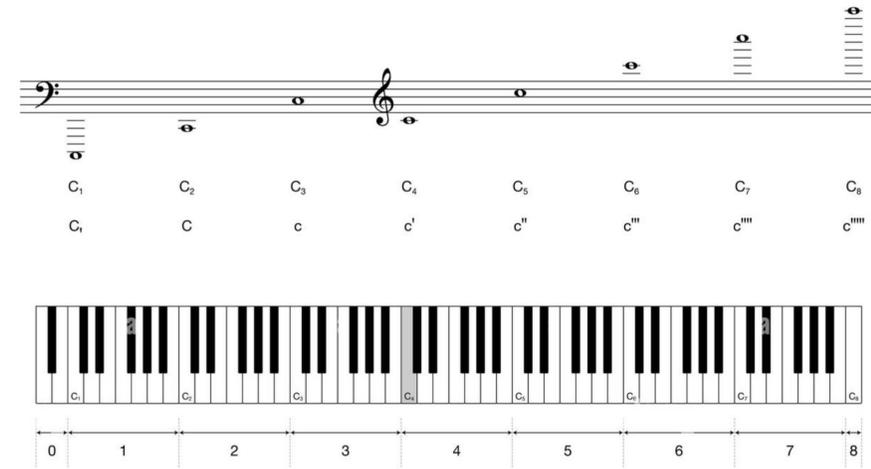
des sons très graves aux sons très aigus

- La fréquence donne la couleur de la lumière



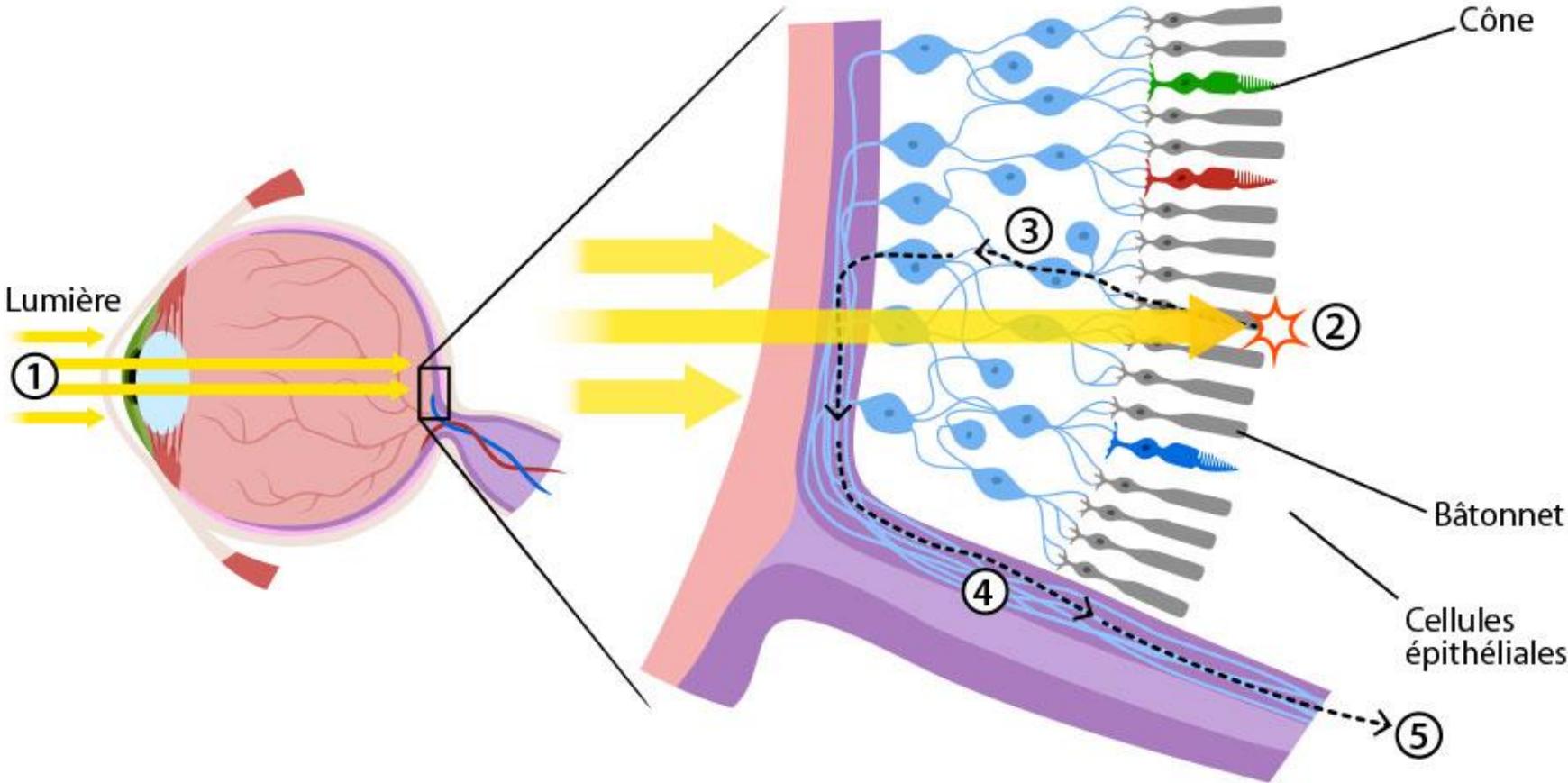
de 375 THz à 650 THz

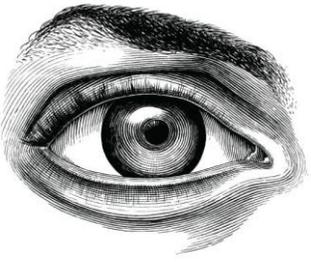
de la couleur rouge à la couleur bleue



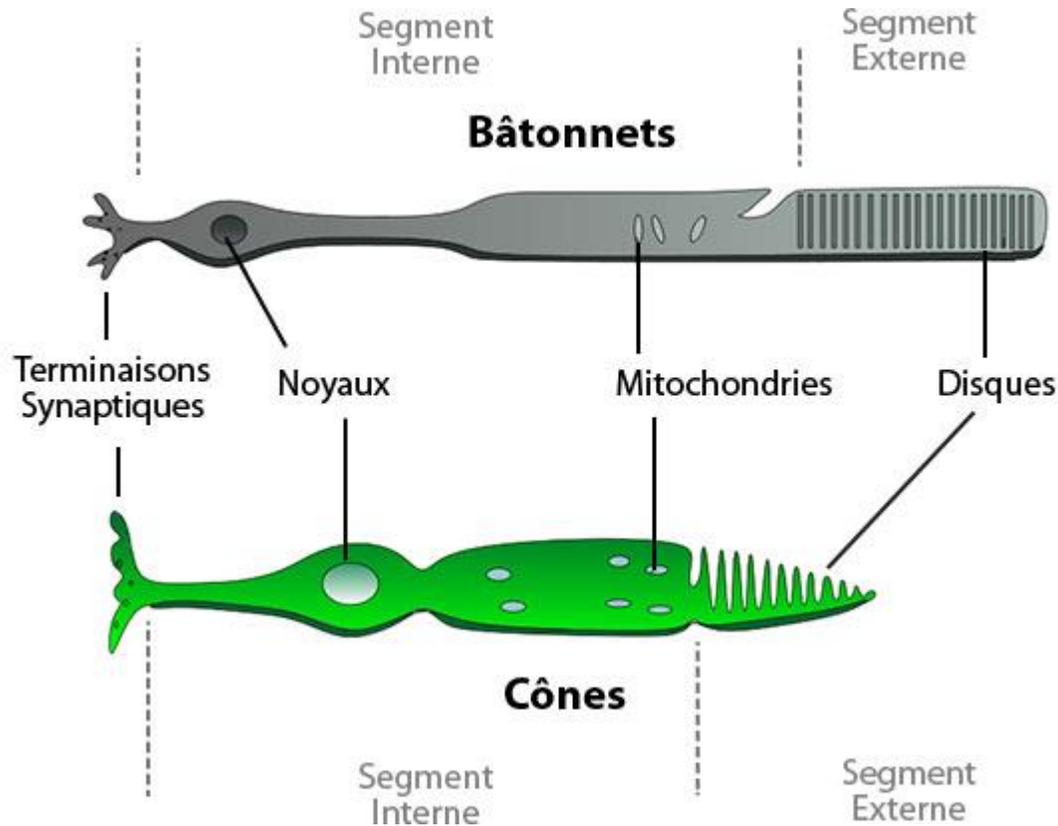


Les capteurs de la rétine : cônes et batonnets





Les capteurs de la rétine : cônes et bâtonnets



Bâtonnets : sensibilité

Cônes : vision de la couleur



Bâtonnets

La nuit tous les chats sont gris ...

parce que les bâtonnets sont plus sensibles que les cônes ils prennent le relais quand l'intensité lumineuse est faible.

Statuette de Bastet

(-664 / -610)

Musée du Louvre

Bâtonnets

Cela nous permet de comprendre une image en noir et blanc et de l'apprécier malgré l'absence d'information de couleur :

- gravure

Albrecht Dürer
Melancholia I
(1514)

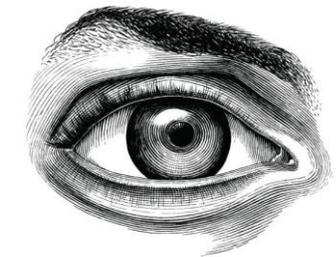


Bâtonnets

- gravure
- photographie en noir et blanc

Gustave le Gray
Brick au clair de lune
(1856)

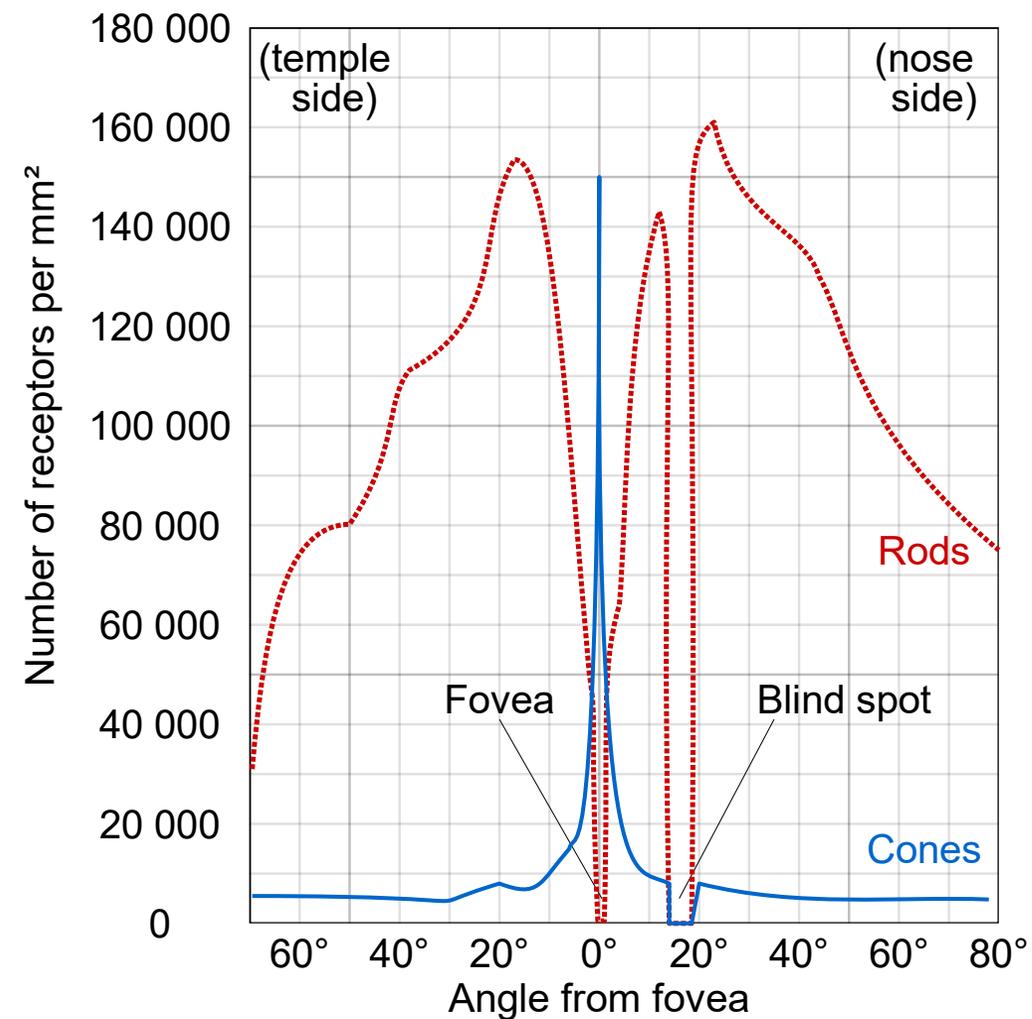


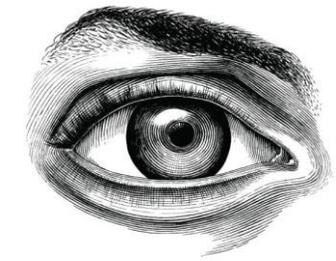


Les capteurs de la rétine : cônes et bâtonnets

répartition différente :

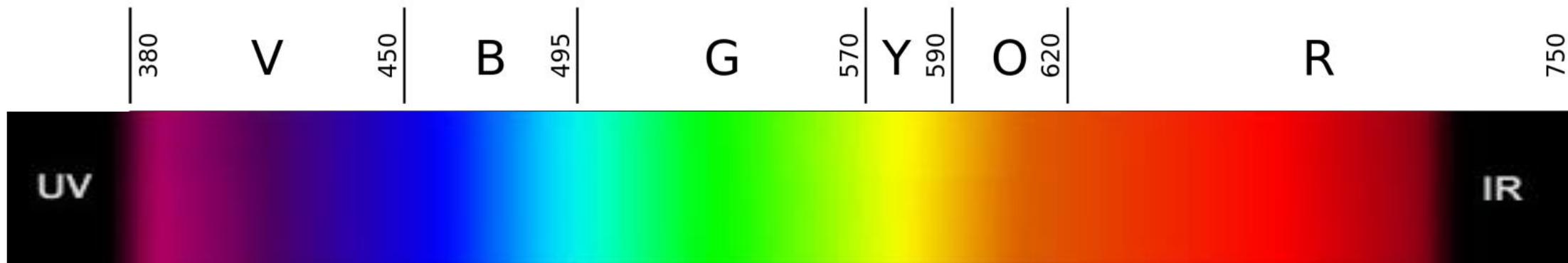
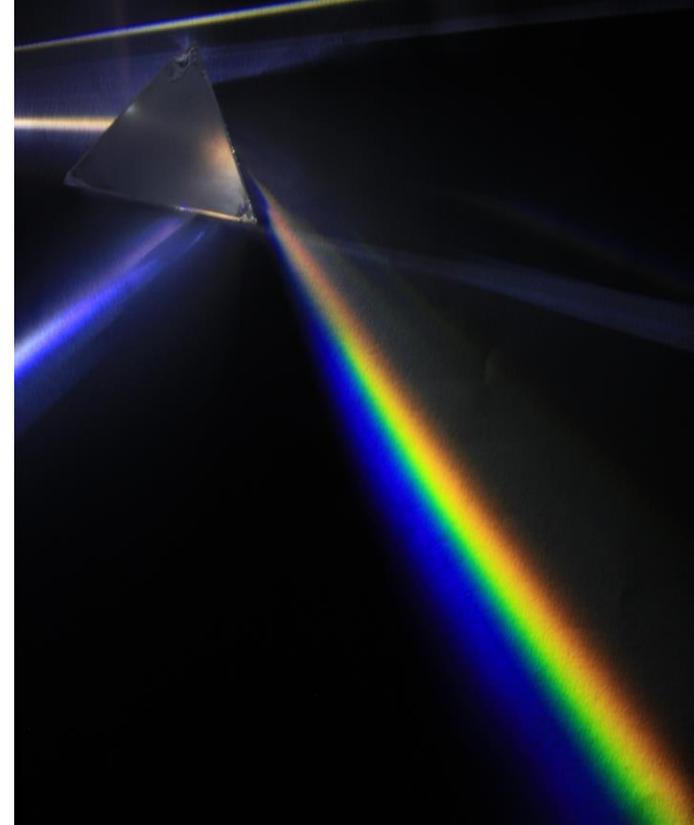
- cônes au centre de l'œil
- bâtonnets sur toute la rétine, donnent vision périphérique





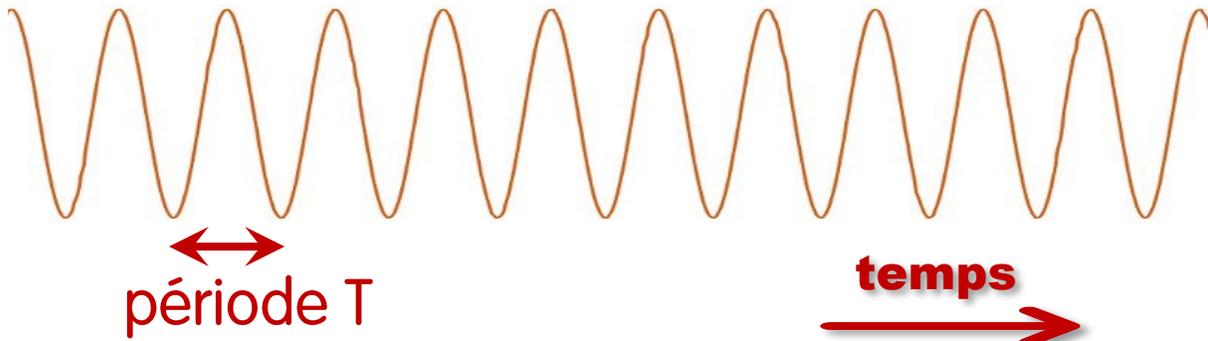
Couleurs : le spectre visible

La couleur blanche est un mélange de toutes les longueurs d'onde (toutes les fréquences) émises par le soleil.

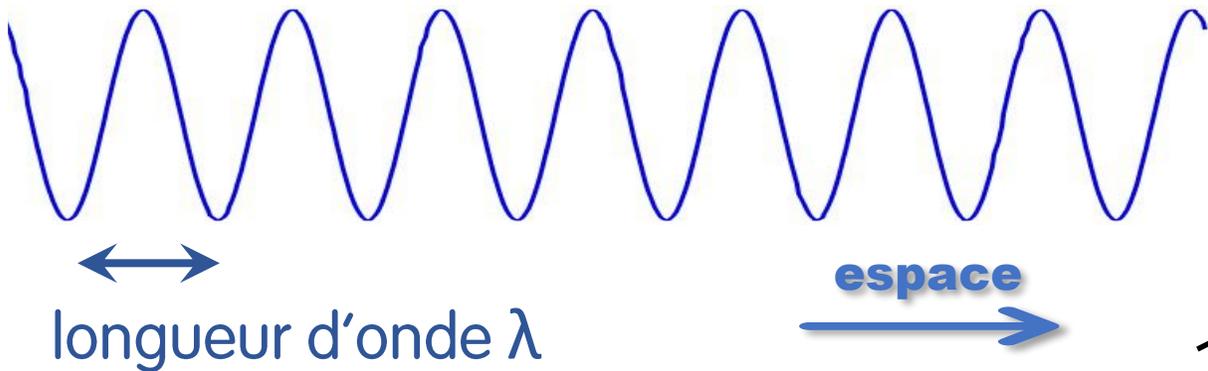


fréquence & longueur d'onde

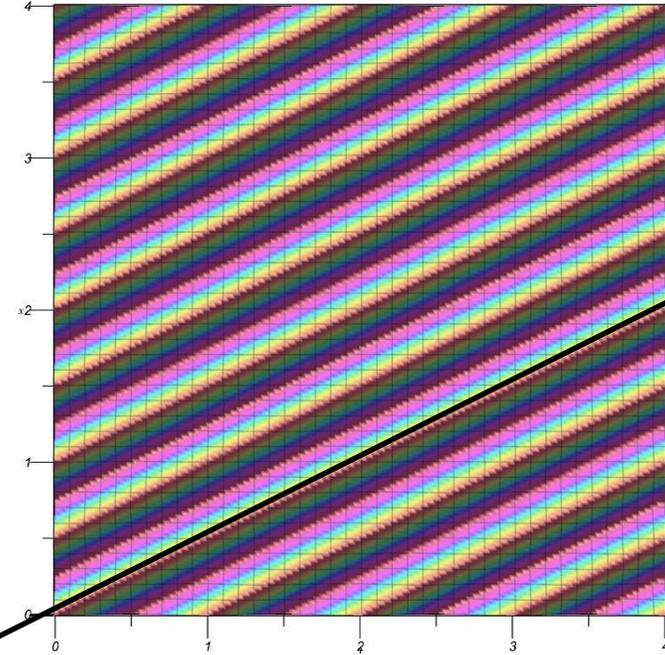
à un endroit donné : évolution dans le temps



à un moment donné : image de l'onde



espace ↑

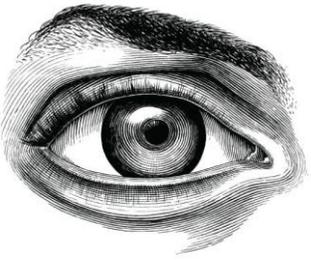


vitesse c

temps →

$$\lambda = c \cdot T$$

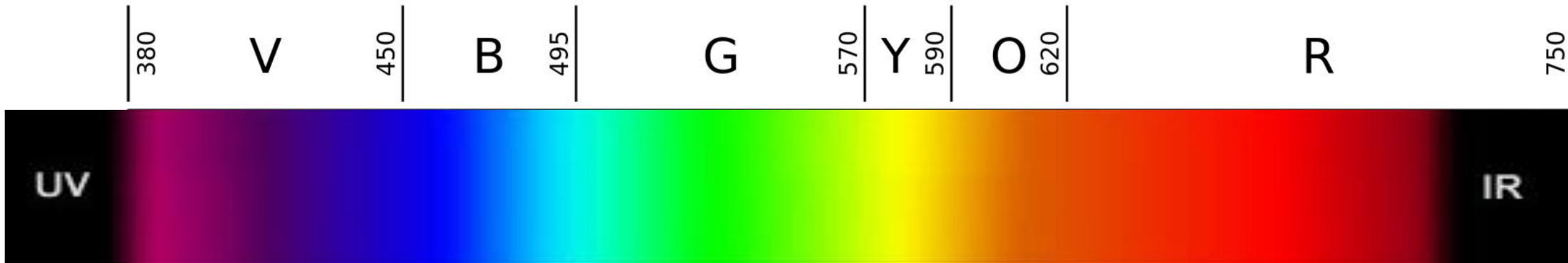
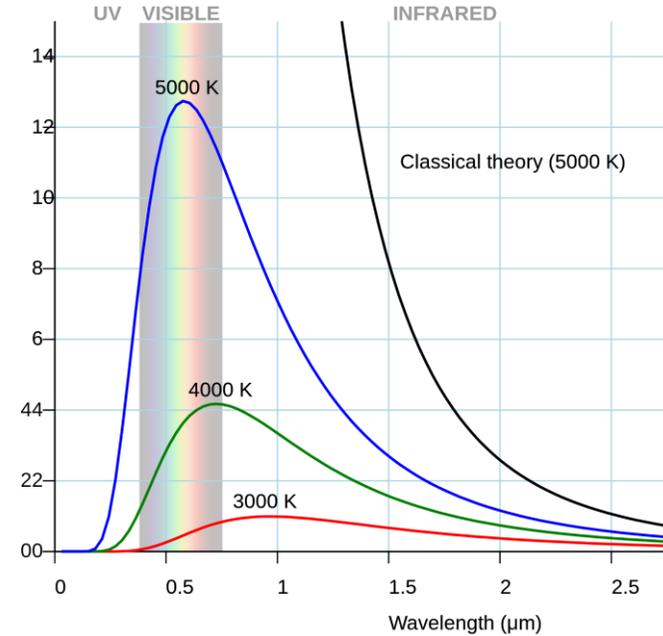
$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

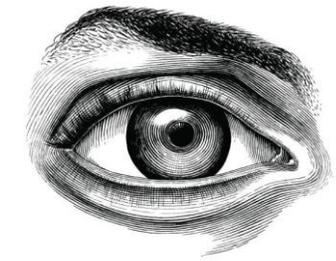


Couleurs : le spectre visible

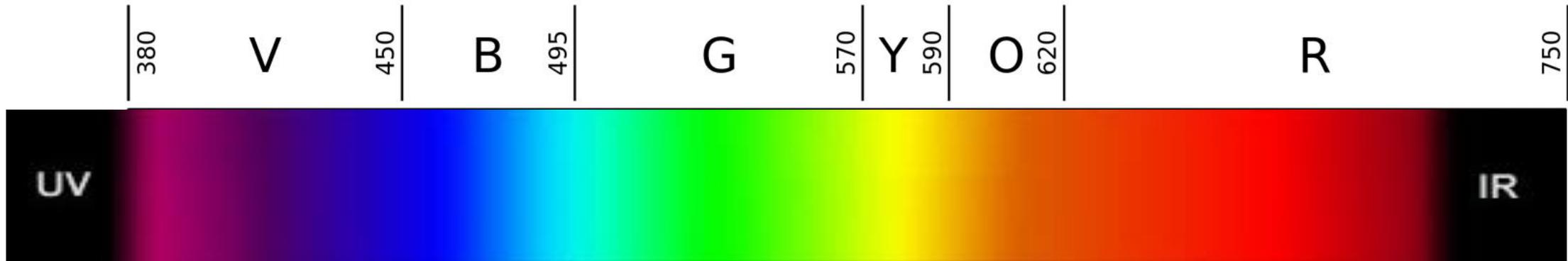
La couleur blanche est un mélange de toutes les longueurs d'onde (toutes les fréquences) émises par le soleil.

Notre œil s'est adapté au spectre solaire : un « corps noir » à la température (de surface) de $5772\text{ K} = 5500^\circ\text{C}$





Couleurs : le spectre visible

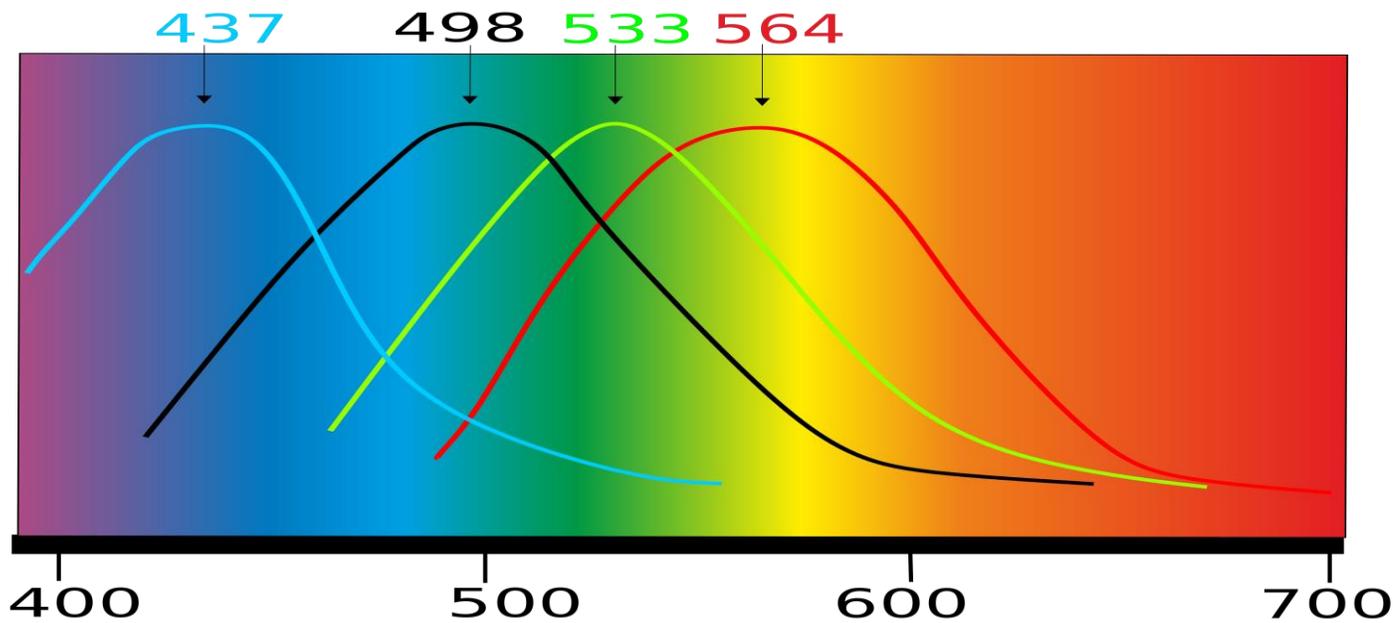
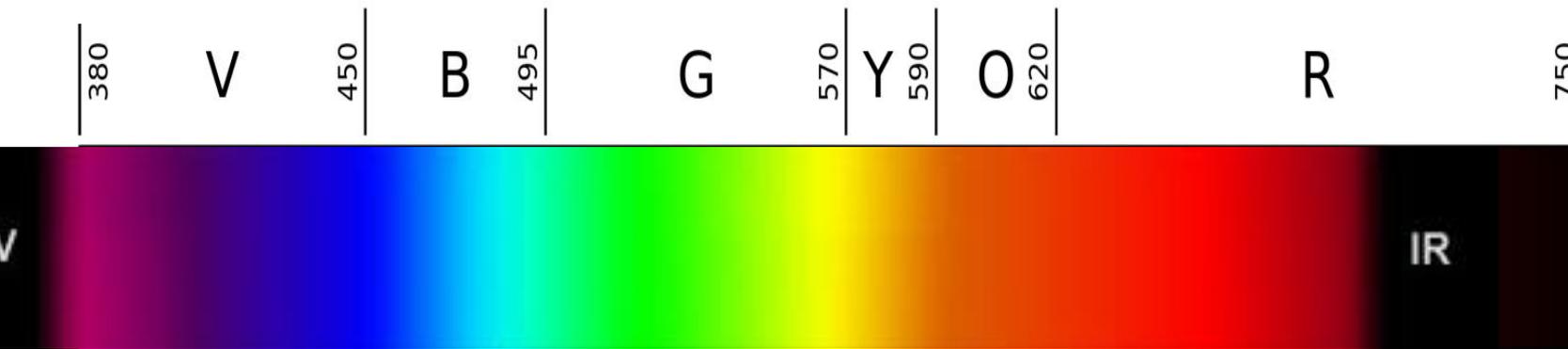


S'il y a « toutes » les longueurs d'onde,
pourquoi certaines couleurs telles que le blanc ou le marron
manquent-elles ?

Comment se débrouille notre œil pour différencier les couleurs ?
Y-a-t'il « autant » de types de cônes que de couleurs ?



Couleurs : les cônes

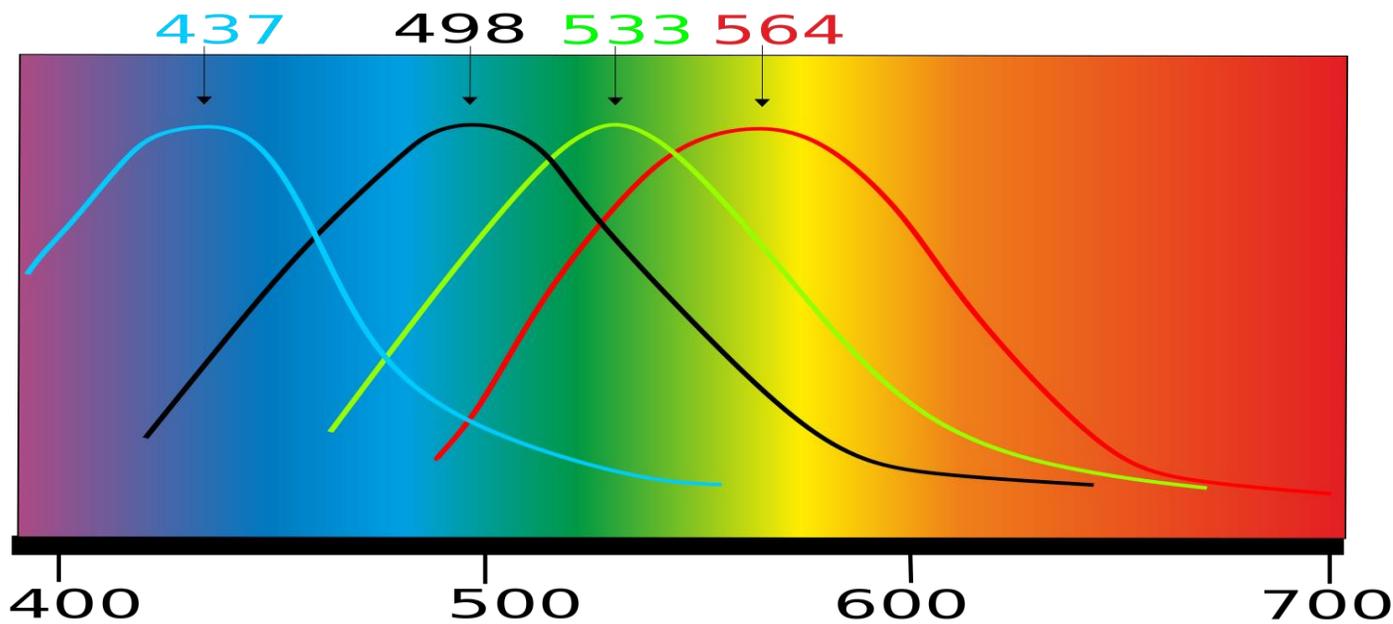
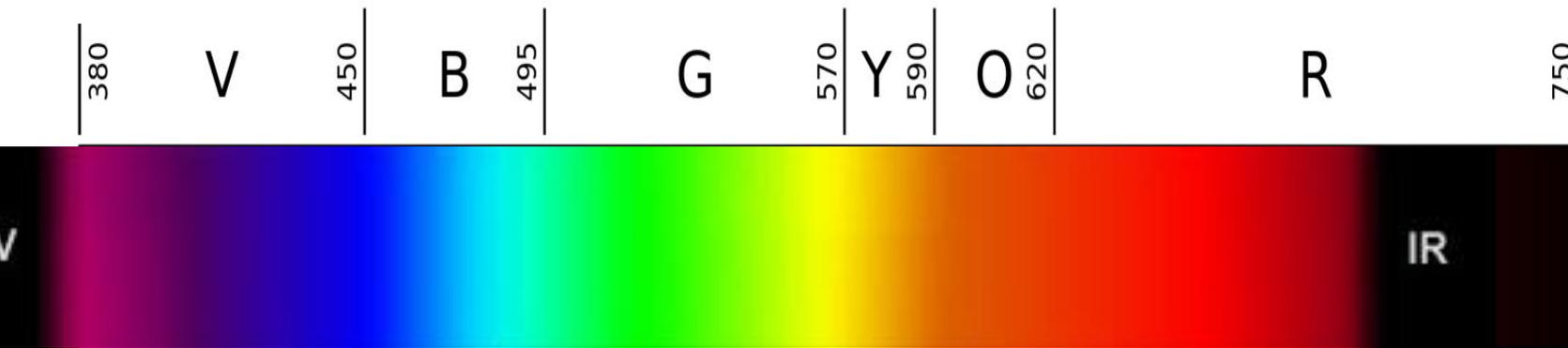


Notre œil a trois types de capteurs pour les couleurs :

- R rouge centré sur 564 nm
- V vert centré sur 533 nm
- B bleu centré à 437 nm



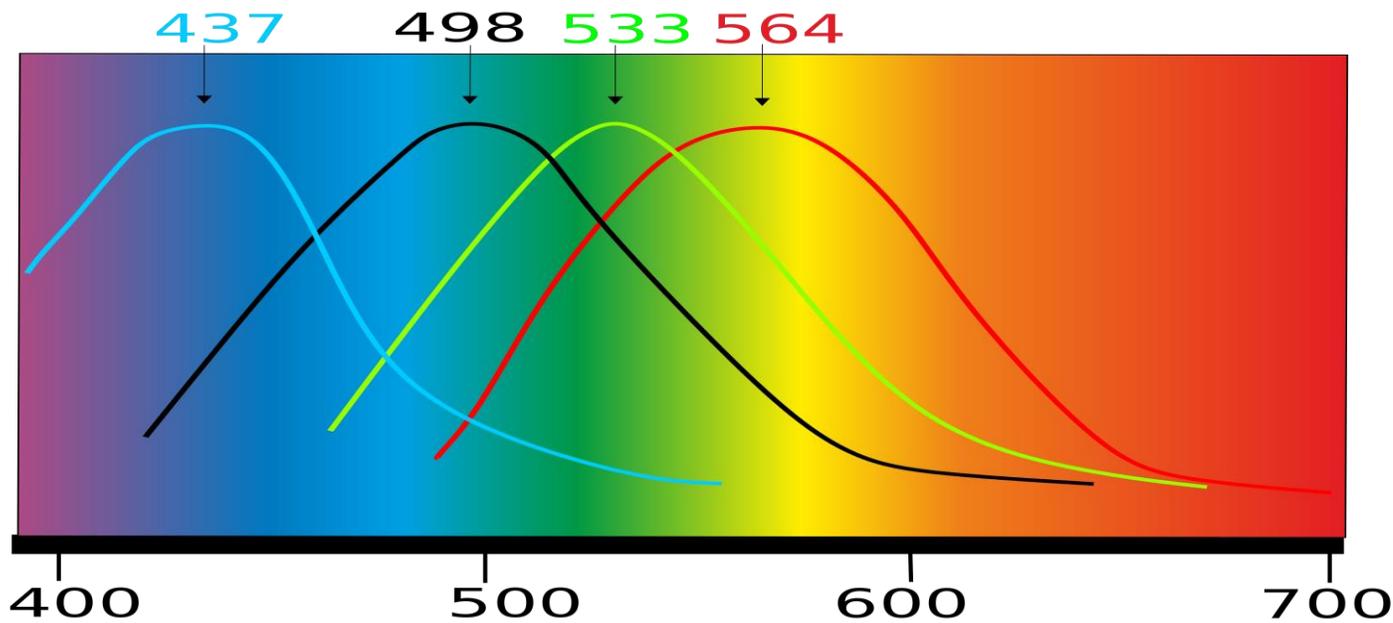
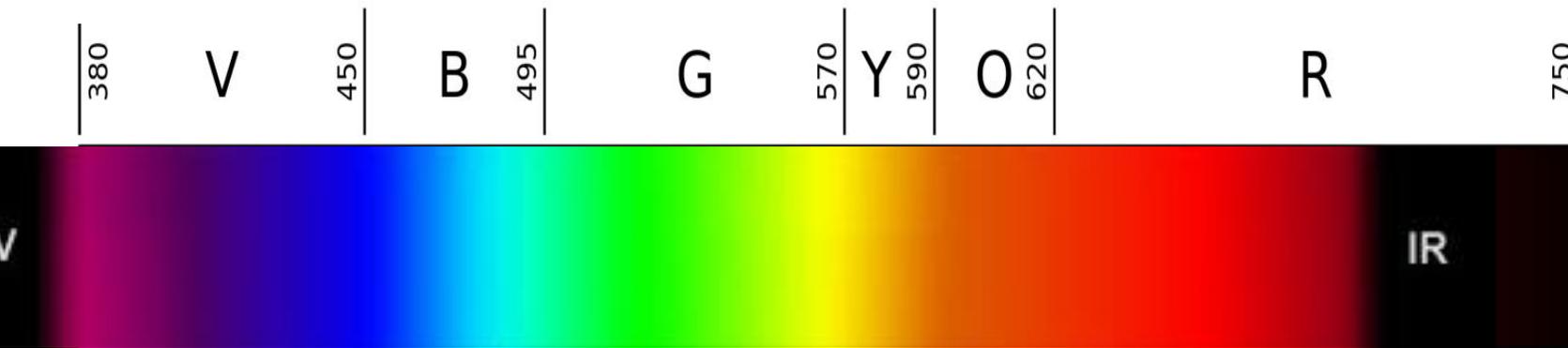
Couleurs : les cônes



Chaque type de capteur contient une molécule photosensible différente (des opsines pour les cônes et de la rhodopsine pour les bâtonnets).

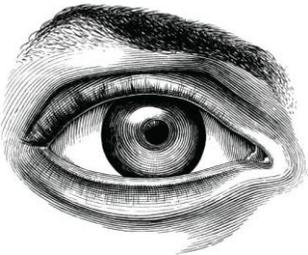


Couleurs : les cônes



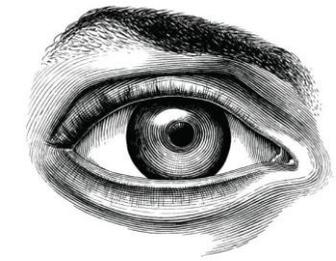
Les réponses se « recouvrent » : le jaune est perçu comme un mélange de signaux R et B.

Un cône ne sait pas quelle longueur d'onde portait le photon qu'il a absorbé. Il compte les photons.



Vision des animaux

<u>Arbre phylogénétique</u> simplifié	Type de vision	Longueurs d'onde
<u>Tétrapode</u> primitif	Quadrichromie	
<u>Squamate, oiseaux, crocodilien</u>	Quadrichromie	565, 508, 445 et 370 nm
<u>reptile mammalien</u>	Quadrichromie	
<u>Mammifères</u> primitifs	Bichromie	560 et 424 nm
autres mammifères	Bichromie ou trichromie	
<u>Euarchontoglires</u> (primates (dont l'humain), lapin)	Trichromie	560, 530 et 424 nm

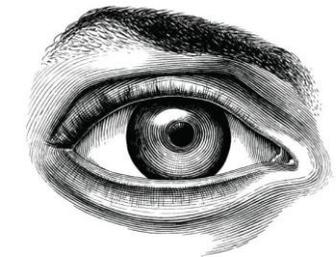


Défauts de vision

Certains types de cônes peuvent être déficients.

Daltonisme par exemple : non différenciation du vert et du rouge



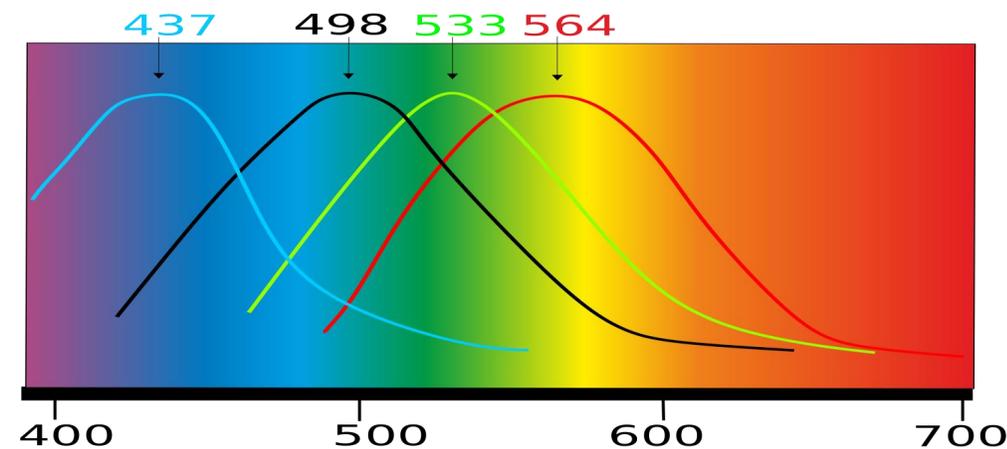
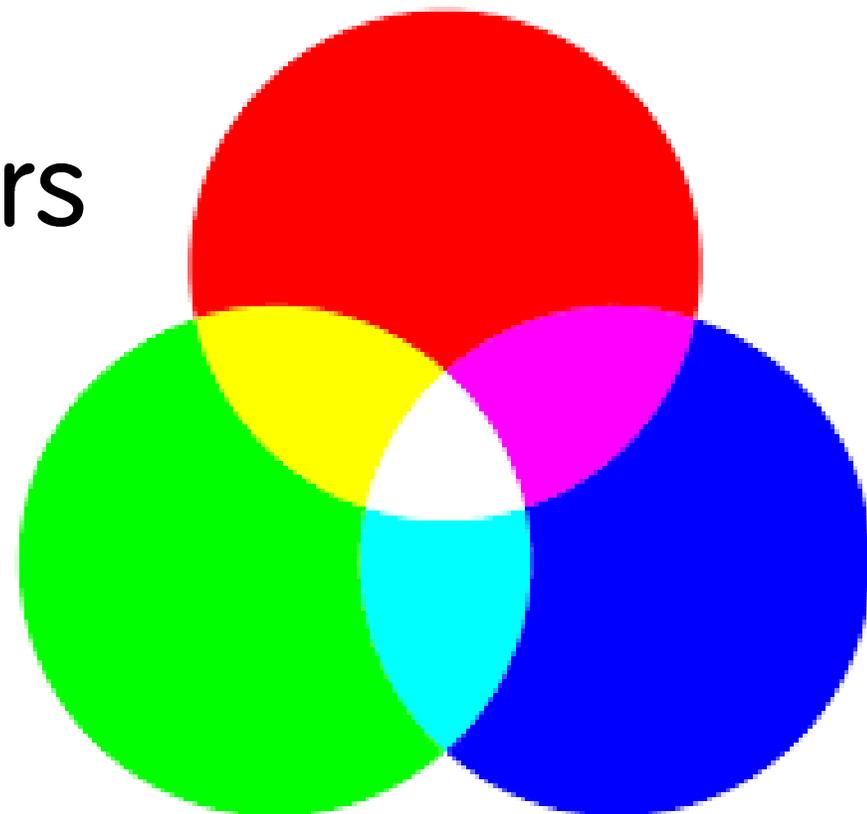


Synthèse des couleurs

On peut reconstituer une couleur en excitant les mêmes cônes que ceux de la couleur du spectre.

Exemple, pour avoir du jaune :

- soit on envoie une longueur d'onde dans la zone jaune du spectre
- soit on envoie un mélange de rouge et de vert qui excite les cônes R et V avec les même proportions que ne l'aurait fait le jaune



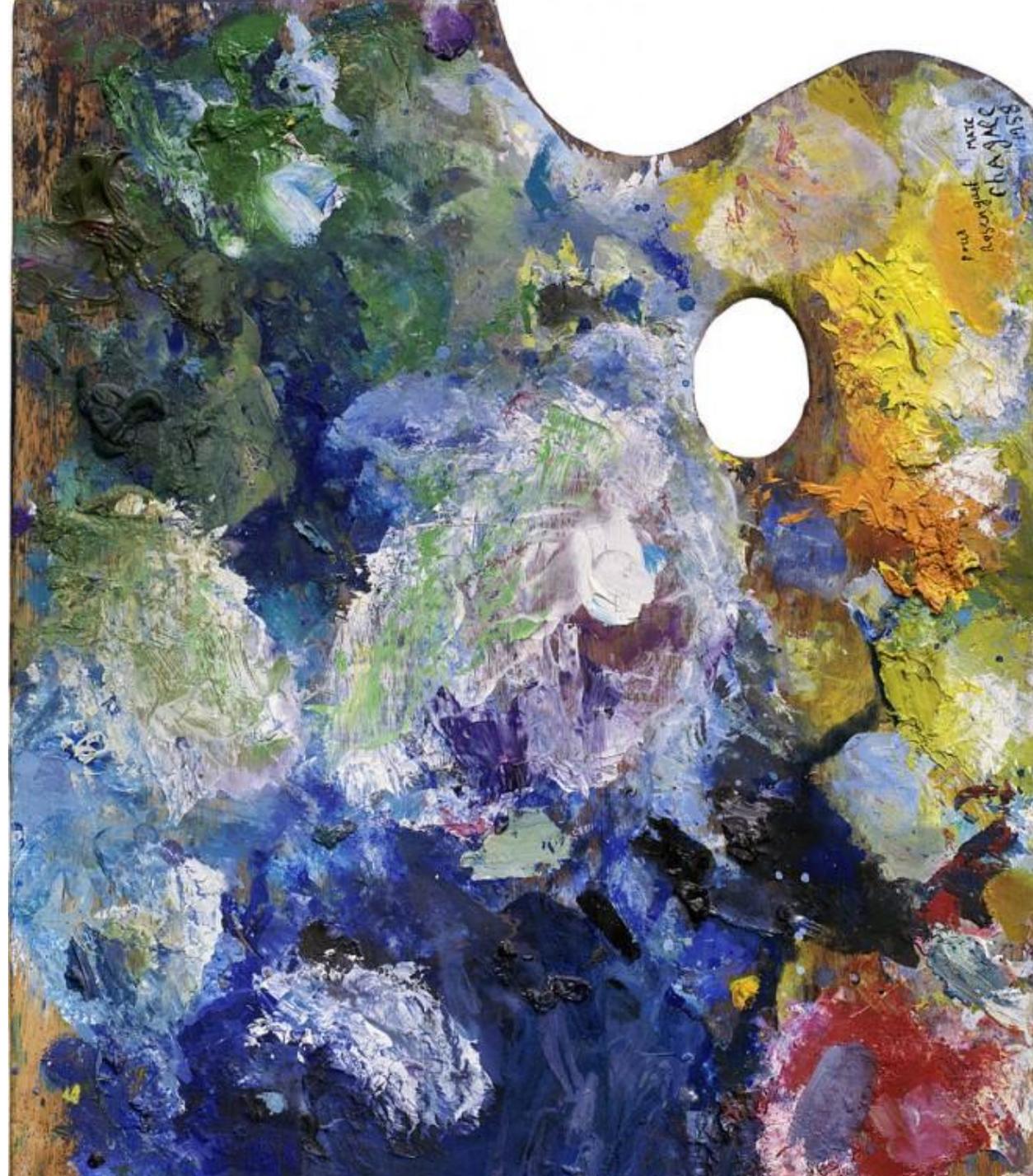
Les couleurs du peintre

Les couleurs sont
soit des colorants purs
soit des mélanges.



Marc Chagall
La promenade (détail)
(1917)
*Musée russe –
Saint Pétersbourg*

Palette de Marc Chagall
<https://www.laboiteverte.fr/des-palettes-de-peintres-celebres-2/>



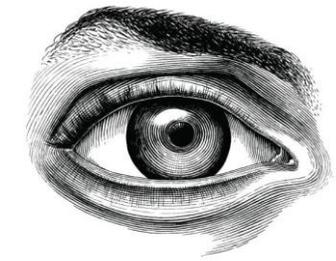
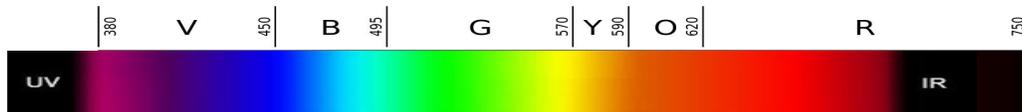
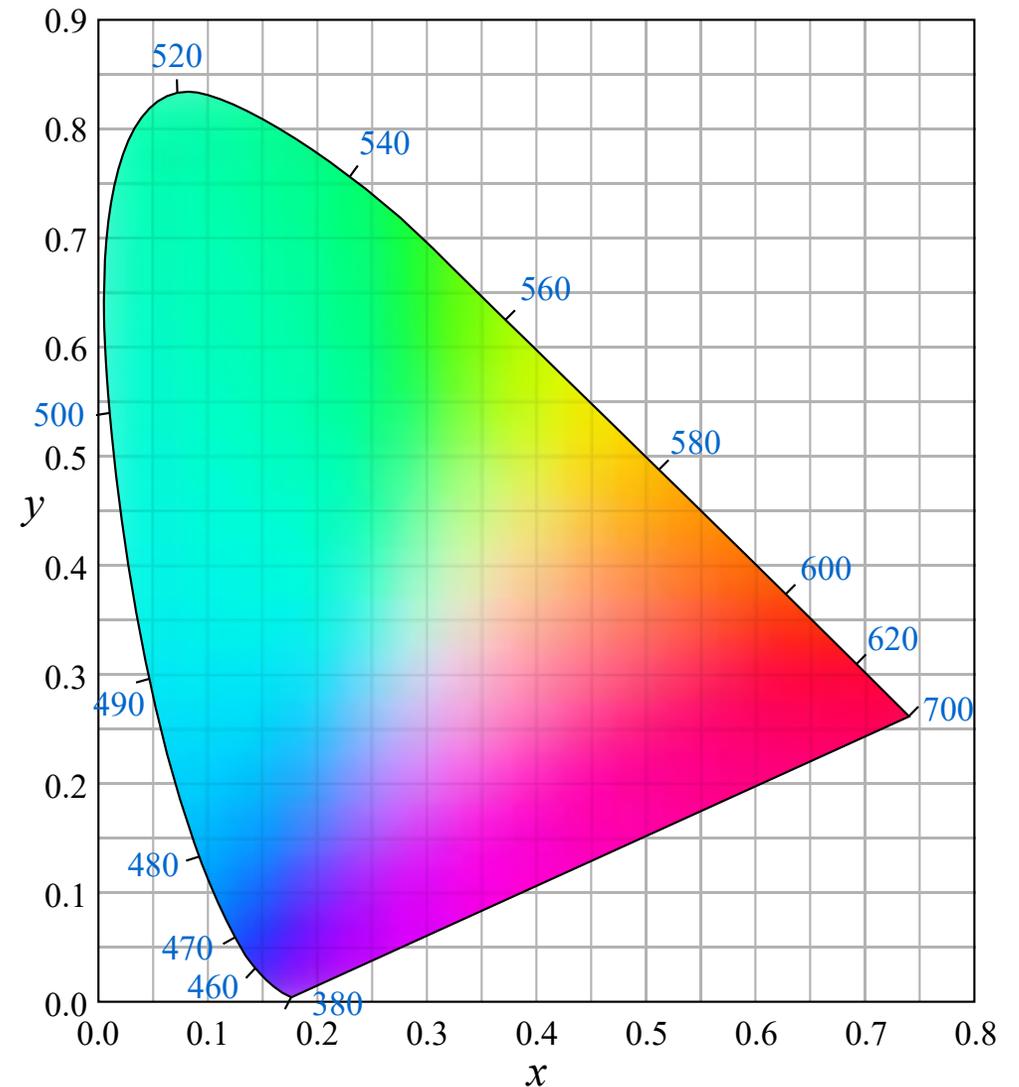
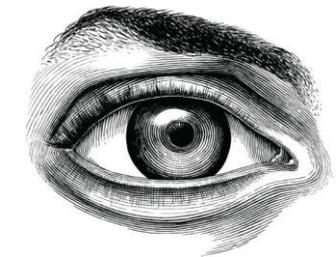


Diagramme de chromaticité

Les couleurs se reportent sur diagramme qui ressemble à un triangle.

La couleur peut se définir avec deux nombres. (La somme des valeurs des trois capteur est ramenée à 1.)





Couleurs complémentaires

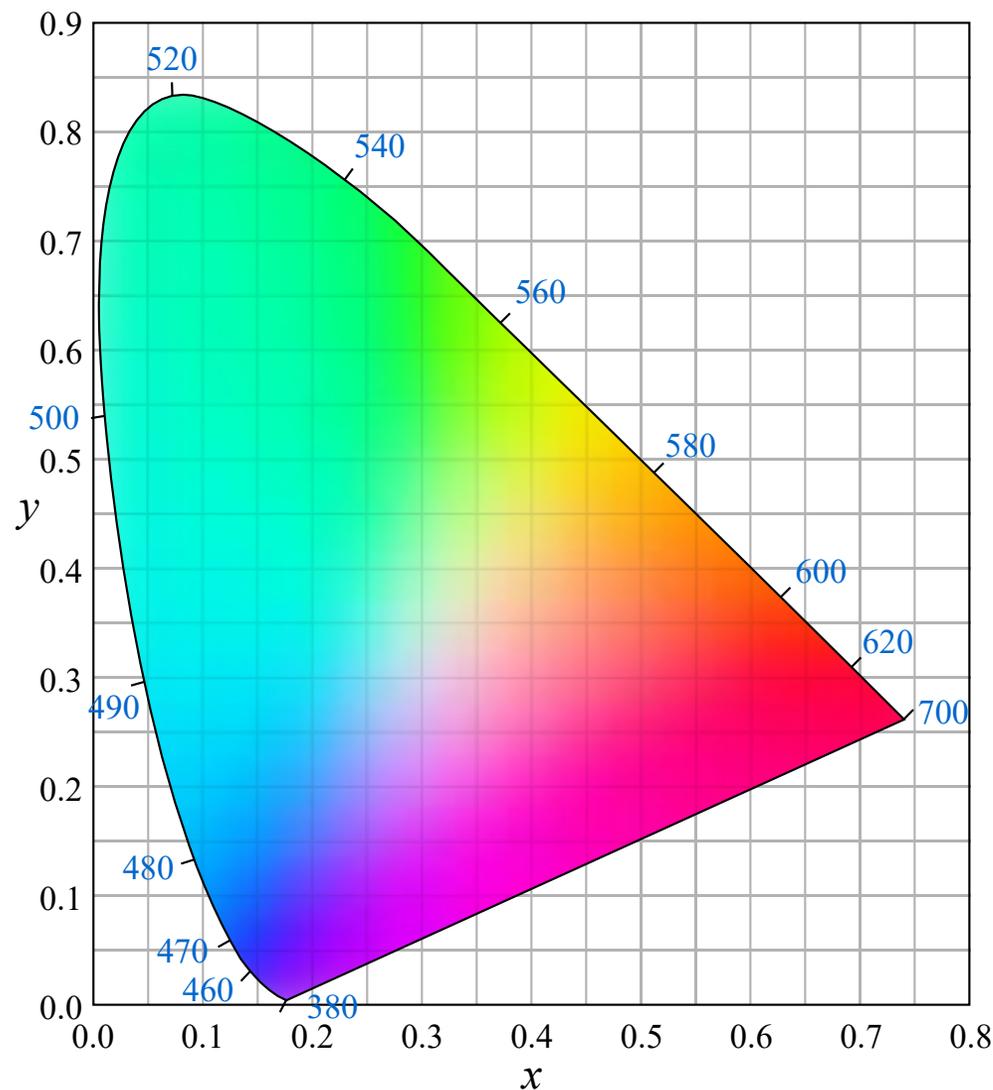
Si on « enlève » une couleur au spectre blanc, il reste la couleur complémentaire.

Elles « vont bien ensemble ».

Elles correspondent à des excitations opposées des trois capteurs.

Les couleurs complémentaires sont disposées à des points opposés sur le diagrammes

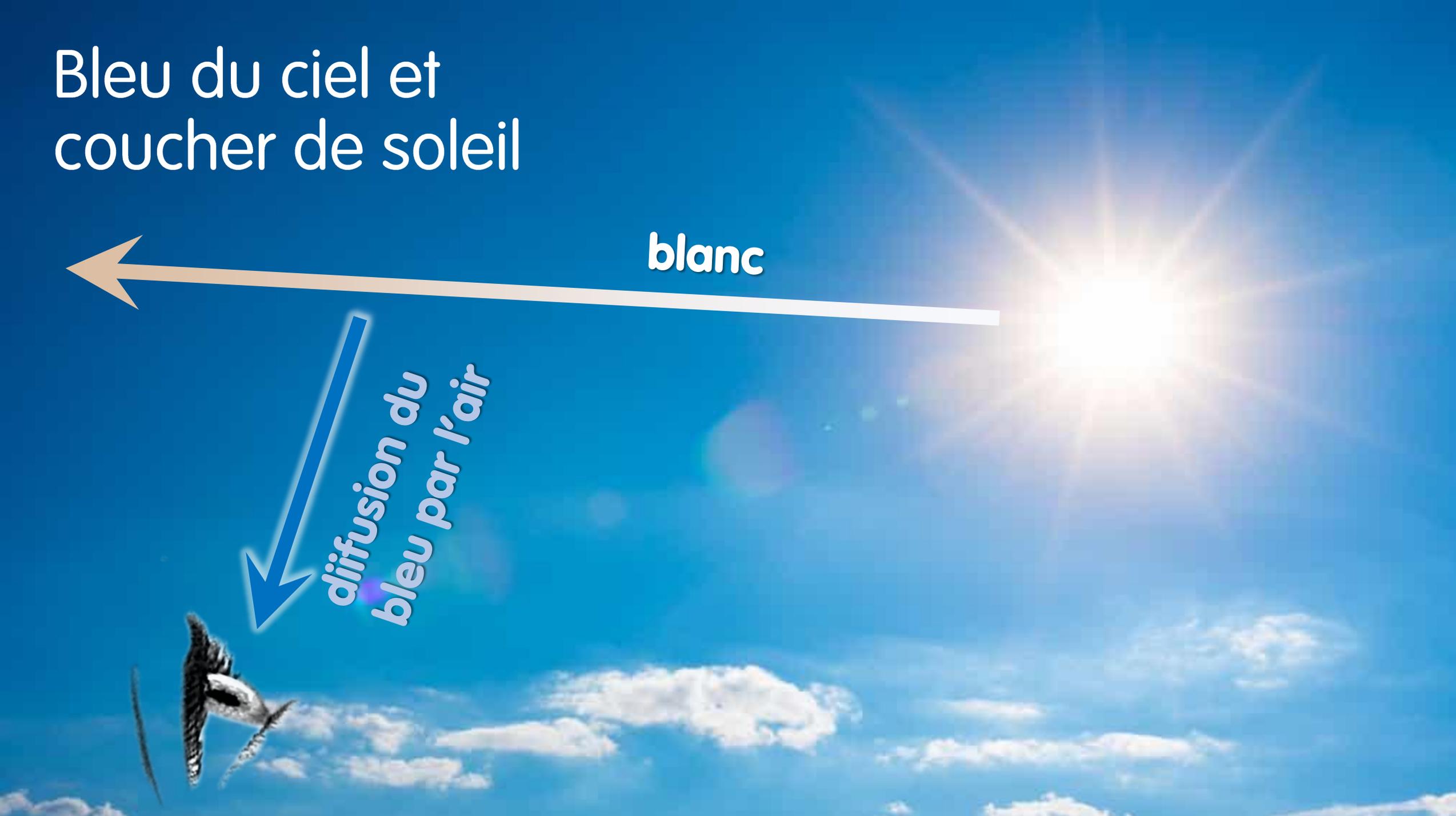
Les roux s'habillent en vert ...



Bleu du ciel et coucher de soleil

blanc

diffusion du
bleu par l'air



Bleu du ciel et coucher de soleil

diffusion du
bleu par l'air

reste la couleur complémentaire

Couleurs complémentaires

William Turner
**The Fighting
Temeraire tugged to
her last berth to be
broken up**
(1838)
*National Gallery –
Londres*

éruption explosive du Tambora
en Indonésie le 10 avril 1815

Palette de Turner

<https://www.laboiteverte.fr/des-palettes-de-peintres-celebres-2/>



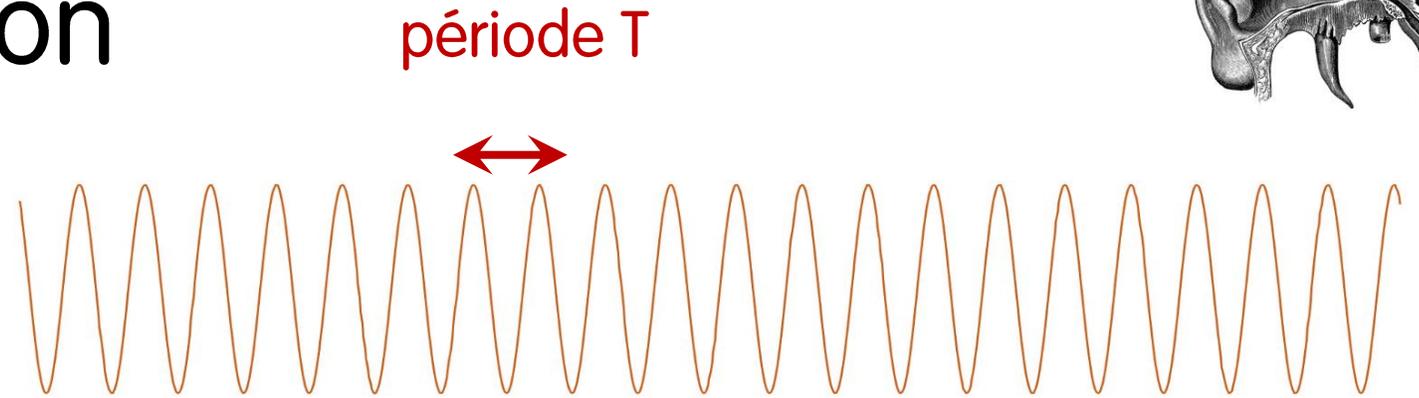
Les sources du son



oscillations

fréquence

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



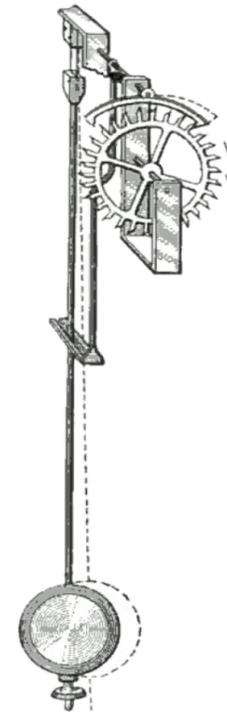
Pendule :

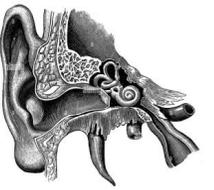
période

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

fréquence

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



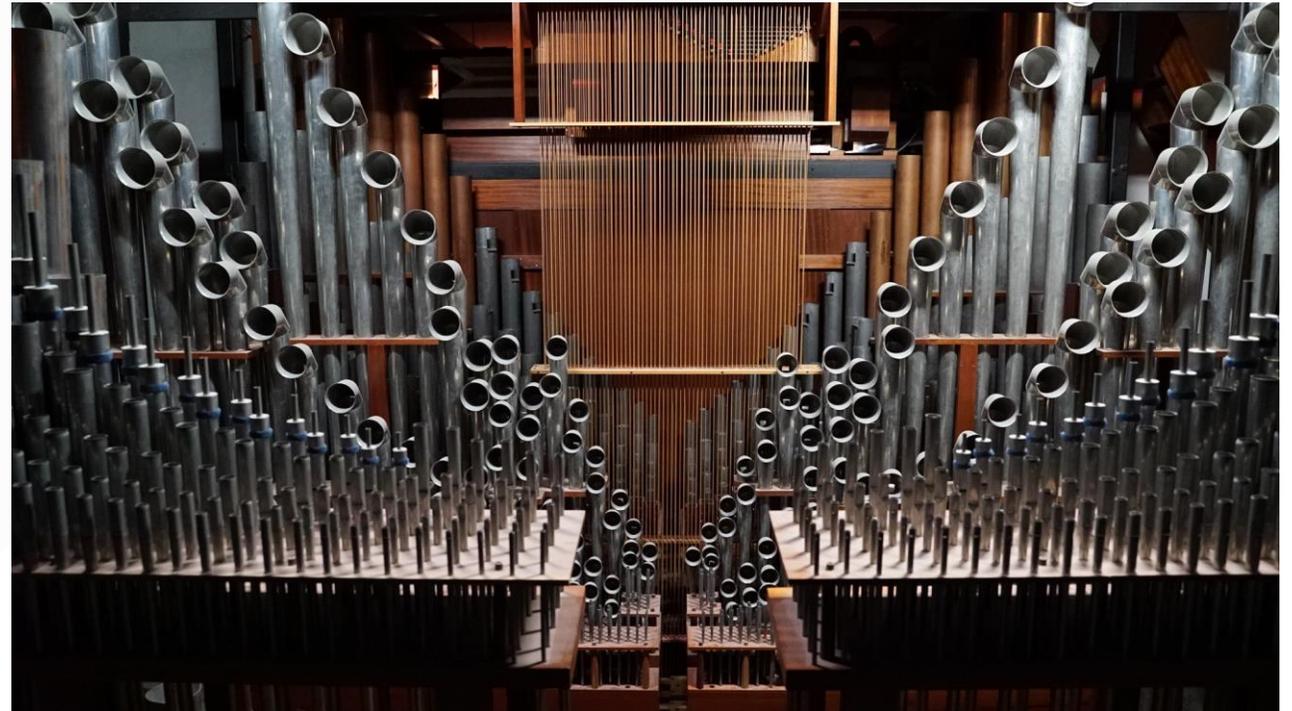


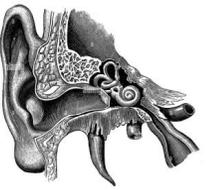
Vibrations



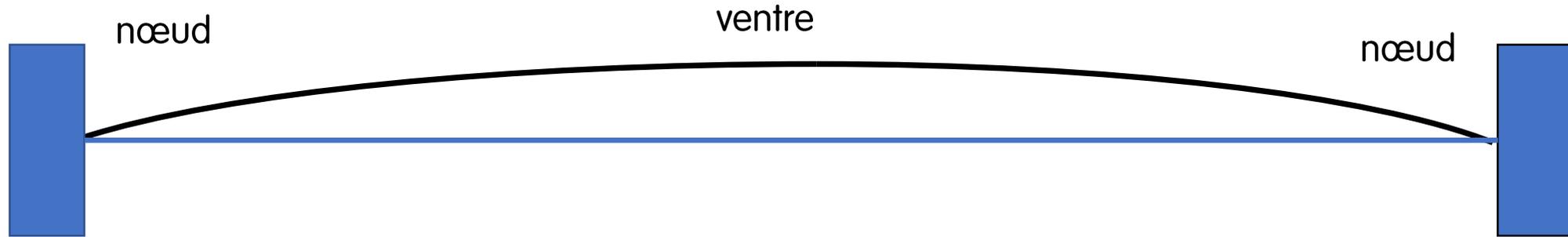
Accord d'un instrument :

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

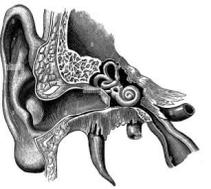




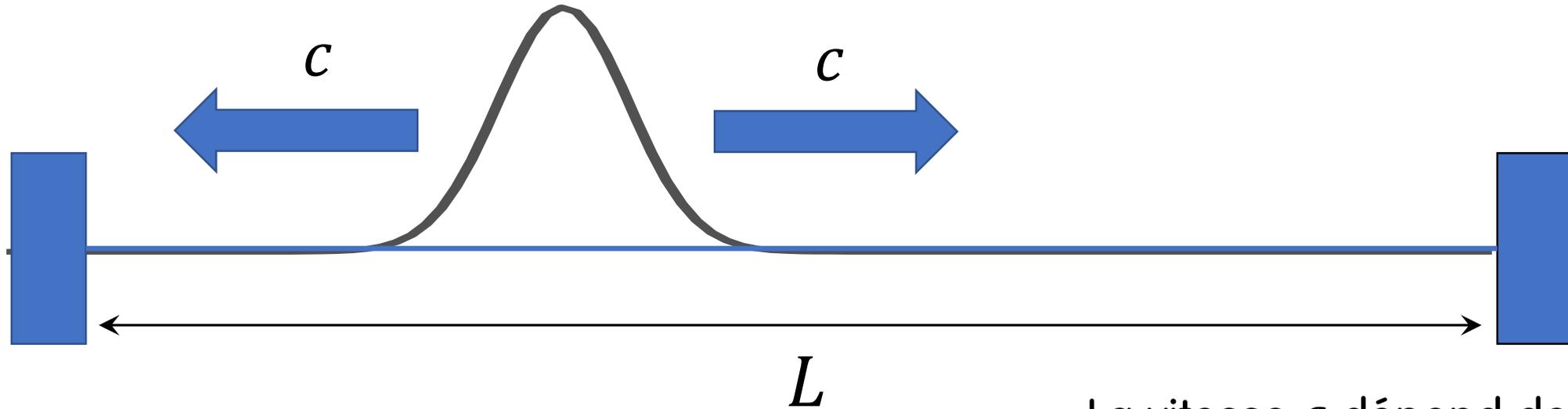
Cordes



La corde est bloquée aux deux bouts : cela limite les mouvements possibles



Fréquence fondamentale



$$T = \frac{2L}{c}$$

$$v = \frac{c}{2L}$$

La vitesse c dépend de la section et de la tension de la corde.

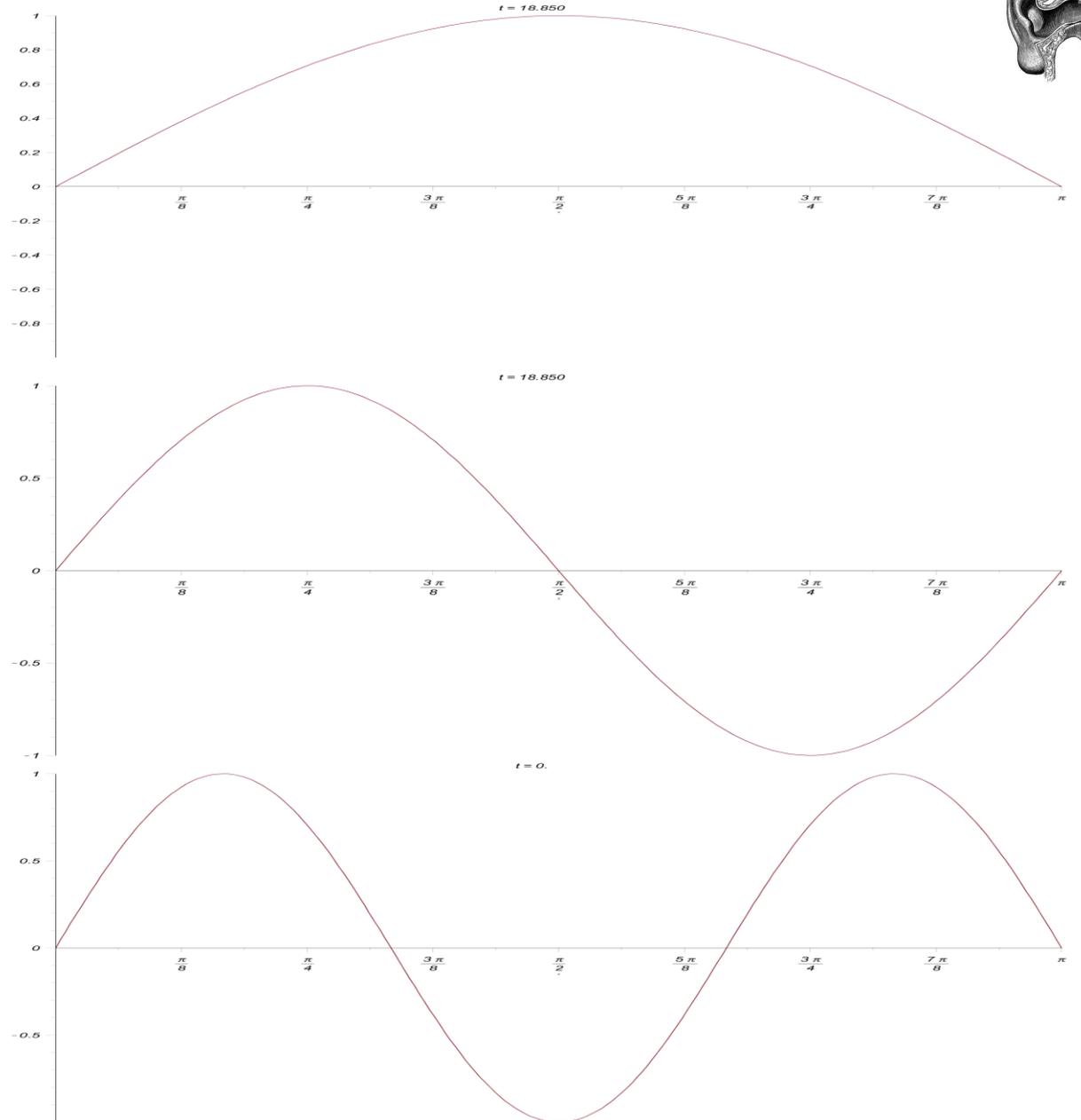
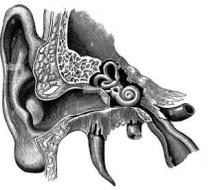
Quand on double la longueur, on divise par 2 la fréquence.

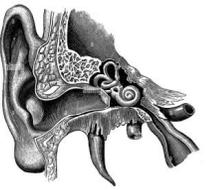
Harmoniques

$$v_0 = \frac{c}{2L}$$

$$v_1 = \frac{2c}{2L}$$

$$v_2 = \frac{3c}{2L}$$



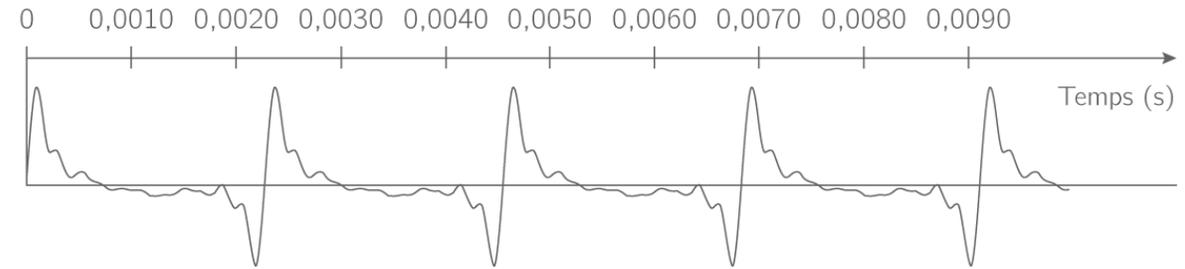


Note de musique

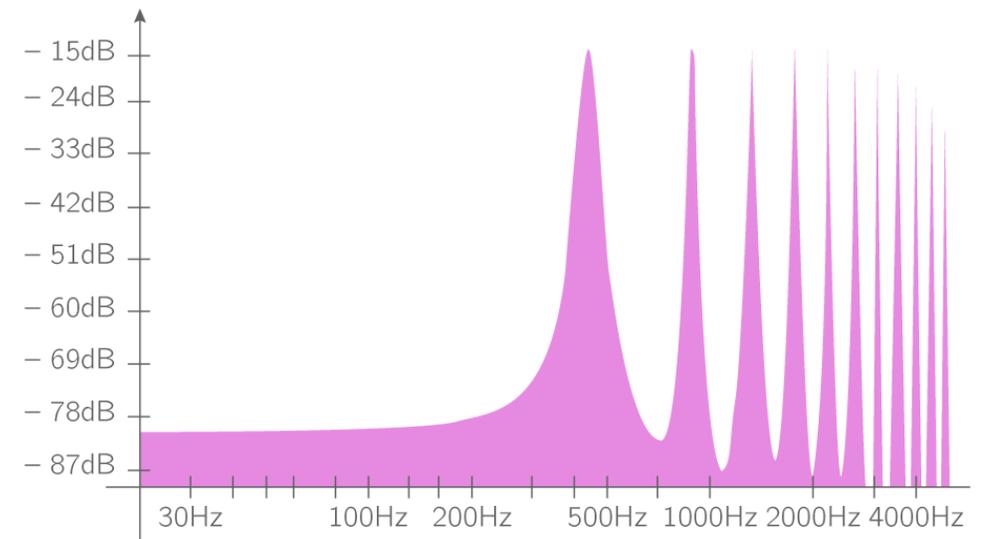
Un son émis par un instrument est la somme de toutes les harmoniques

C'est le poids de chaque d'entre elles qui fait le timbre de l'instrument.

... avec l'attaque : les transitoires.



Signal correspondant au son

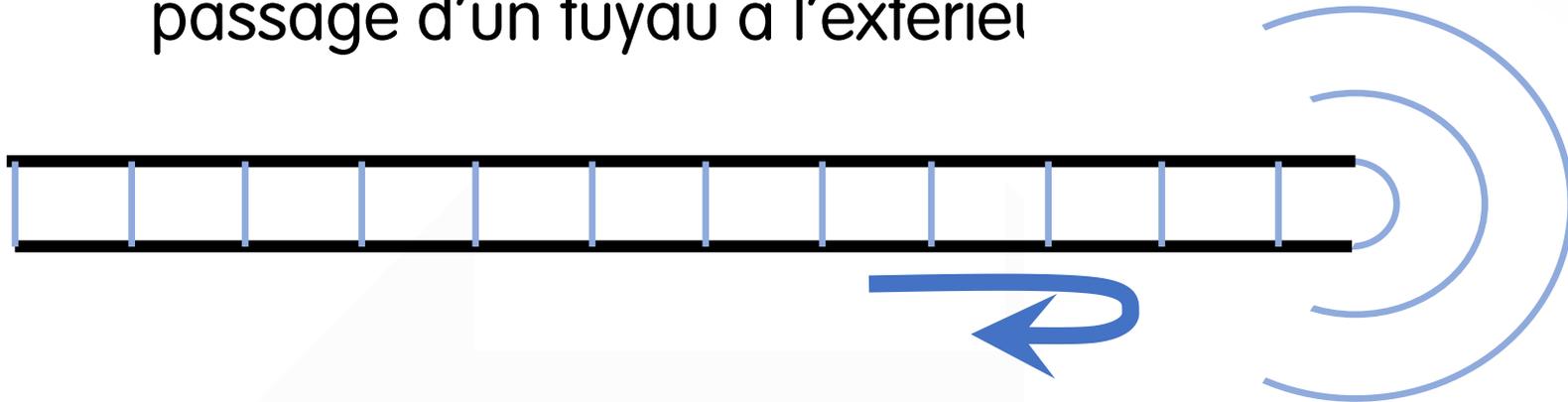


Spectre du signal

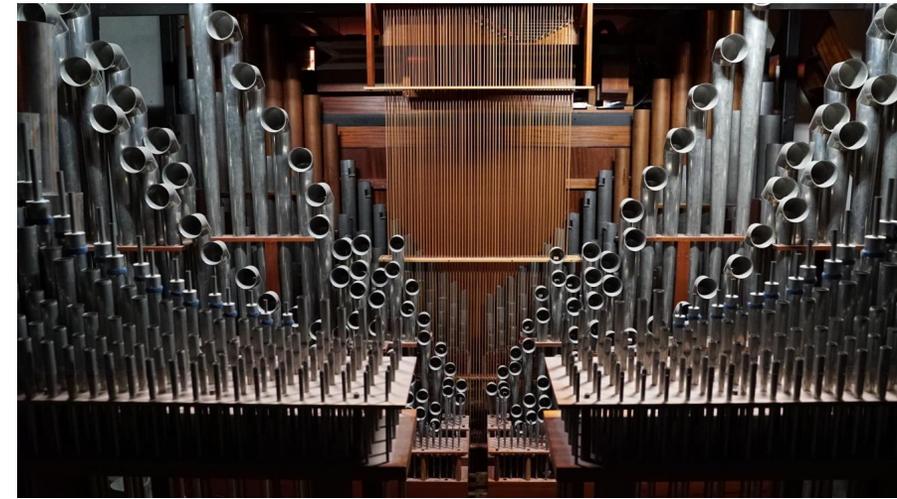
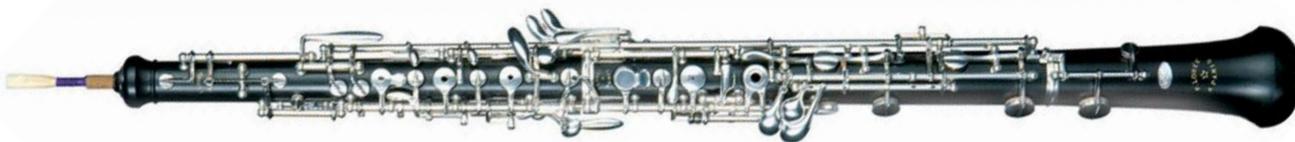
Et les tuyaux ? Impédance

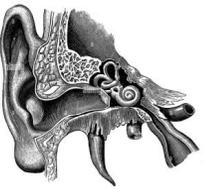


transition entre deux milieux : par exemple
passage d'un tuyau à l'extérieur

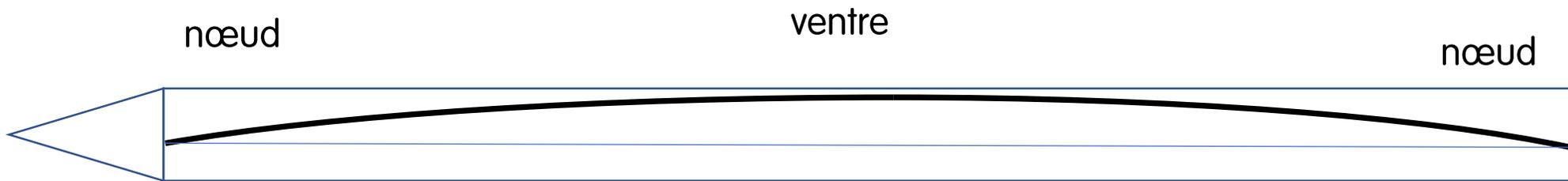
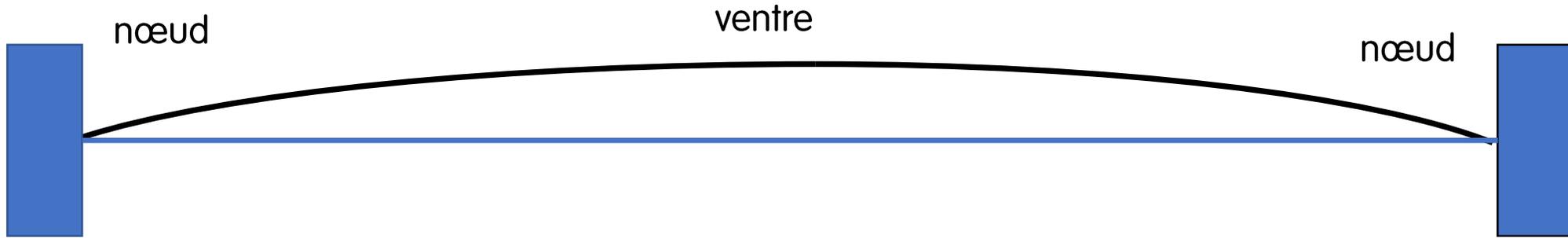


L'onde rebondit aux extrémités





Cordes & tuyaux



tuyau ouvert

tuyau fermé

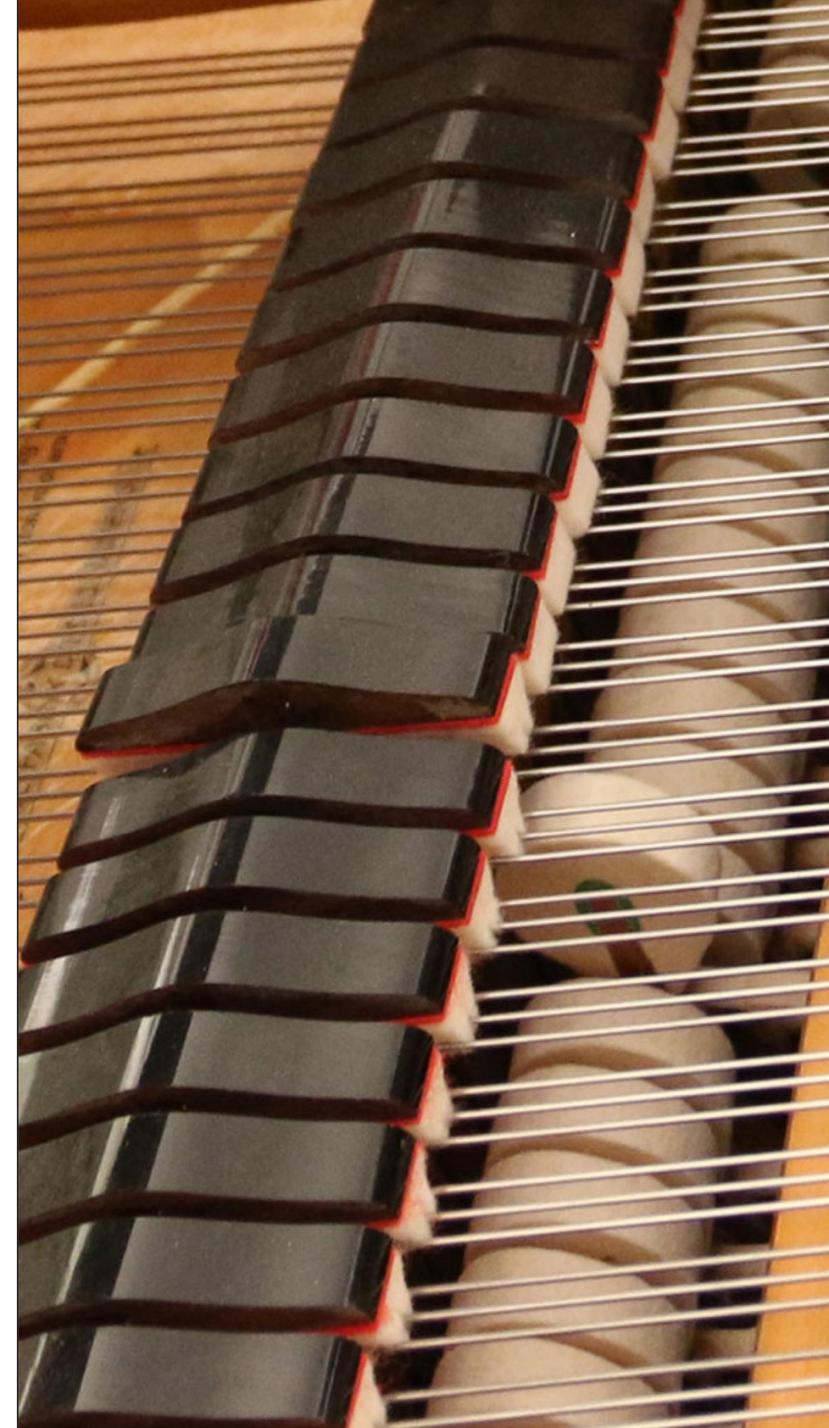
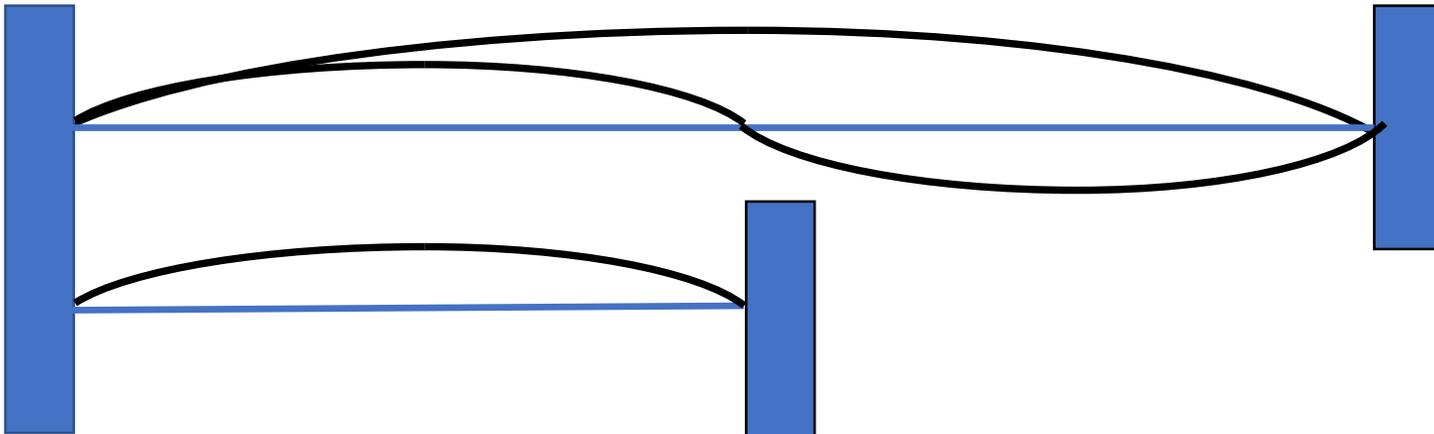
Un 16 pieds ouvert fait 8 pieds

Couplages & résonance

Deux oscillateurs à la même fréquence entrent en résonance :

- deux cordes accordées sur la même note
- deux cordes accordées sur les harmoniques l'une de l'autre

Un rapport de 2 donne un intervalle d'une octave très consonant : on confond les deux notes.

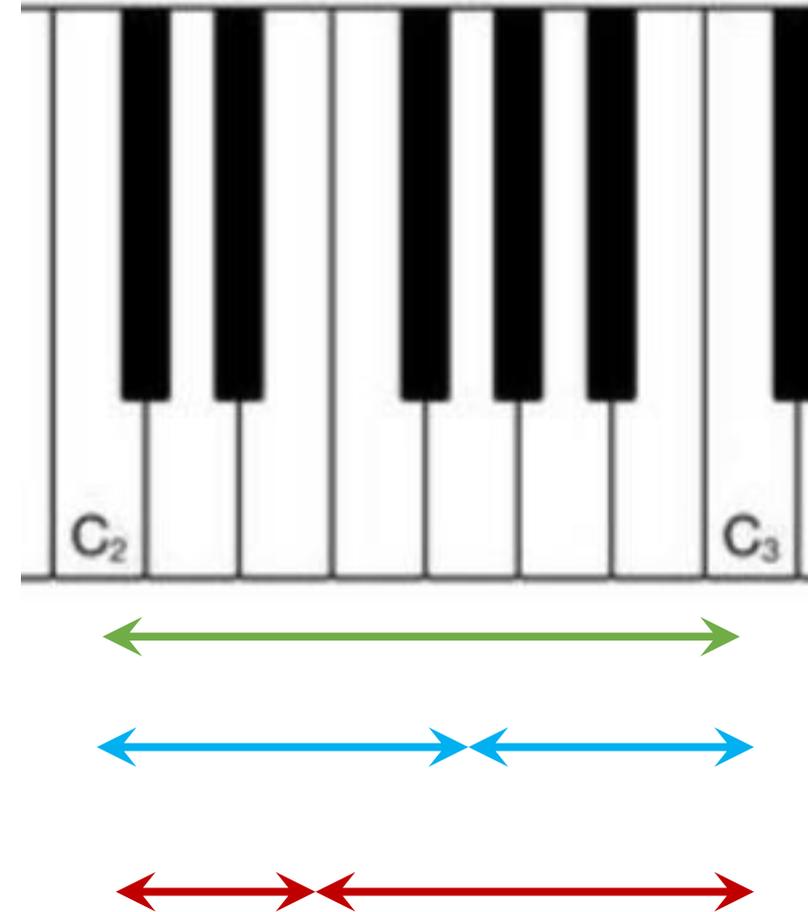


Consonance

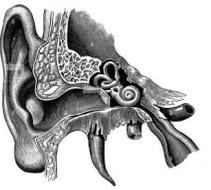
Un écart entre deux notes s'appelle un intervalle.

Deux notes paraissent consonantes dans la musique occidentale quand elles correspondent à des harmoniques:

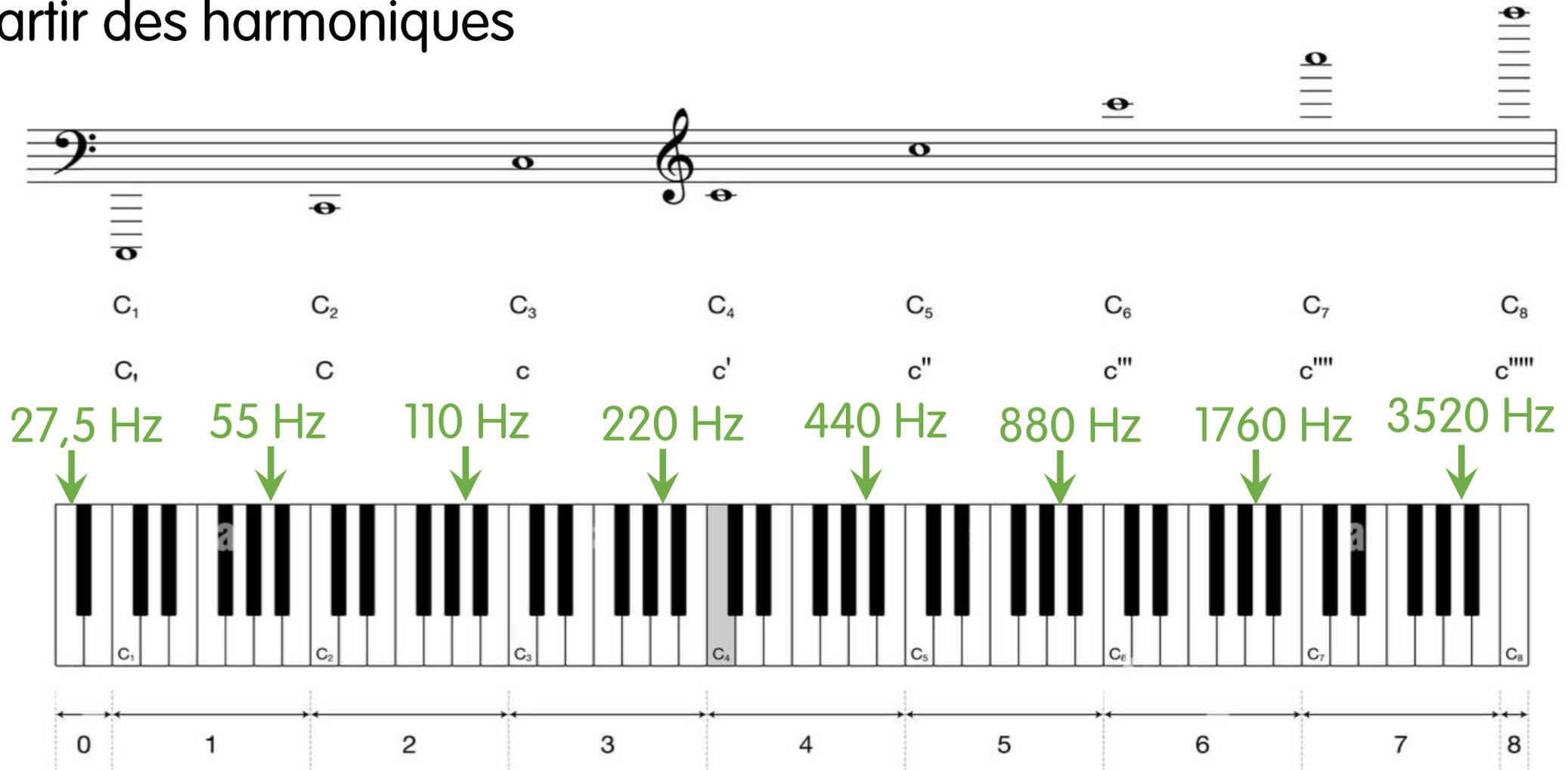
- rapport de 2 entre les fréquences (fondamentale et 1^e harmonique) : octave
- rapport de 3 entre les fréquences (fondamentale et 2^e harmonique) : quinte ($3/2$) et quarte ($4/3$)
- rapport de 5 entre les fréquences (fondamentale et 2^e harmonique) : tierce ($5/4$) et sixte ($8/5$)



Le piano logarithmique

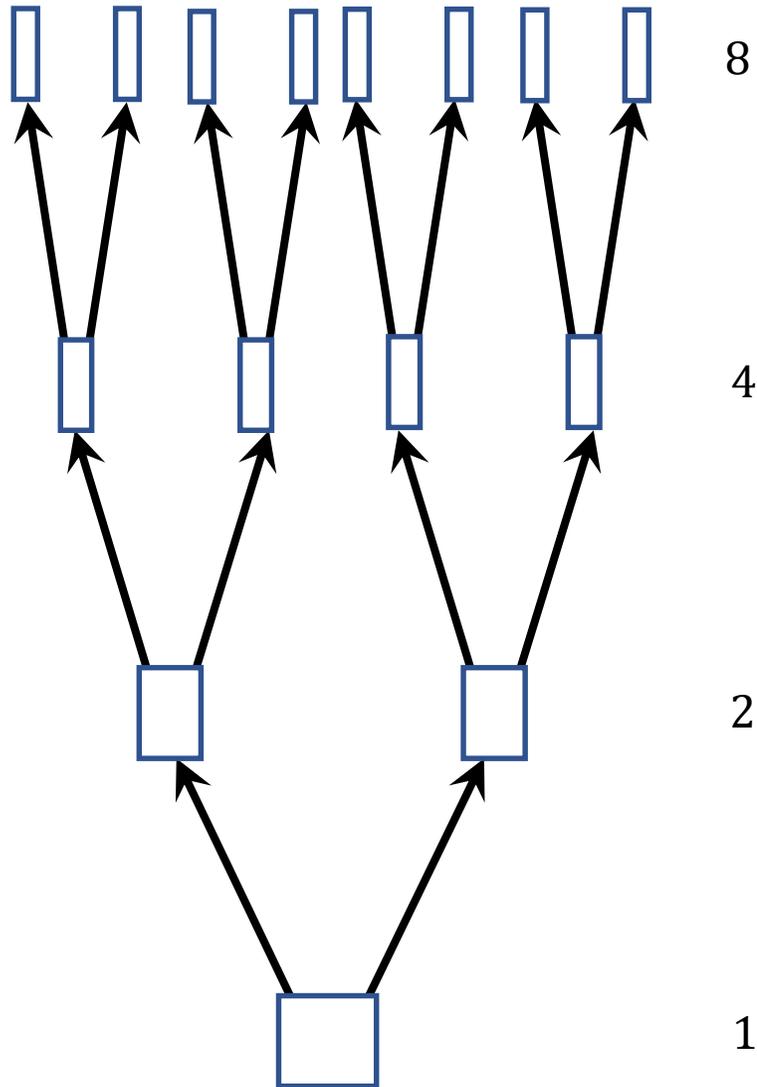


Les « touches blanches » forment l'ensemble qu'on obtient à partir des harmoniques



La fréquence est multipliée par un facteur à chaque saut : exemple facteur 2 pour l'octave.

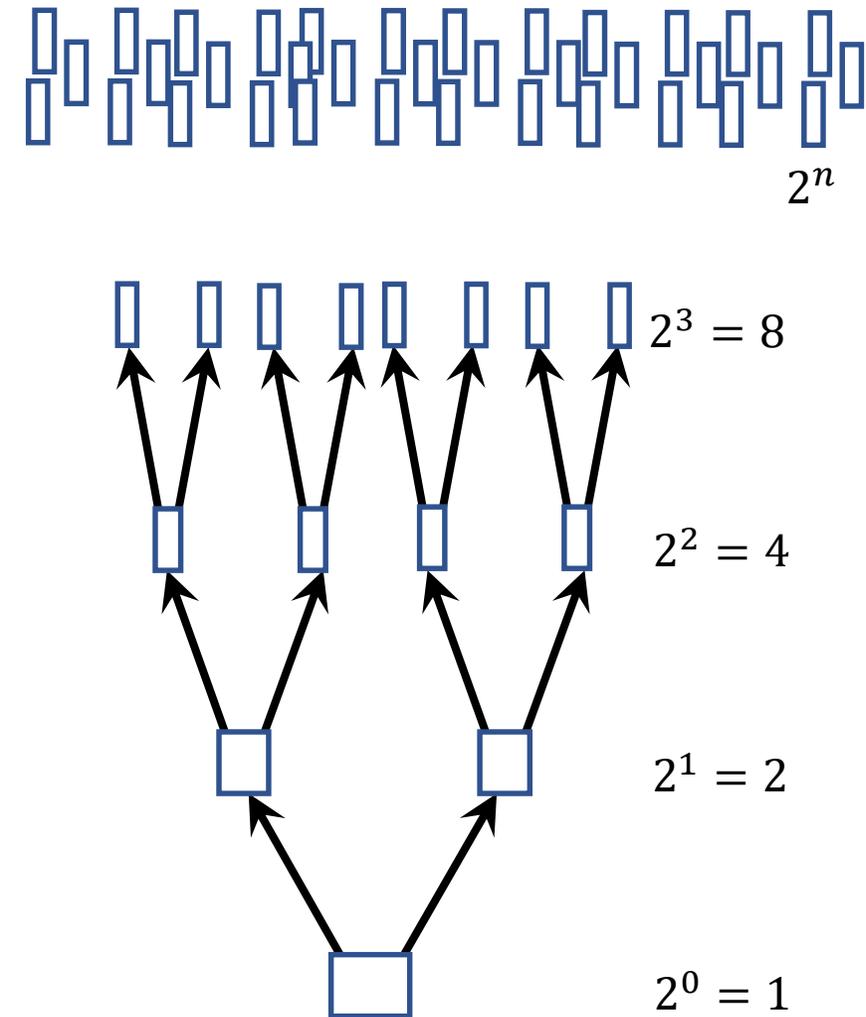
Puissance et progression exponentielle



Quel est notre nombre d'ancêtres en l'an mille ?

- nous avons 2 parents
- 4 grands parents
- 8 arrière-grands-parents
- ... un facteur deux à chaque génération

Puissance et progression exponentielle

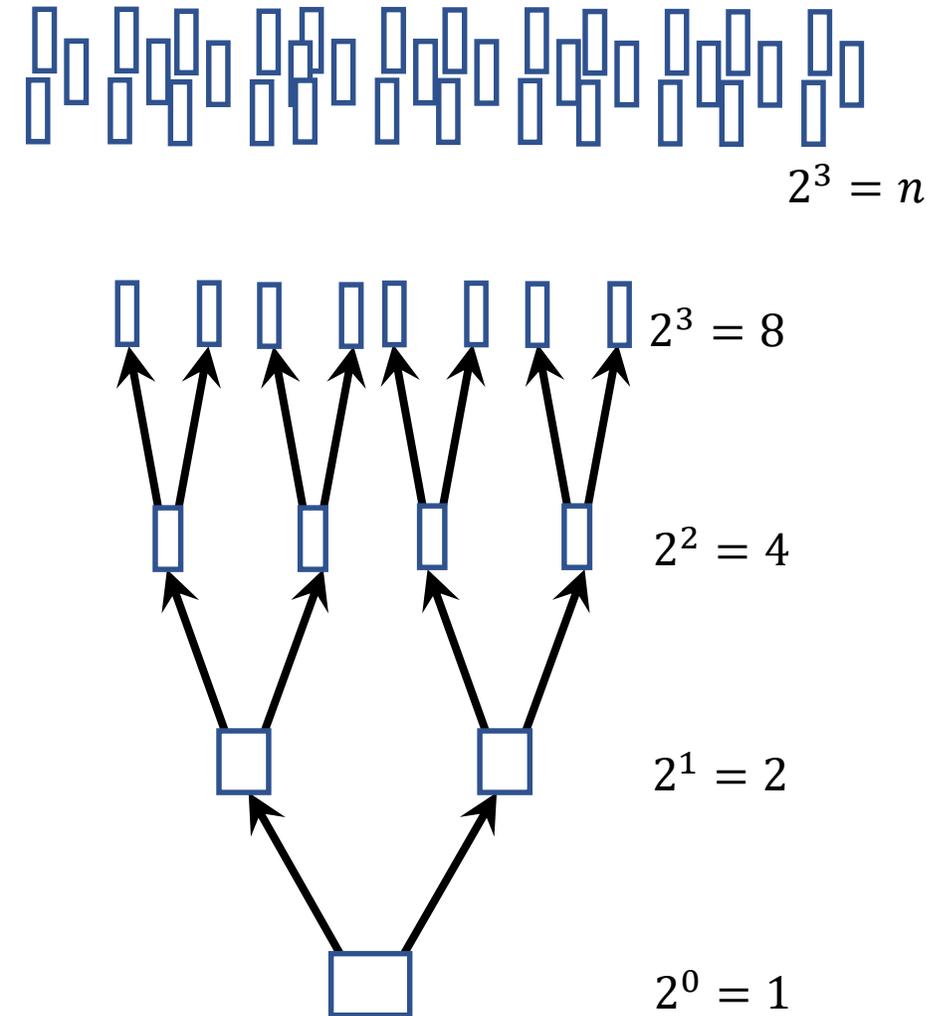


Quel est notre nombre d'ancêtres en l'an mille ?

- nous avons 2 parents
- 4 grands parents
- 8 arrière-grands-parents
- ... un facteur deux à chaque génération
- génération n : $\underbrace{2 \times 2 \times \dots \times 2}_{n \text{ fois}} = 2^n$

exemple : arrière-arrière-grands-parents
 $n = 4$ $2^4 = 16$ arrière-arrière-grands-parents

Puissance et progression exponentielle



Quel est notre nombre d'ancêtres en l'an mille ?

- par siècle : 3 générations (estimation basse)

- pour mille ans : 30 générations

- $\underbrace{2 \times 2 \times \dots \times 2}_{30 \text{ fois}} = 2^{30} = (2^{10})^3 = 1024^3$
 $\approx 1\,000\,000\,000$

Un milliard d'ancêtres en l'an mille
(fourchette basse)

- En l'an 800 : 6 générations de plus,
soit $2^6 = 64$ fois plus

64 000 000 000

soixante quatre milliards d'ancêtres
en l'an mille 800

Puissance et progression exponentielle

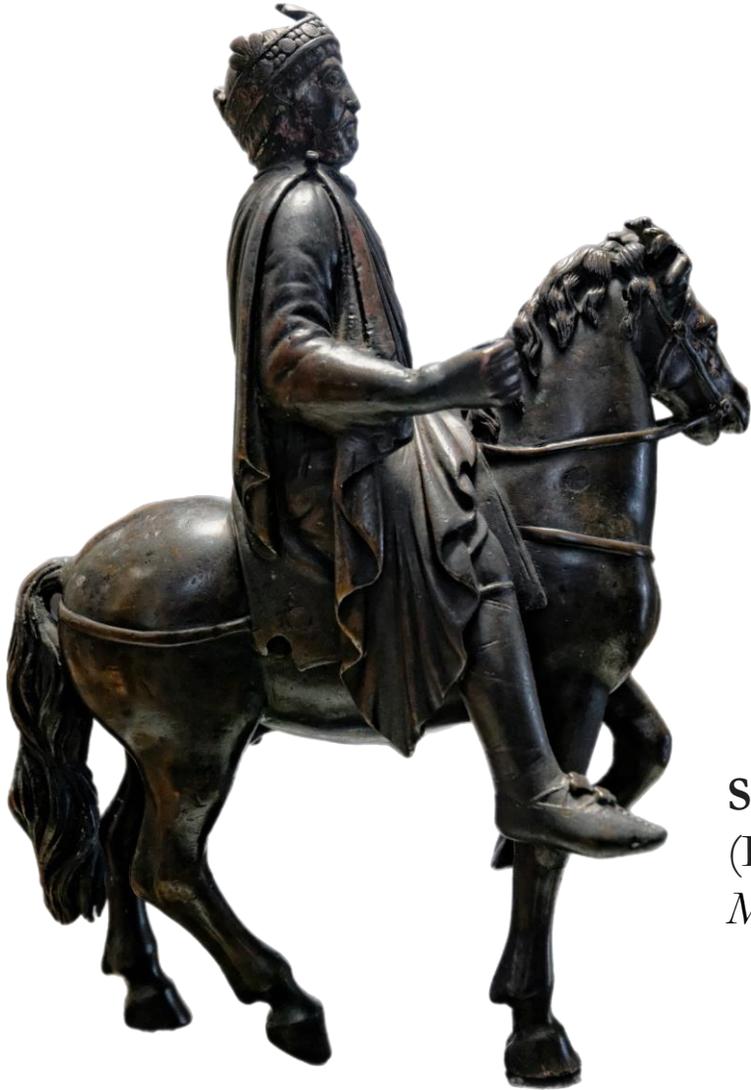
64 000 000 000

soixante quatre milliards d'ancêtres
en l'an mille 800

population mondiale à cette époque :
entre 200 et 250 millions d'habitants

chaque individu est 320 fois notre ancêtre

Puissance et progression exponentielle



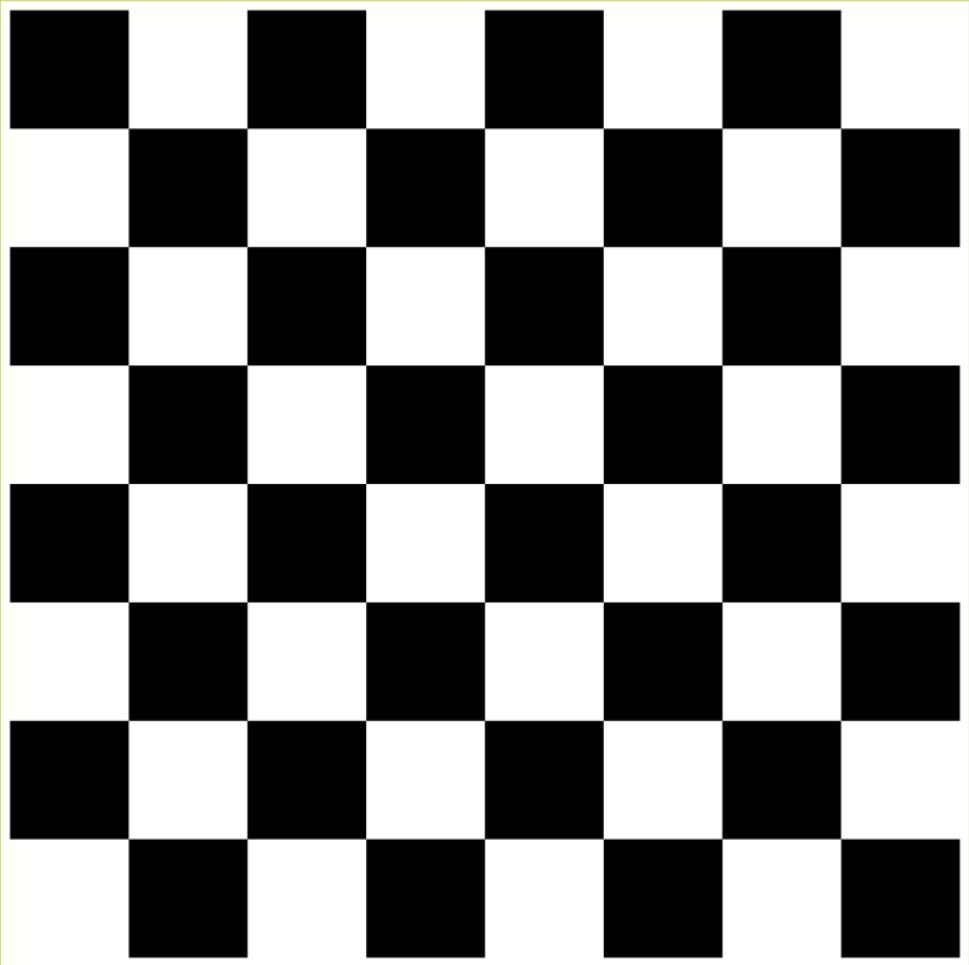
64 000 000 000

soixante quatre milliards d'ancêtres
en l'an mille 800

Nous descendons tous de Charlemagne !

Statuette équestre de Charlemagne
(III^e siècle [?] ; V^e siècle [?] ; IX^e siècle [?])
Musée du Louvre

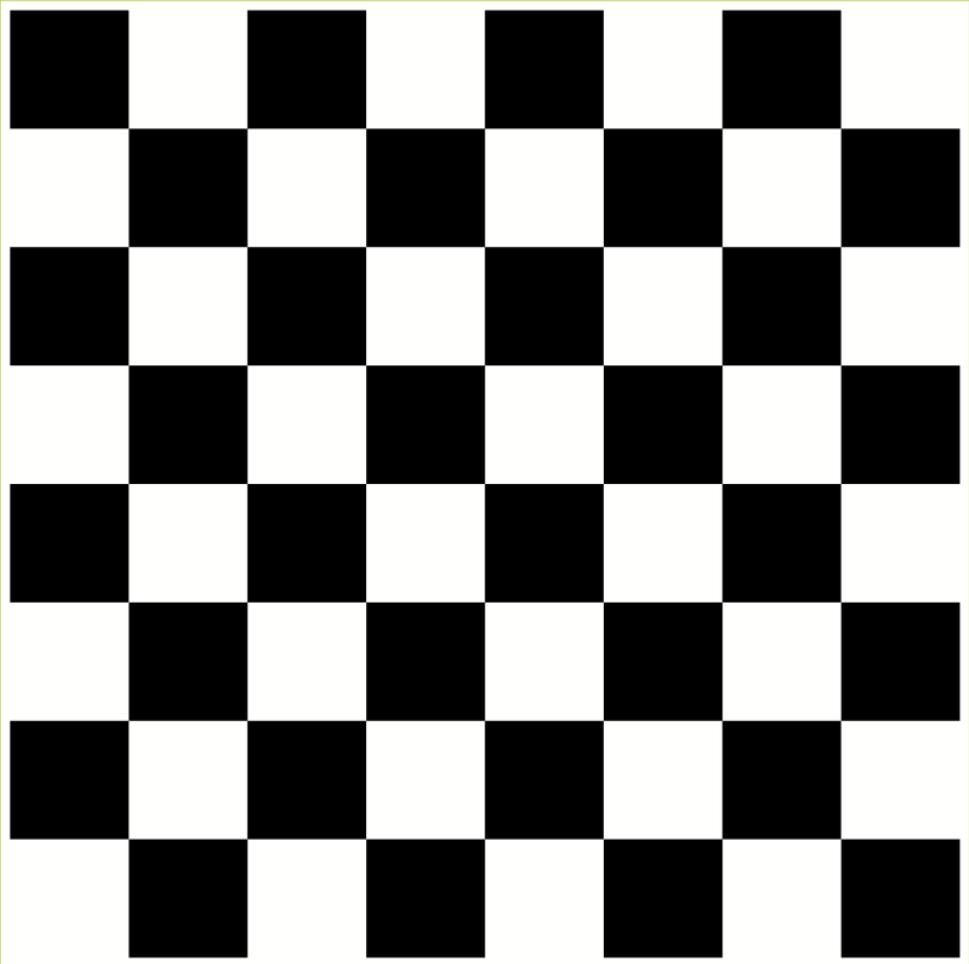
Puissance et progression exponentielle



La récompense du vizir :
sur un échiquier, il demande
1 grain de blé sur la première case
2 grains de blé sur la deuxième case
4 grains de blé sur la troisième case

...

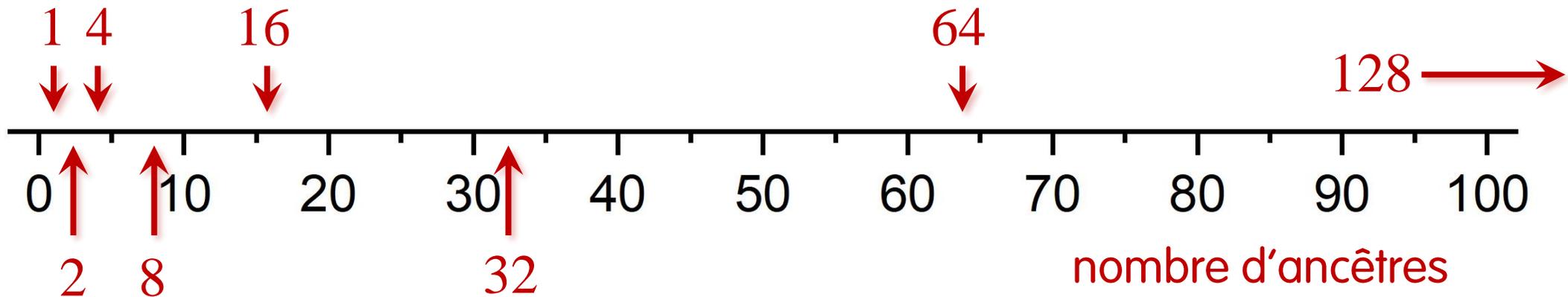
Puissance et progression exponentielle



La récompense du vizir :
sur un échiquier, il demande
1 grain de blé sur la première case
2 grains de blé sur la deuxième case
4 grains de blé sur la troisième case
...
 2^{63} grains de blé sur la dernière case
soit
9 000 000 000 000 000 000 grains
9 milliards de milliards de grains
soit 588 ans de production mondiale

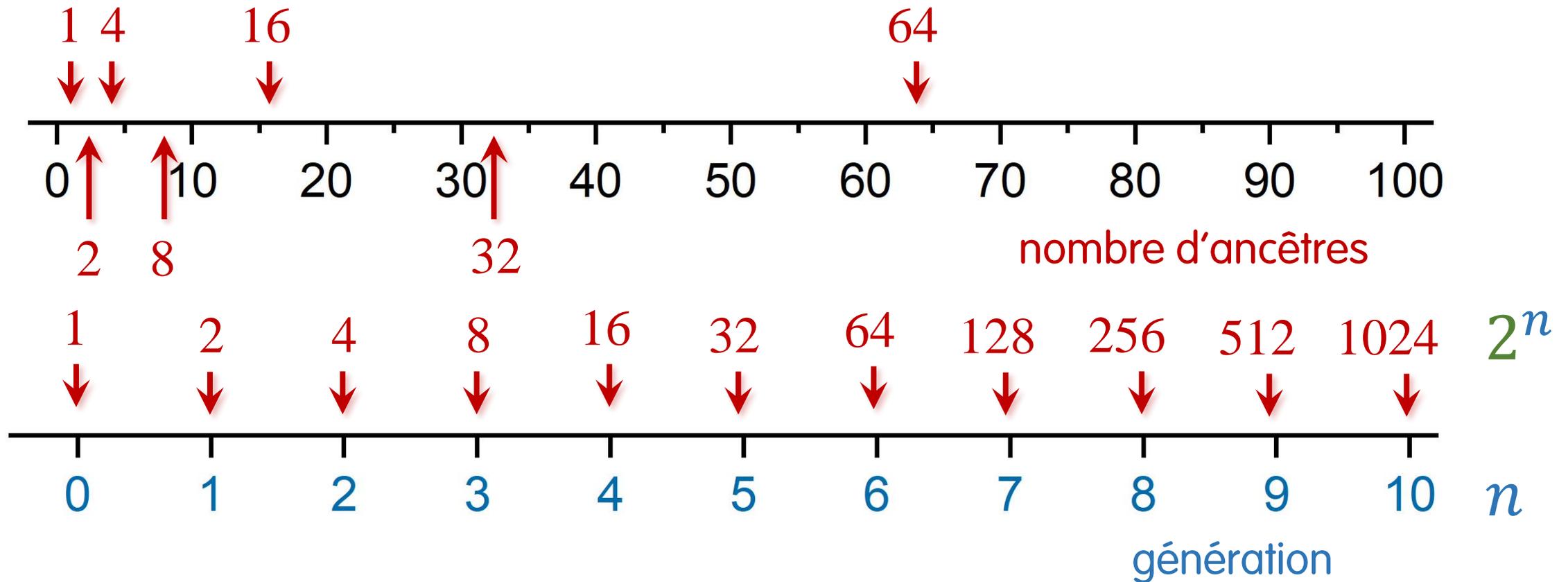
Puissance et progression exponentielle

Comment représenter une progression exponentielle ?



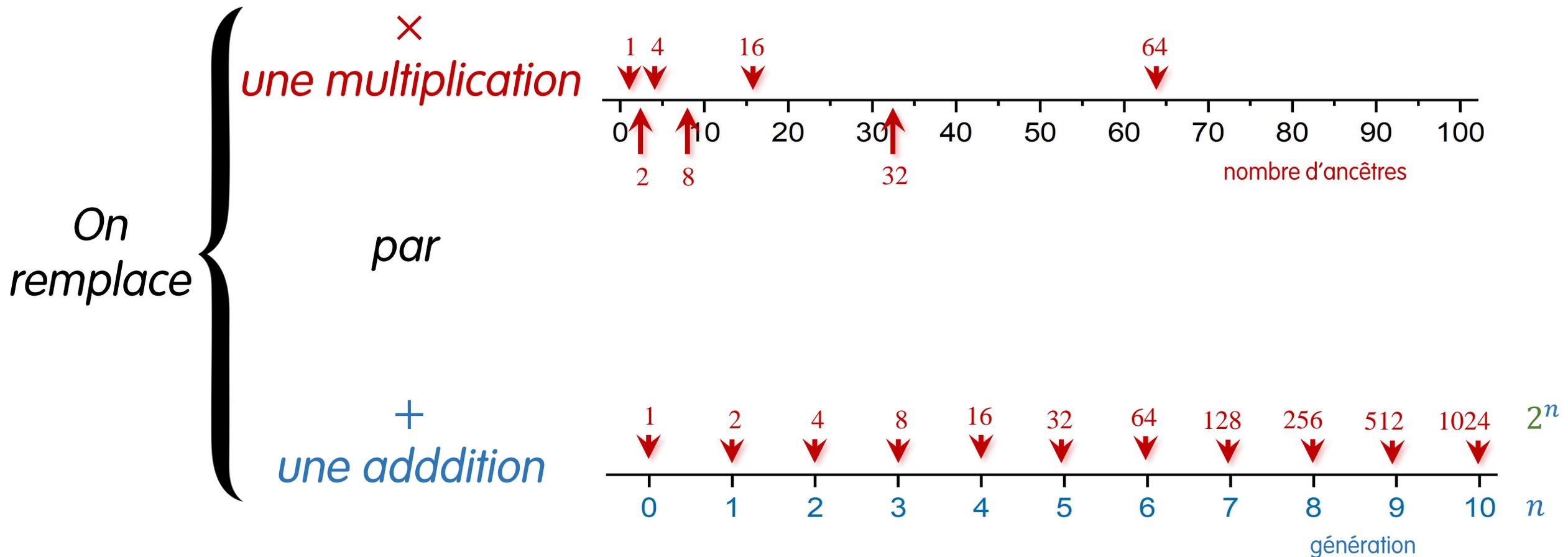
Puissance et progression exponentielle

Comment représenter une progression exponentielle ?

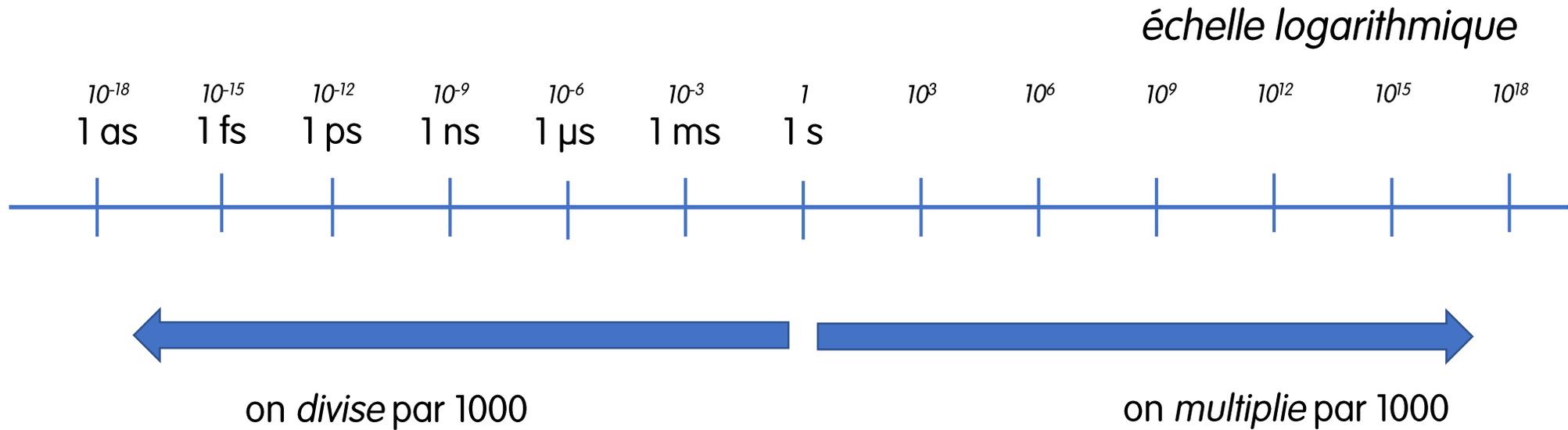


Puissance et progression exponentielle

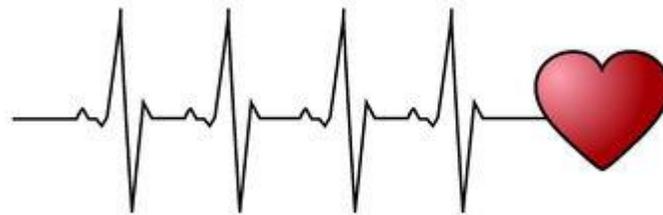
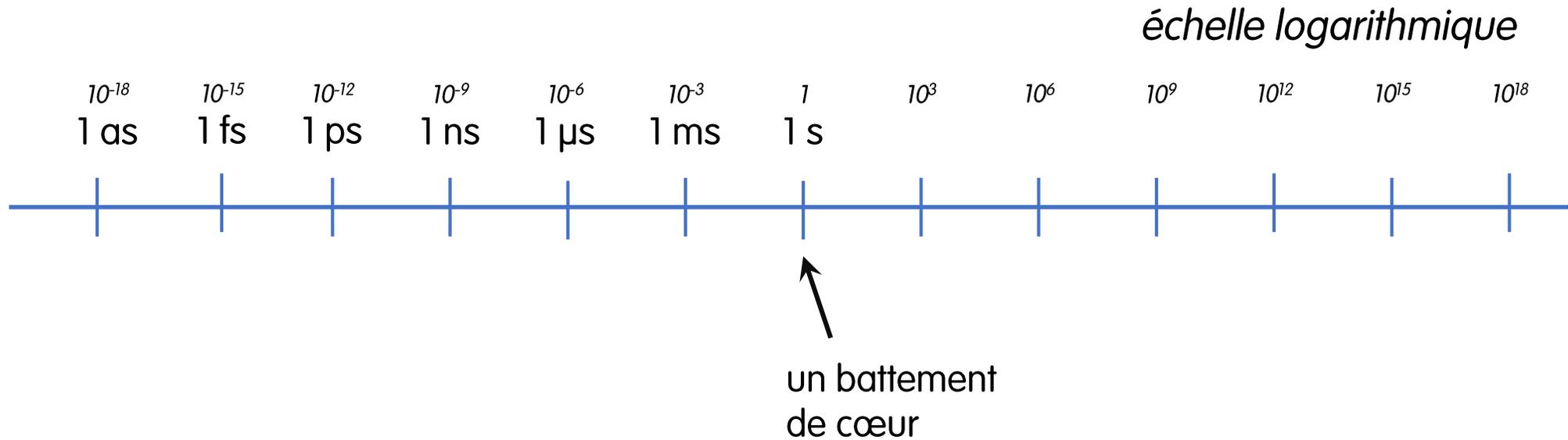
Comment représenter une progression exponentielle ?



Échelles de temps

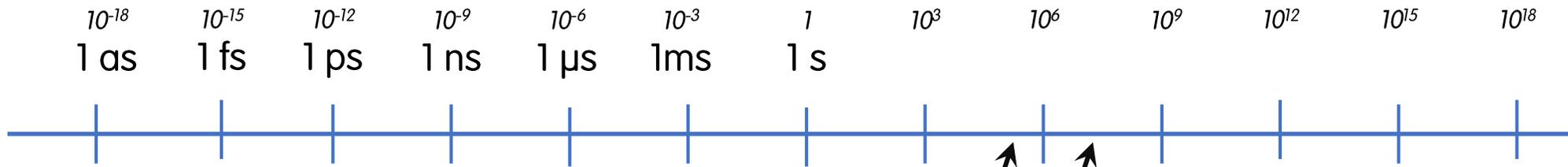


Échelles de temps



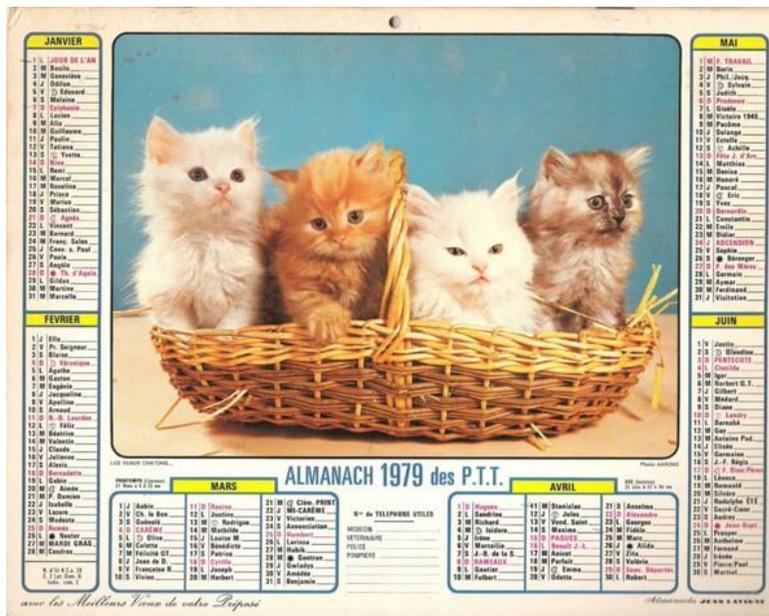
Échelles de temps

échelle logarithmique



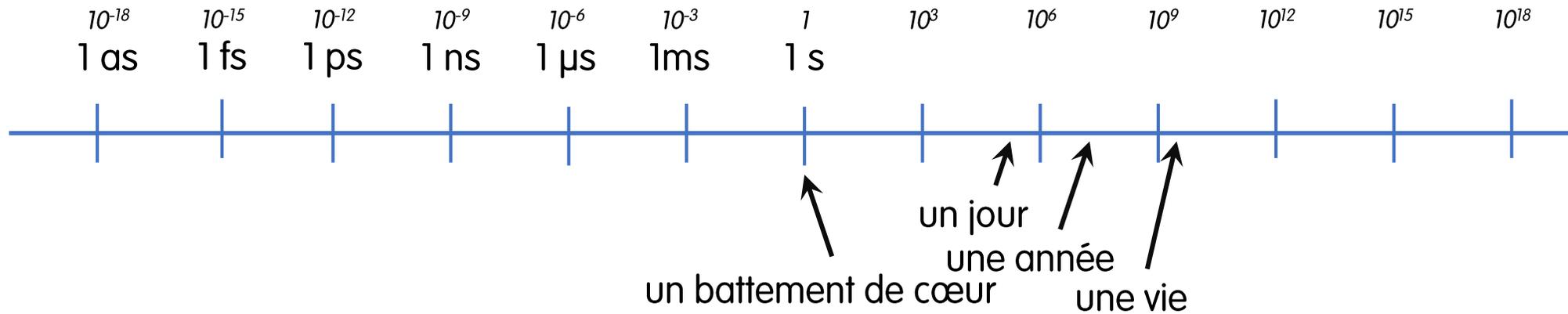
un battement de cœur

un jour
une année

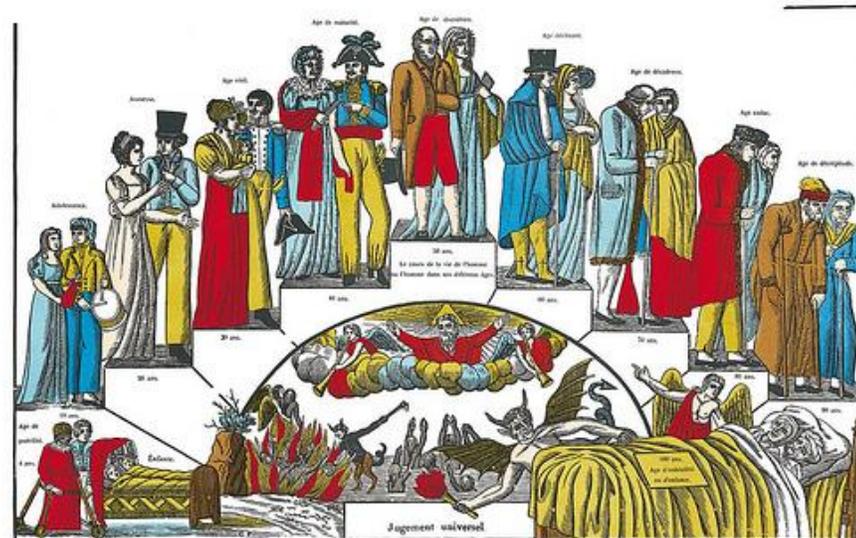


Échelles de temps

échelle logarithmique

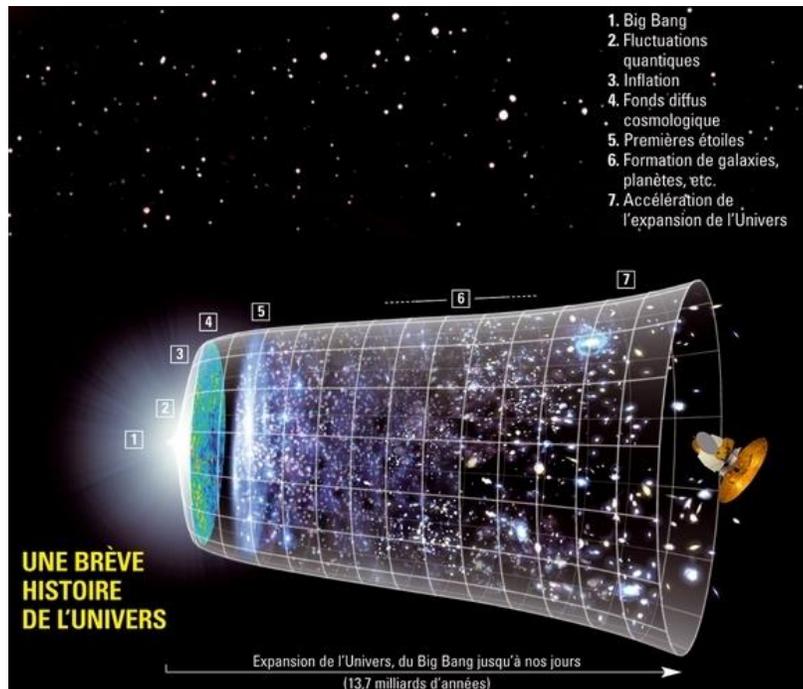
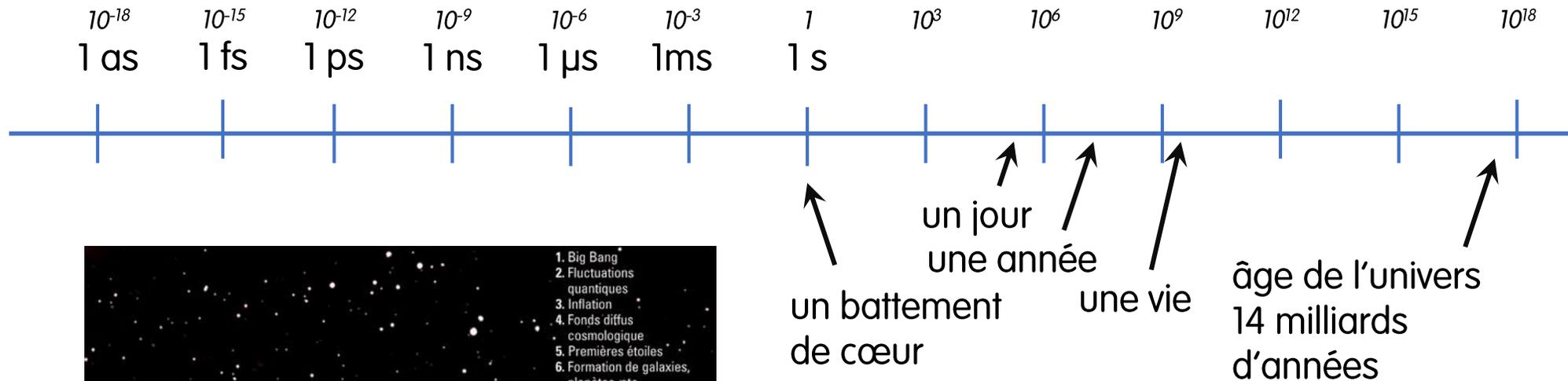


DEGRÉS DES AGES.

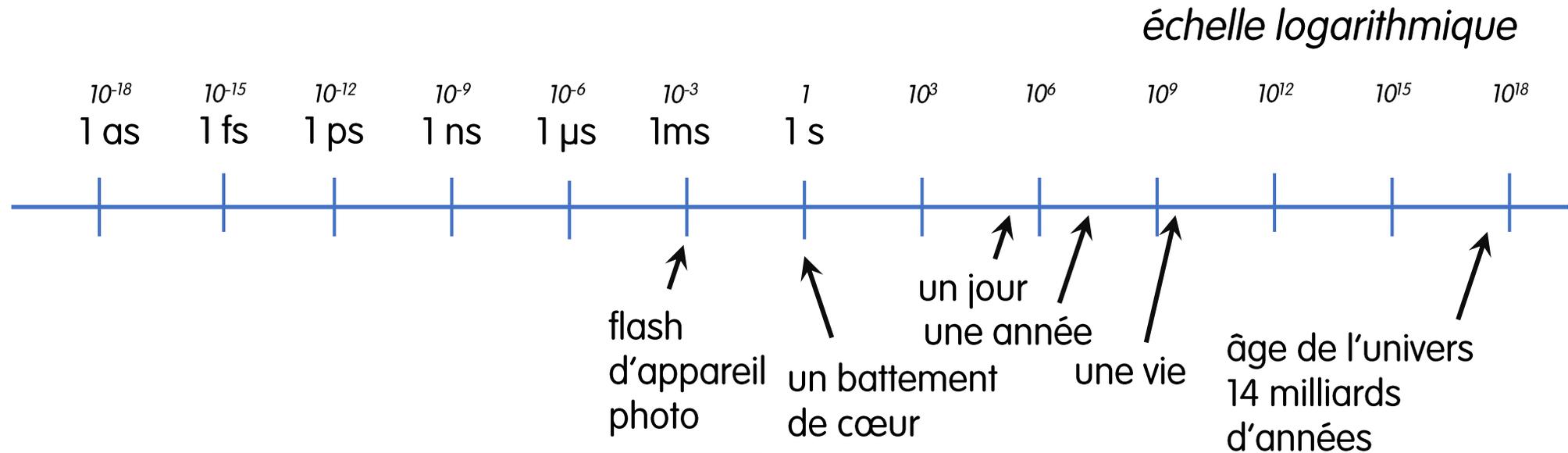


Échelles de temps

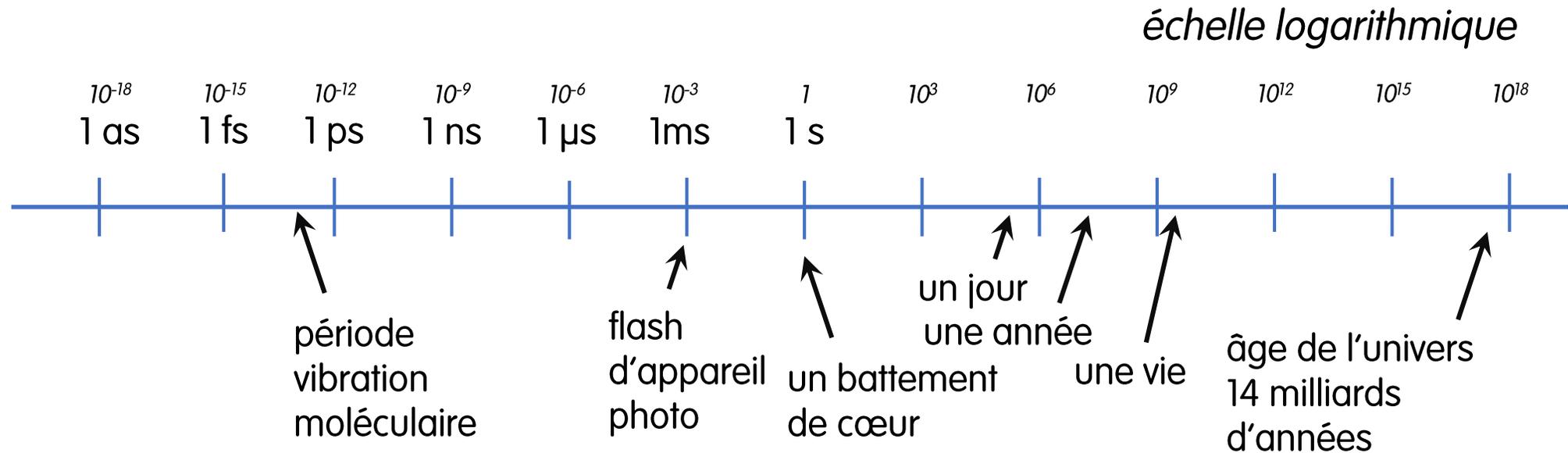
échelle logarithmique



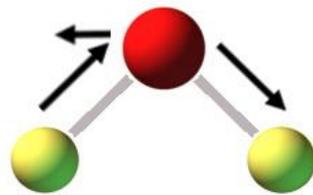
Échelles de temps



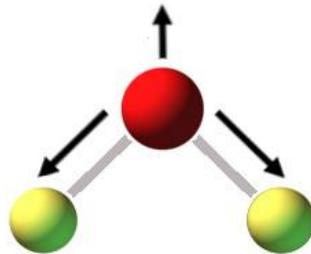
Échelles de temps



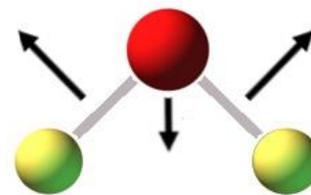
Elongation asymétrique



Elongation symétrique

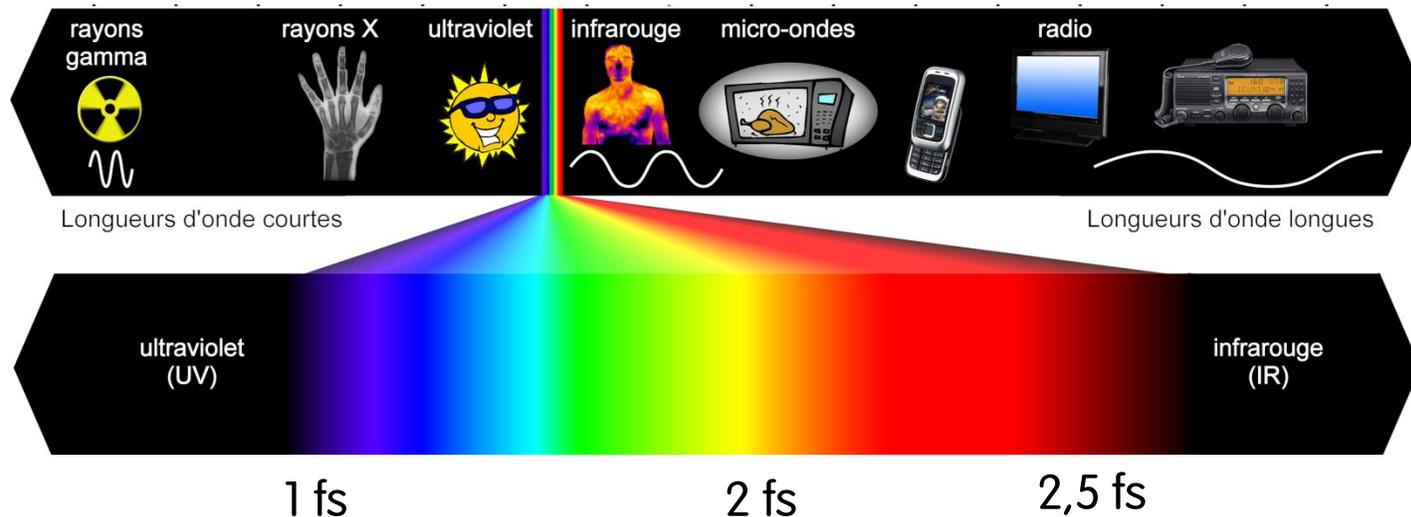
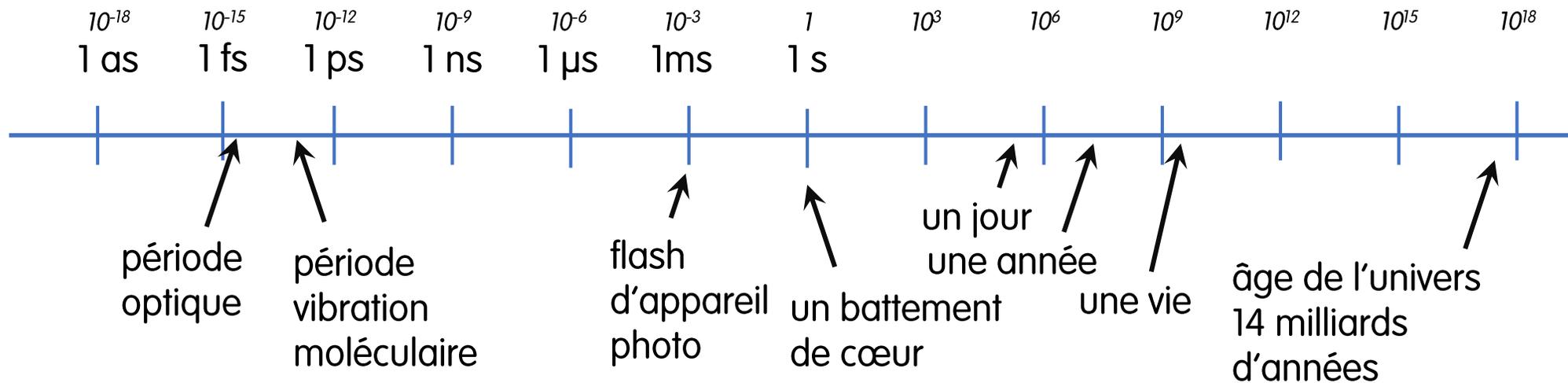


Flexion

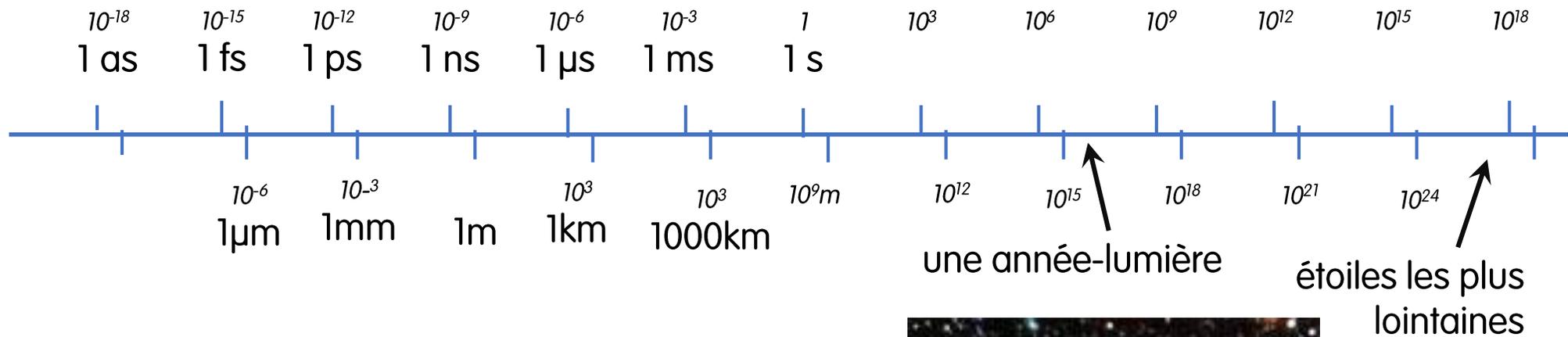


Échelles de temps

échelle logarithmique



Échelles de temps et échelles spatiales



Vitesse de la lumière
 $c=300\,000\text{ km/s}$
(1,08 milliard de km/h)



Logarithme

$$c = a^b = \underbrace{a \times a \times \dots \times a}_{b \text{ fois}}$$

Chaque pas correspond à la multiplication par un facteur a

Logarithme

$$c = a^b = \underbrace{a \times a \times \dots \times a}_{b \text{ fois}}$$

Chaque pas correspond à la multiplication par un facteur a

Nombre de pas :

$$b = \log_a(c)$$

$$10 = \log_2(1024)$$

Logarithme

$$c = a^b = \underbrace{a \times a \times \dots \times a}_{b \text{ fois}}$$

Chaque pas correspond à la multiplication par un facteur a

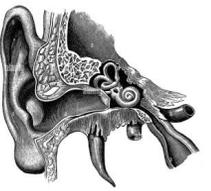
Nombre de pas :

$$b = \log_a(c)$$

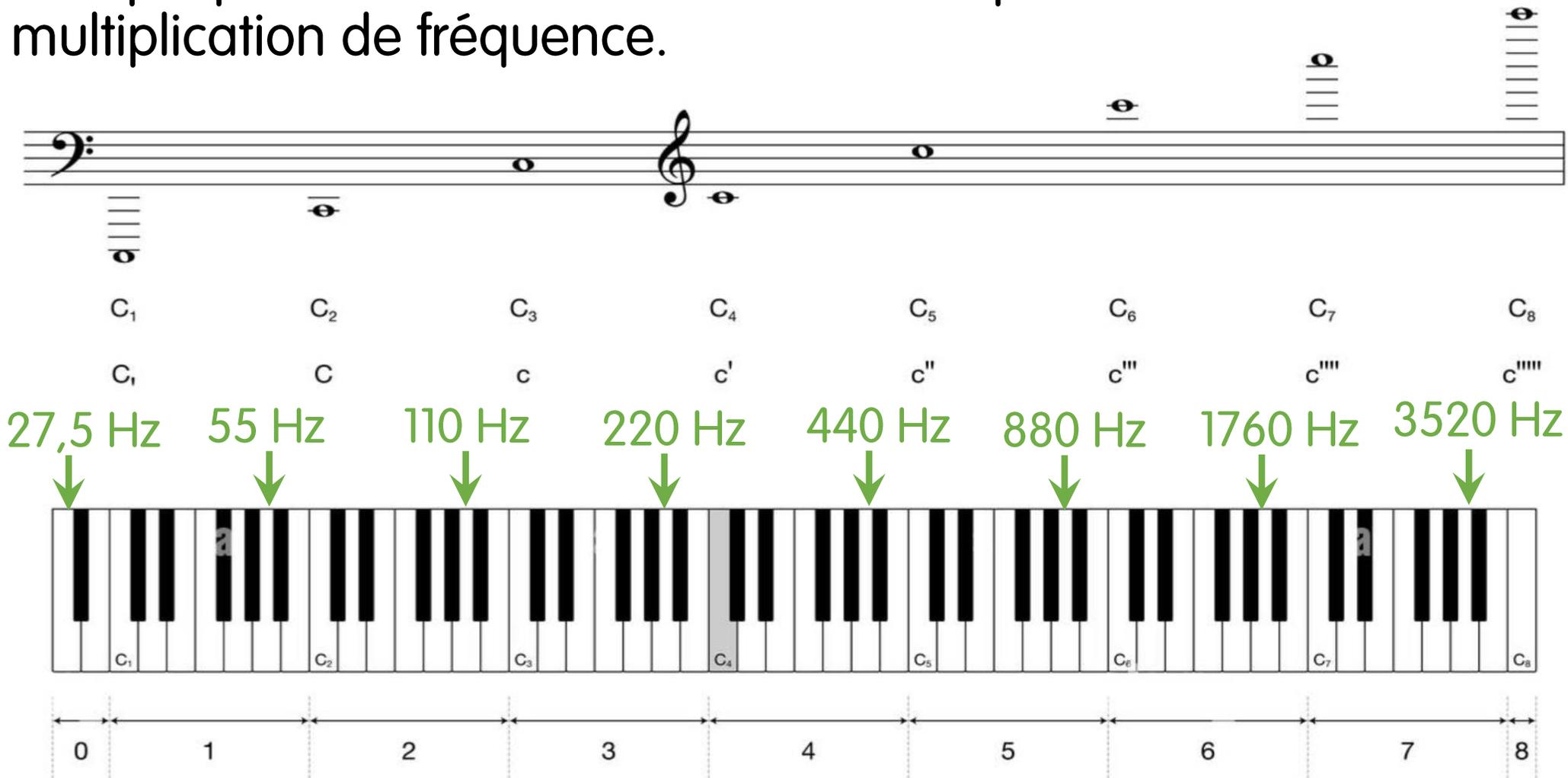
Taille du pas :

$$a = c^{1/b} = \sqrt[b]{c}$$

Le piano logarithmique



Chaque pas d'une touche à l'autre correspond à une multiplication de fréquence.



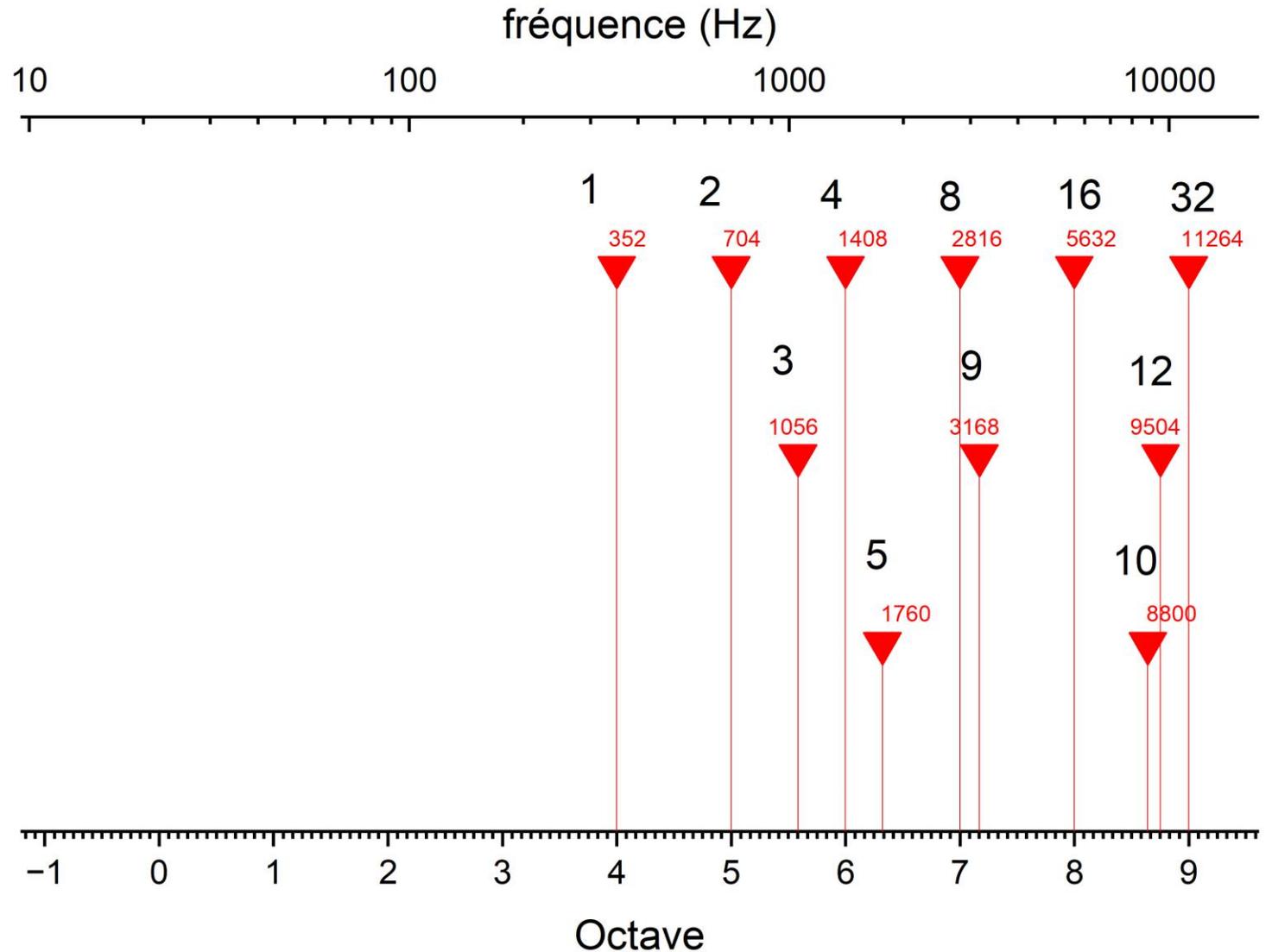
12 demi-tons font un facteur 2

un demi ton est un facteur

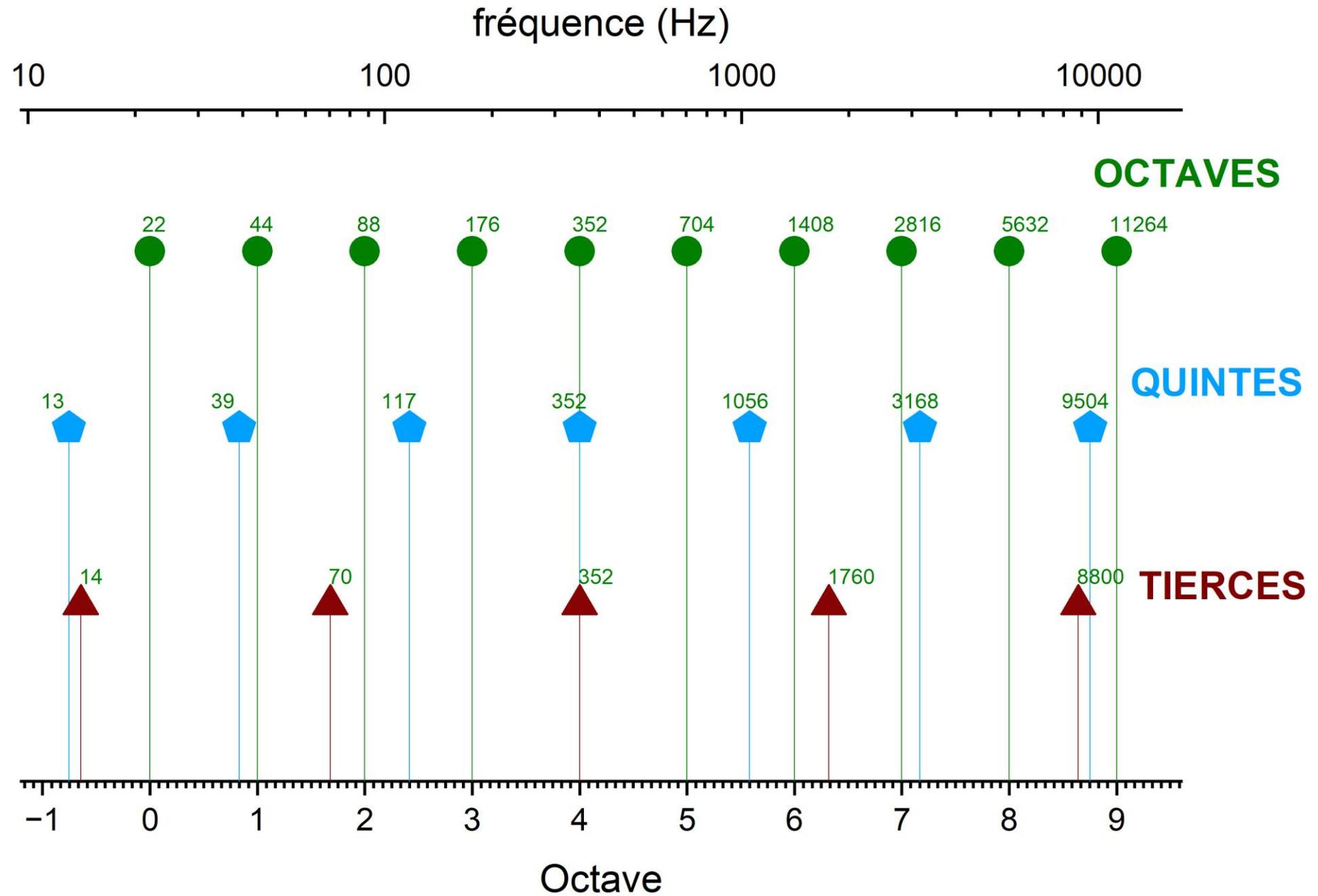
$$\sqrt[12]{2} = 1,059$$

Les harmoniques sur une échelle logarithmique

Les fréquences sont réparties régulièrement



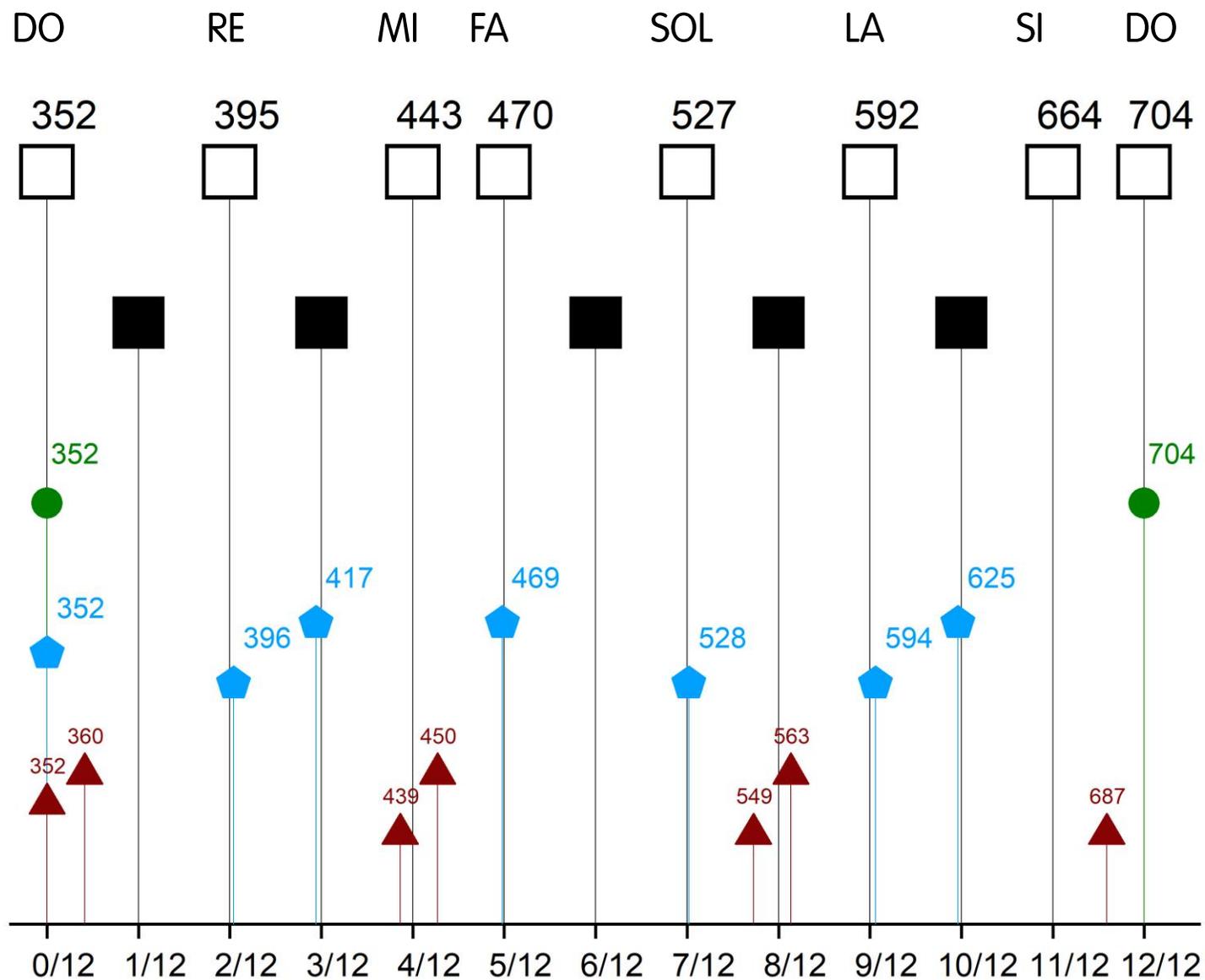
Cycles



Repliement de spectre

On ramène tout dans une même octave, à coup de facteur 2 !

On construit la gamme.



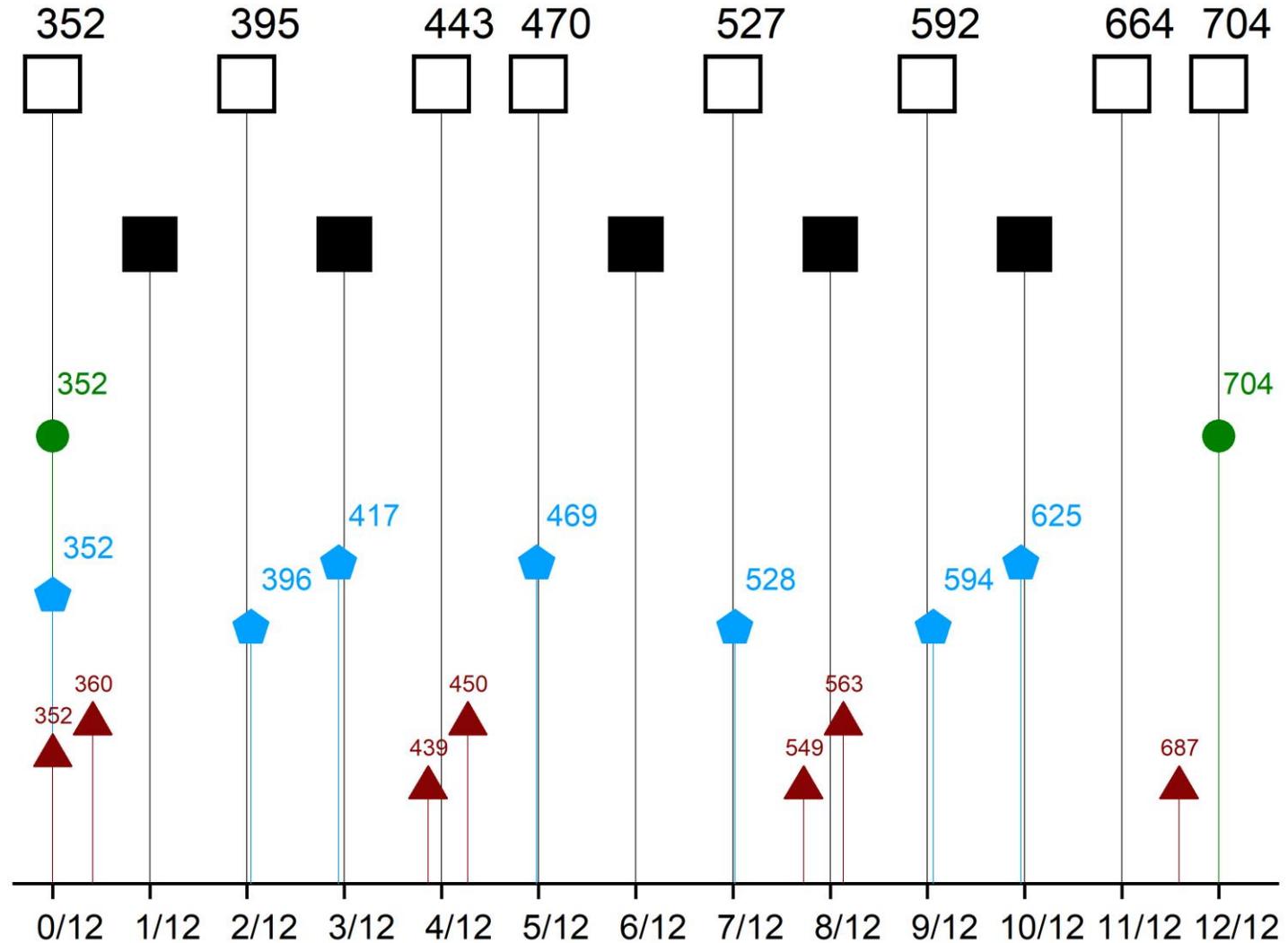
La gamme est dans le comma

Les notes des différents cycles ne tombent pas sur les mêmes positions !

- comma pythagorien :
quinte - octave
- comma syntonique :
quinte - tierce
- comma enharmonique :
tierce - octave

$$2^7 = 128 \approx \left(\frac{3}{2}\right)^{12} \approx 129,7$$

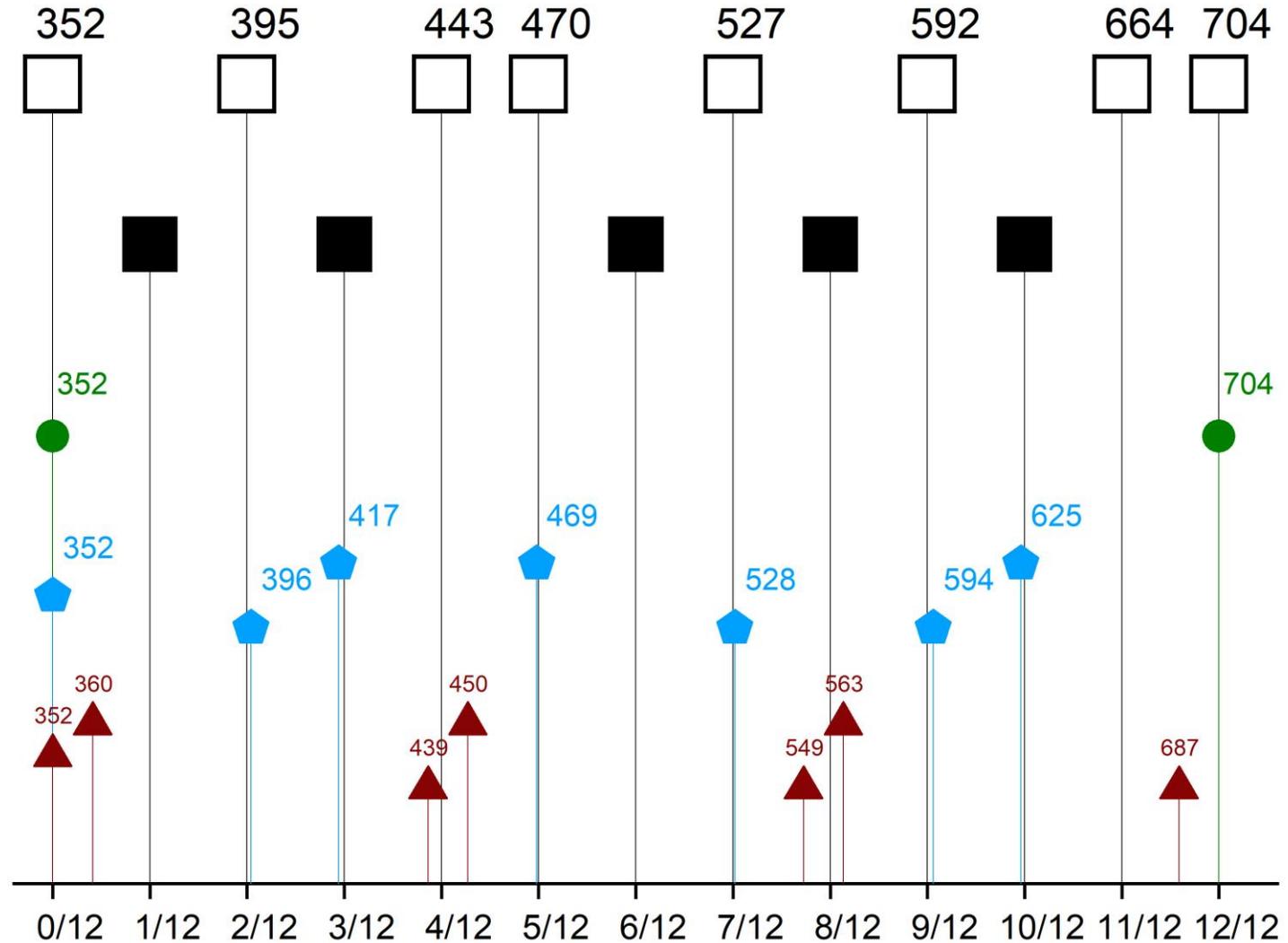
$$7 \approx 7,02$$



Le tempérament

Les intervalles vont sonner différemment si on choisit de faire des quintes justes ou des tierces justes.

Chaque tonalité va sonner différemment !!!!

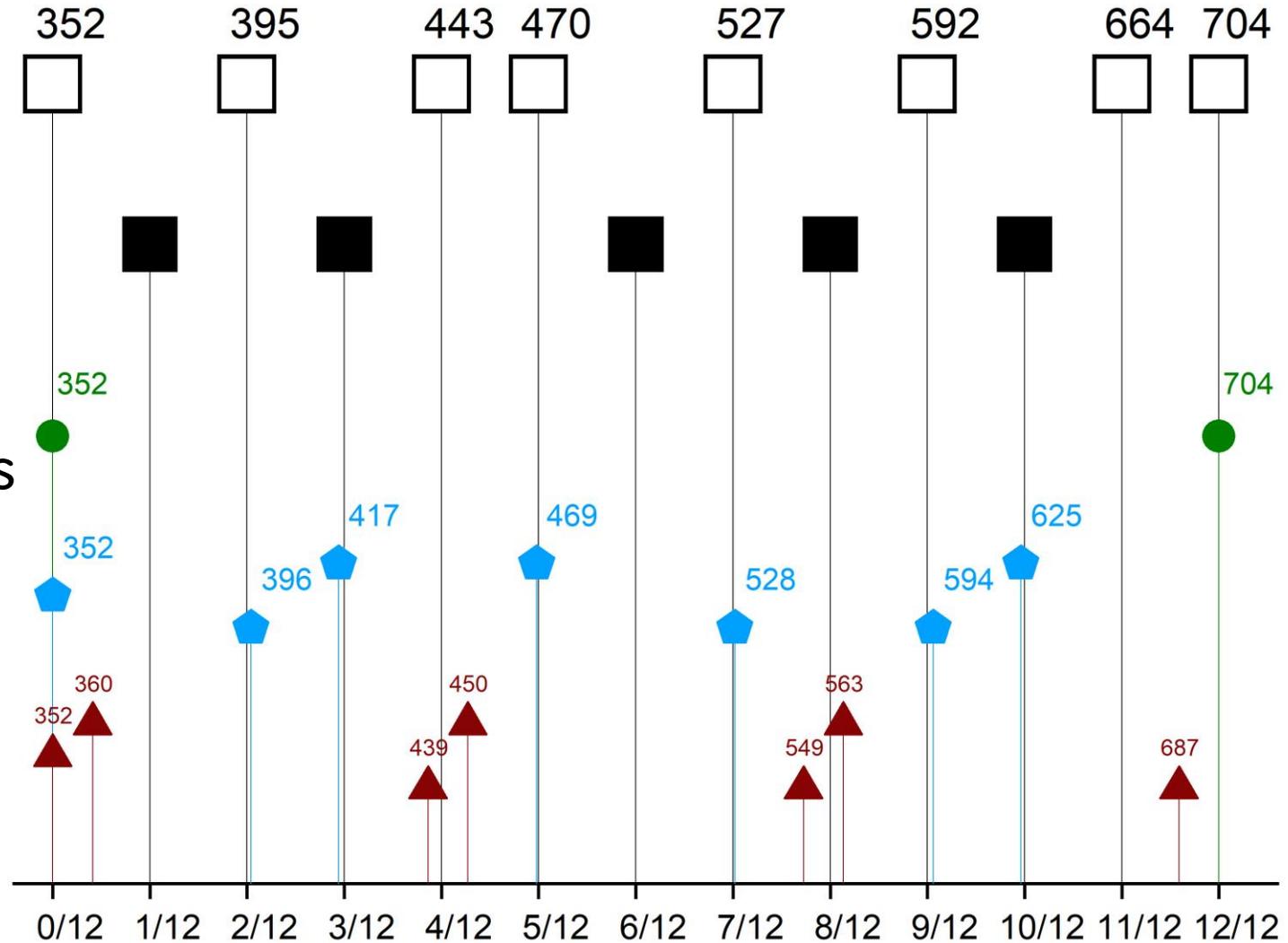


La transposition

Peu importe le point de départ : ce qui est important, c'est le rapport des fréquences et donc l'intervalle entre les notes.

Mais les rapports des notes sont fixés par le facteur qui a fabriqué l'instrument.

La transposition n'est possible dans l'absolu qu'avec un tempérament égal.



Le Clavier bien tempéré

Johann Sebastian Bach
Das Wohltemperierte Clavier
Livre I (1722)
Staatsbibliothek zu Berlin

TABLE THÉMATIQUE

24 VOLUME.

1 ^{er} Prélude. page 2.	Fugue à 3 parties.	13 ^e Prélude. page 63.	Fugue à 3 parties.
2 ^e Prélude. p. 6.	Fugue à 4 part.	14 ^e Prélude. p. 69.	Fugue à 3 part.
3 ^e Prélude. p. 10.	Fugue à 3 part.	15 ^e Prélude. p. 76.	Fugue à 3 part.
4 ^e Prélude. p. 14.	Fugue à 3 part.	16 ^e Prélude. p. 80.	Fugue à 4 part.
5 ^e Prélude. p. 20.	Fugue à 4 part.	17 ^e Prélude. p. 86.	Fugue à 4 part.
6 ^e Prélude. p. 26.	Fugue à 3 part.	18 ^e Prélude. p. 93.	Fugue à 3 part.
7 ^e Prélude. p. 30.	Fugue à 4 part.	19 ^e Prélude. p. 100.	Fugue à 3 part.
8 ^e Prélude. p. 34.	Fugue à 4 part.	20 ^e Prélude. p. 104.	Fugue à 3 part.
9 ^e Prélude. p. 40.	Fugue à 4 part.	21 ^e Prélude. p. 109.	Fugue à 3 part.
10 ^e Prélude. p. 41.	Fugue à 3 part.	22 ^e Prélude. p. 114.	Fugue à 4 part.
11 ^e Prélude. p. 51.	Fugue à 3 part.	23 ^e Prélude. p. 123.	Fugue à 4 part.
12 ^e Prélude. p. 58.	Fugue à 3 part.	24 ^e Prélude. p. 128.	Fugue à 3 part.

21324. P. 1072. H.

« Clavier bien tempéré, ou
préludes et fugues dans tous les
tons et demi-tons, tous deux avec
la tierce majeure ou *ut, ré, mi* et
avec la tierce mineure ou *ré, mi, fa*.
Pour la pratique et le profit des
jeunes musiciens désireux de
s'instruire et pour la jouissance de
ceux qui sont déjà rompus à cet
art. »

J. S. Bach

Das Wohltemperirte Clavier.

Præludia, 2^{tes}

Fugen in allen Tönen mit Semitoria,
Es sey tertian majorer oder ut re mi oder
junior, als auch tertian minorer oder re
mi fa betroffent. Zum
Nutzen und Gebrauch aller Liebhaber
Musicalischer Wissen, als auch in Schulen
die sich habet zuwenden
Zur Erleichterung
mit Vorrede von
Johann Sebastian Bach.
p. b. Christoph Bach
Rechnungsbuch
Wittenberg
rectore anno
Lauterbach
1722.

Ex Bibl. Regia
Berolin.

dans le prochain épisode ...

Espace

La stéréo



dans le prochain épisode ...

Espace

La perspective

La Cité idéale
(1498)

*Galleria Nazionale delle Marche –
monastère Sainte-Claire d'Urbino*



dans le prochain épisode ...

Espace

Le flou

Johannes Vermeer
La Dentellière (détail)
(1669-1671)
Musée du Louvre - Paris



dans le prochain épisode ...

Espace

Comment nos sens nous permettent
d'appréhender l'espace ?