SON ET MUSIQUE, PORTEURS D'INFORMATION

log$_{\bar{a}}$RYTHMES

RÉSUMÉ :
L'être humain perçoit le monde à l'aide de signaux dont certains sont de nature sonore. De l'Antiquité jusqu'à nos jours, il a combiné les sons de manière harmonieuse pour en faire un art, la musique, qui entretient des liens privilégiés avec les mathématiques. L'informatique permet aujourd'hui de numériser les sons et la musique.
La compréhension des mécanismes auditifs s'inscrit dans une perspective d'éducation à la santé.

CYCLE : terminal : 1ère, terminale

Table des matières

I. Présentation de la ressource

RÉSUMÉ :

La ressource couvre le programme du thème "Son et musique, porteurs d'information" de l'Enseignement scientifique de la classe de 1ère du lycée général. Elle comporte des séquences de cours proposées par le groupe pluridisciplinaire d'enseignants et enseignants-chercheurs de l'**IREM de Limoges** et des vidéos, réalisées par la **Fédération HIERO** et par **Grand Ciel**, qui donnent le point de vue d'un musicien sur les notions du programme.
L'ensemble des contenus multimédia proposés dans ce cours et rassemblés ci-dessous dans la partie "Ressources" sont réutilisables à des fins pédagogiques. Ils peuvent être téléchargés et réutilisés pour créer son propre cours ou pour un exposé pour les élèves.
VIDÉOS INCLUSES : "01 - PRÉSENTATION", "02 - DESCRIPTION MUSIQUE ET MATÉRIEL"

1. Les intervenant.e.s

RÉSUMÉ :

Présentation des auteur.e.s
VIDÉOS INCLUSES : "01 - PRÉSENTATION" (à diffuser au moins une fois avant toute autre vidéo)

a. Groupe pluridisciplinaire de l'IREM de Limoges

Un groupe pluridisciplinaire s'est formé à l'IREM de Limoges à la rentrée 2016. Il comportait 4 membres et travaillait sur la sensibilisation des élèves à l'utilisation des images en science (voir la page du groupe pour des détails).
À la rentrée 2018, avec la parution des nouveaux programmes du lycée, le groupe a décidé de travailler sur le nouvel *Enseignement scientifique*, dans le tronc commun de la classe de 1ère du lycée général, en particulier sur le thème "Son et musique, porteurs d'information". Il a été renforcé par de nouveaux membres (voir la nouvelle page du groupe) et a commencé une collaboration avec la **Fédération HIERO de Limoges**, association de développement des musiques actuelles impliquée dans de nombreux projets de sensibilisation des scolaires et du public, notamment vis-à-vis des risques auditifs, pour élaborer ensemble des vidéos donnant le point de vue du musicien (et cinéaste) **Grand Ciel** sur les notions du programme.

groupe de travail [carte]

b. La Fédération HIERO et l'artiste Grand Ciel

La Fédération HIERO Limoges est née en 1997 du regroupement d'acteurs des musiques actuelles qu'il s'agisse d'associations, de musiciens ou de passionnés de musique. Elle œuvre à proposer une offre de concerts de qualité sur le territoire et à valoriser la

création régionale. Elle a également développé pour le milieu scolaire de la primaire à la Terminale des actions pédagogiques dont fait partie ce projet Loga-Rythmes. Ces projets sont regroupés dans un dispositif global *Du Son Pour l'Audition*. Le site www.lamanet.fr/audition détaille les activités de la Fédération HIERO concernant les thématiques Musique, Sciences et Santé.
L'association HIERO est porteuse du projet Loga-Rythmes soutenu par la Région Nouvelle-Aquitaine.
Grand Ciel est un artiste de musiques électroniques résidant à proximité de Limoges.

Hiero [carte]

Grand Ciel [carte]

c. Présentation [video#01]

RÉSUMÉ :
Les vidéos, images, sons et documents ont été placés dans les séances de cours aux endroits que l'équipe a jugé opportuns. Pour un accès plus rapide à l'ensemble de ces contenus, une page "Ressources" a été créée sous les autres séquences.
A diffuser au moins une fois avant toute autre vidéo, la vidéo "01 - Présentation" peut être utilisée juste avant n'importe quelle séquence pour replacer les personnages dans leur contexte.

Présentation [video#01]

Si vous souhaitez n'utiliser que quelques vidéos sans suivre le déroulé des séances nous avons créé une vidéo très courte (20 secondes) qui permet de replacer les personnages dans leur contexte.

[cf. Présentation [vidéo]]

Transcription

"Salut je m'appelle Grand Ciel, je suis musicien, je fais de l'électro
Moi c'est Jérémy, je travaille à la fédération Hiero Limoges, ça fait 20 ans qu'on organise des concerts

Je compose souvent de manière instinctive, sans réfléchir
Et pourtant ça fait appel aux sciences"

2. Le synthétiseur analogique & les musiques électroniques

RÉSUMÉ :

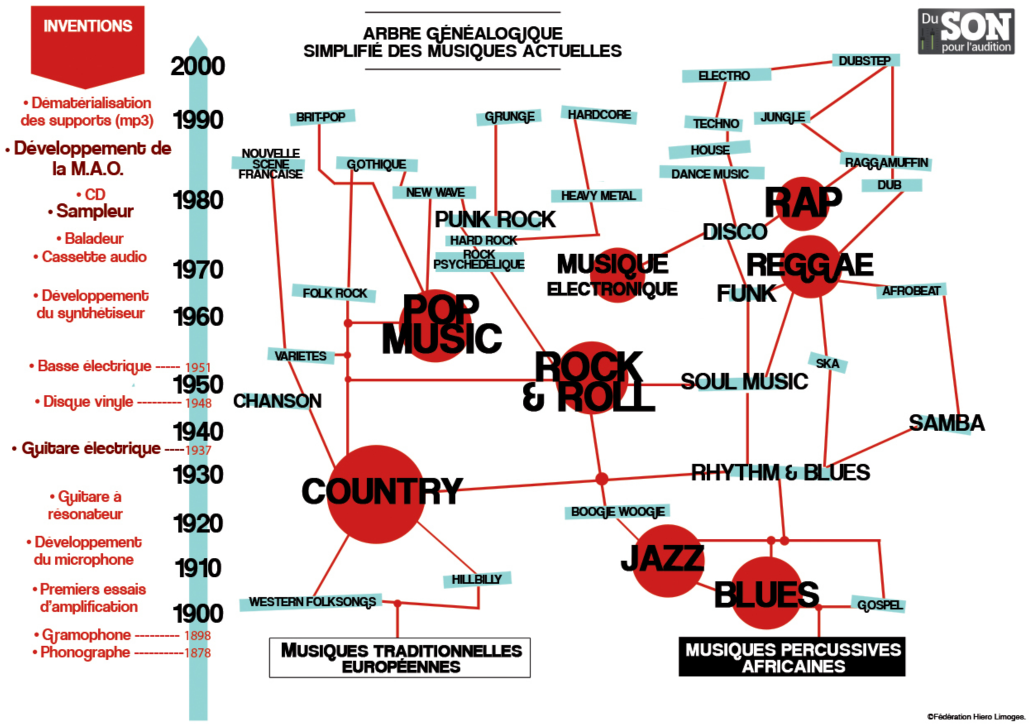
L'instrument utilisé par **Grand Ciel** est un synthétiseur analogique.
VIDÉO INCLUSE : "02 - DESCRIPTION MUSIQUE ET MATÉRIEL"

a. Présentation des musiques électroniques et du matériel [vidéo#02]

[cf. Description musique et matériel [vidéo]]

Vidéo présentant le matériel utilisé et l'esthétique de l'artiste.

"Les musiques électroniques se sont popularisées dans les années 80 quand les avancées technologiques, appuyées sur les résultats de la recherche scientifique, ont permis le développement d'un nouvel instrument : le synthétiseur. Rien n'est enregistré à l'intérieur, il n'a pas de mémoire, il crée lui-même des sons sous forme de signaux électriques qui sont ensuite transformés en signaux sonores à l'aide d'une ou plusieurs enceintes.
J'ai choisi ce synthé, un Elektron Analog Keys, car il combine un synthétiseur analogique polyphonique à 4 voix, c'est-à-dire qu'il peut jouer jusqu'à 4 notes en même temps, et un séquenceur qui me permet de créer des boucles qui se répètent. Je peux aussi le brancher à mon ordinateur pour le contrôler (c'est un bon côté de la technologie actuelle) et maintenant je vais vous montrer comment je créé un morceau."



Arbre Généalogique des musiques actuelles [schéma]

b. Carte de synthèse

Synthétiseur [carte]

II. Le son, phénomène vibratoire

RÉSUMÉ :

La banalité du son dans l'environnement cache une réalité physique précise.

VIDÉOS INCLUSES : "03 - SON PUR, SON COMPOSÉ", "04 - NIVEAU SONORE"

1. Son pur, son composé

a. Le son, phénomène vibratoire

Rappel : Cours de 2nde

Un son est une vibration mécanique nécessitant un milieu matériel pour se propager. Ce milieu peut être un gaz (comme l'air), un solide ou un liquide. Le son ne peut donc pas se propager dans le vide.

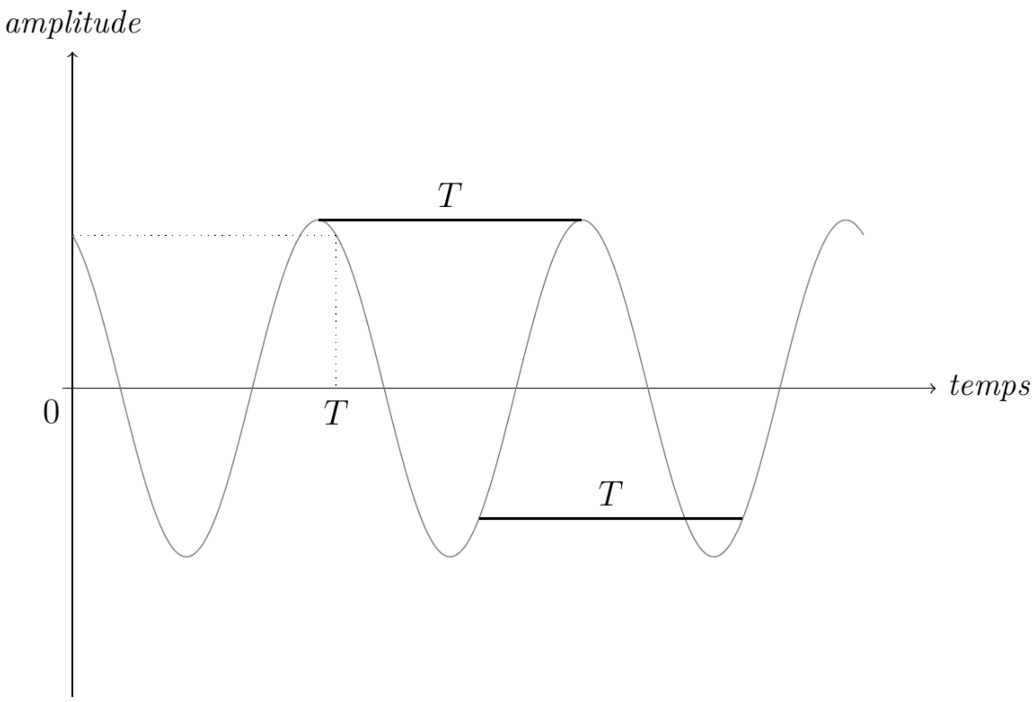
Complément : Illustration expérimentale

Lorsqu'on frappe les branches d'un diapason, celles-ci se mettent à vibrer et le diapason émet un son. L'amplitude de vibration des branches est trop faible pour être vue directement, mais on peut mettre en évidence la vibration en baignant les extrémités des branches du diapason dans un verre rempli d'eau.

Vous pourrez alors observer des vagues à la surface de l'eau et quelques éclaboussures.

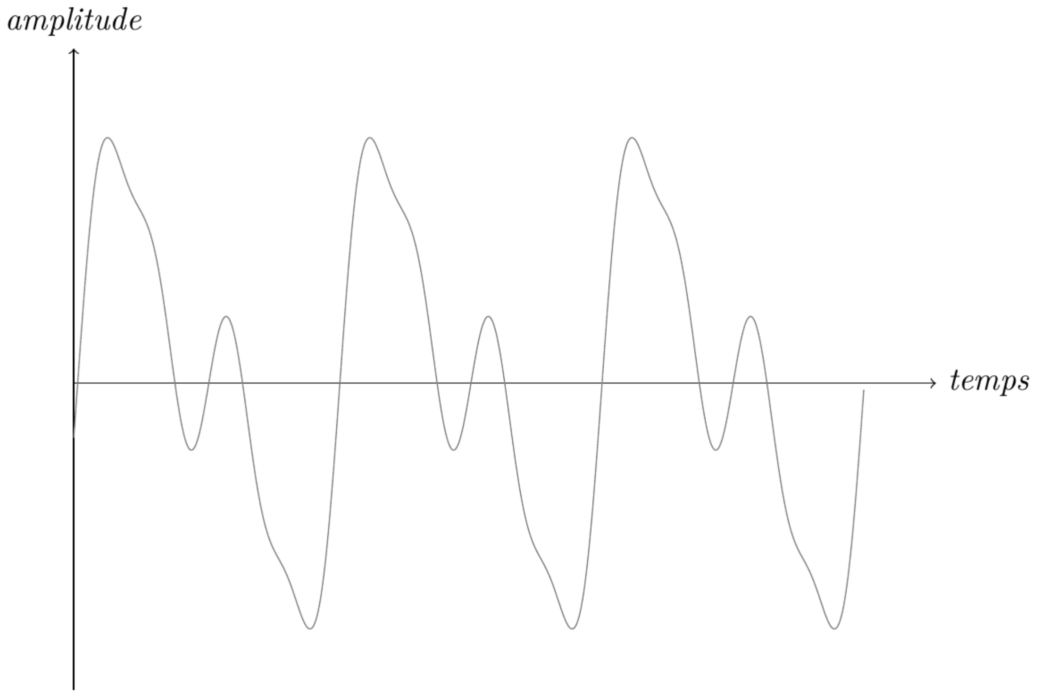
b. Son pur, son composé

Un *son pur* est représenté par une fonction sinusoïdale du temps, de période T et de fréquence $f = \frac{1}{T}$.



Un son émis par un diapason est un son pur.

Un *son composé* est représenté par une fonction du temps qui est périodique mais non sinusoïdale.



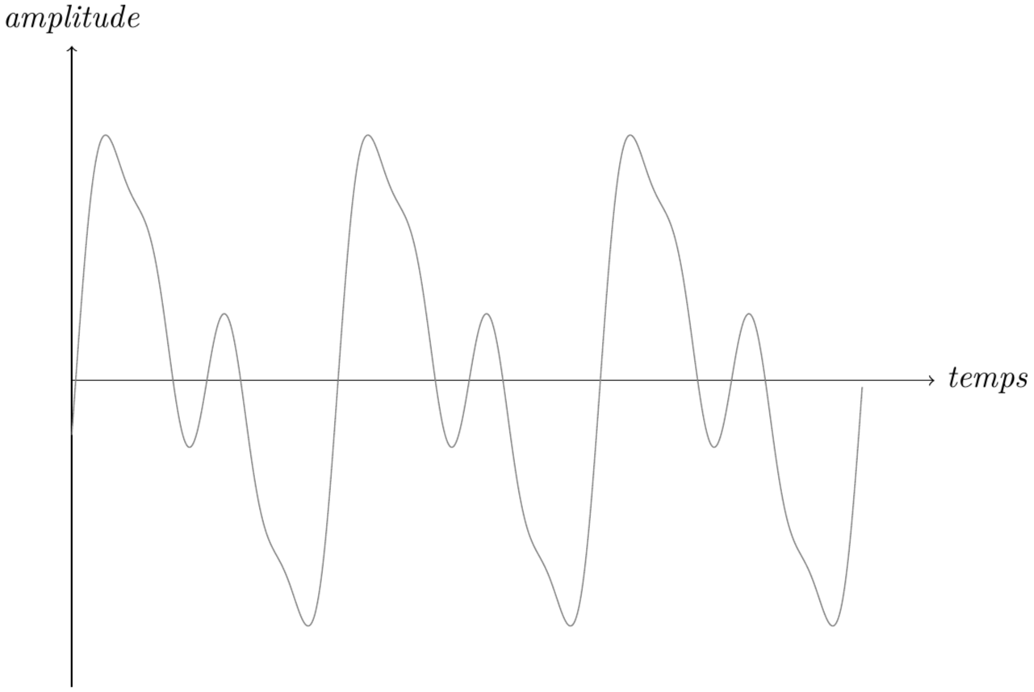
Une note jouée par une trompette ou une guitare est un son composé.

c. Analyse spectrale

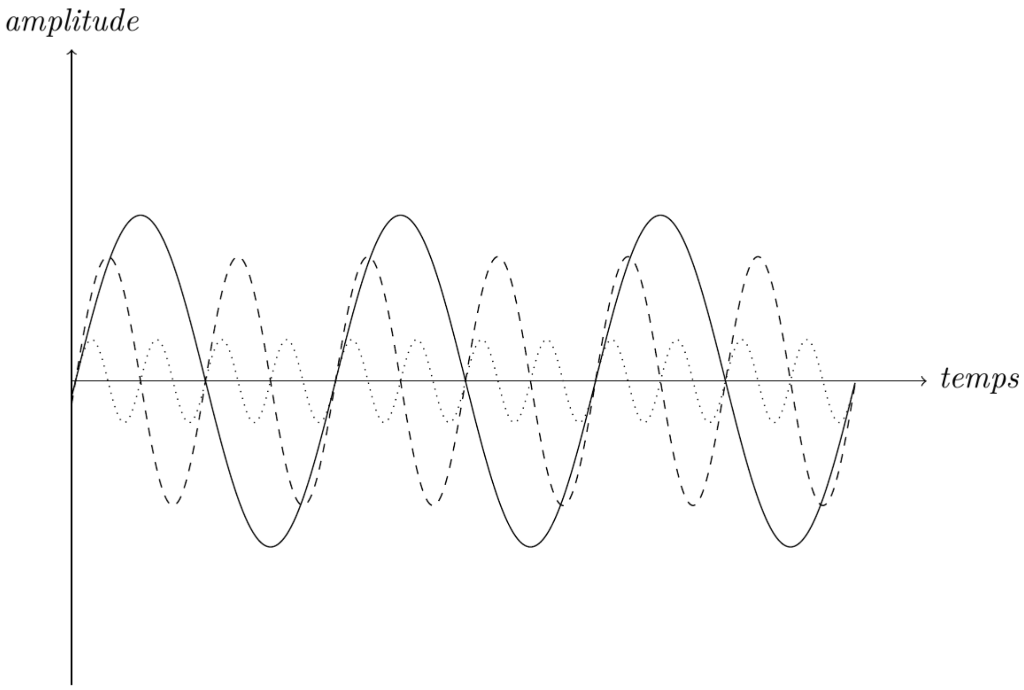
L'*analyse spectrale* a été introduite par Joseph Fourier au XIXe siècle, elle est aujourd'hui utilisée dans de nombreux domaines de la physique, en particulier pour analyser des sons.
Le signal périodique associé à un son composé peut ainsi se décomposer en somme de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence la plus basse. Celle-ci est appelée *fréquence fondamentale* (notée f_0), les autres fréquences sont les *harmoniques*.

Exemple :

Le son composé déjà pris en exemple :



se décompose en une somme de trois fonctions sinusoïdales :



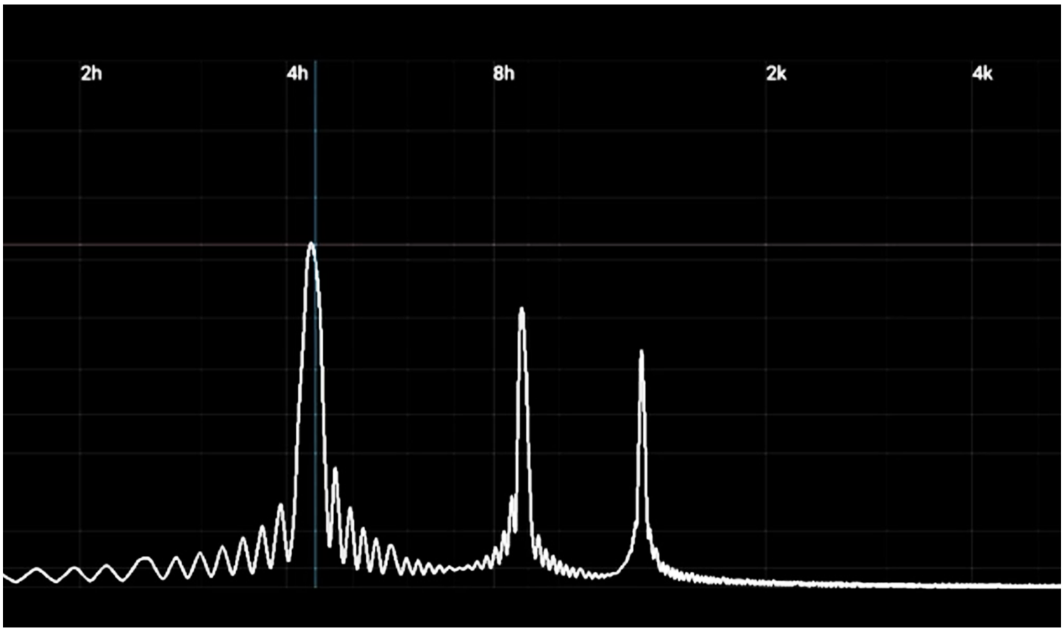
?

Question

Dans la décomposition montrée dans l'exemple ci-dessus, identifier la courbe correspondant à la fréquence fondamentale et déterminer les rapports des fréquences des deux autres courbes avec la fondamentale.

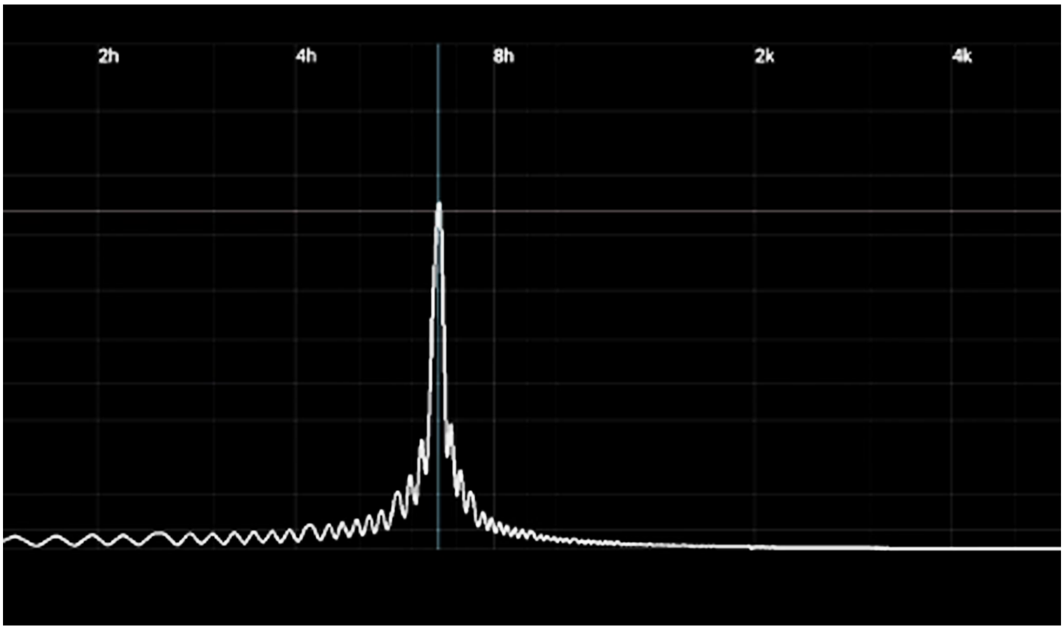
[solution n°1 p.66]

Le *spectre* est la représentation du son en fonction de la fréquence. On y observe une série de pics correspondant à la fréquence fondamentale (qui donne la hauteur du son) et aux fréquences harmoniques (dont le nombre et l'amplitude déterminent le timbre du son).



Son composé [ill.]

Le spectre d'un son pur ne comporte qu'un seul pic.



Son Pur [ill.]

d. Comment différencier un son pur d'un son composé ?

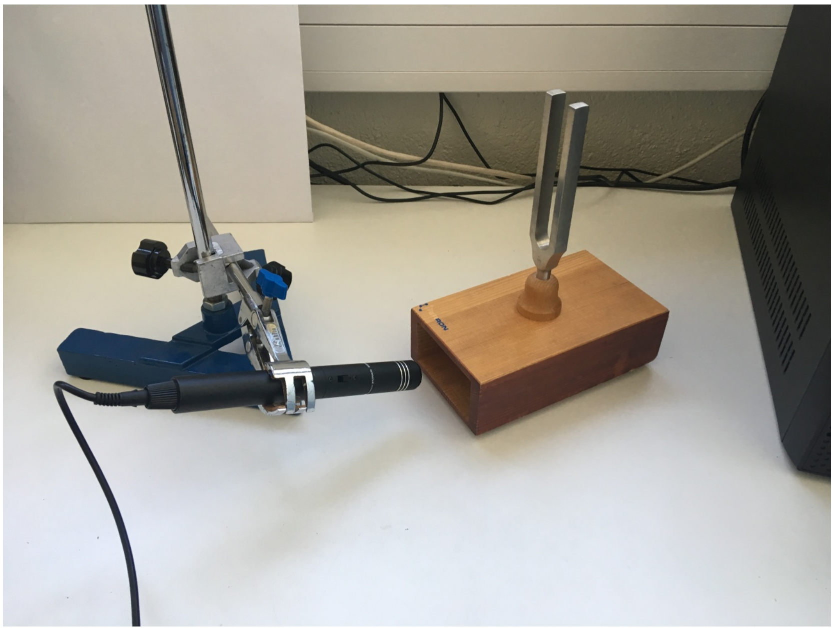
Activité expérimentale - Exemple

Protocole expérimental

- Brancher le microphone sur l'entrée audio de l'ordinateur
- Ouvrir le logiciel d'acquisition (Audacity ou Regressi)
- Réaliser l'acquisition du signal sonore émis par le diapason

Matériel

- Un ordinateur équipé d'un logiciel d'acquisition audio (Audacity ou Regressi)
- Un microphone
- Un diapason avec un marteau
- Un instrument de musique (guitare ou flûte par exemple)



Montage expérimental

Reproduire cette manipulation avec un instrument de musique.
Observer les signaux temporels, les comparer (signal sinusoïdal et signal périodique non sinusoïdal).
Faire l'analyse spectrale pour observer les pics.

e. Son pur, son composé [video#03]

[cf. Son pur, son composé [vidéo]]

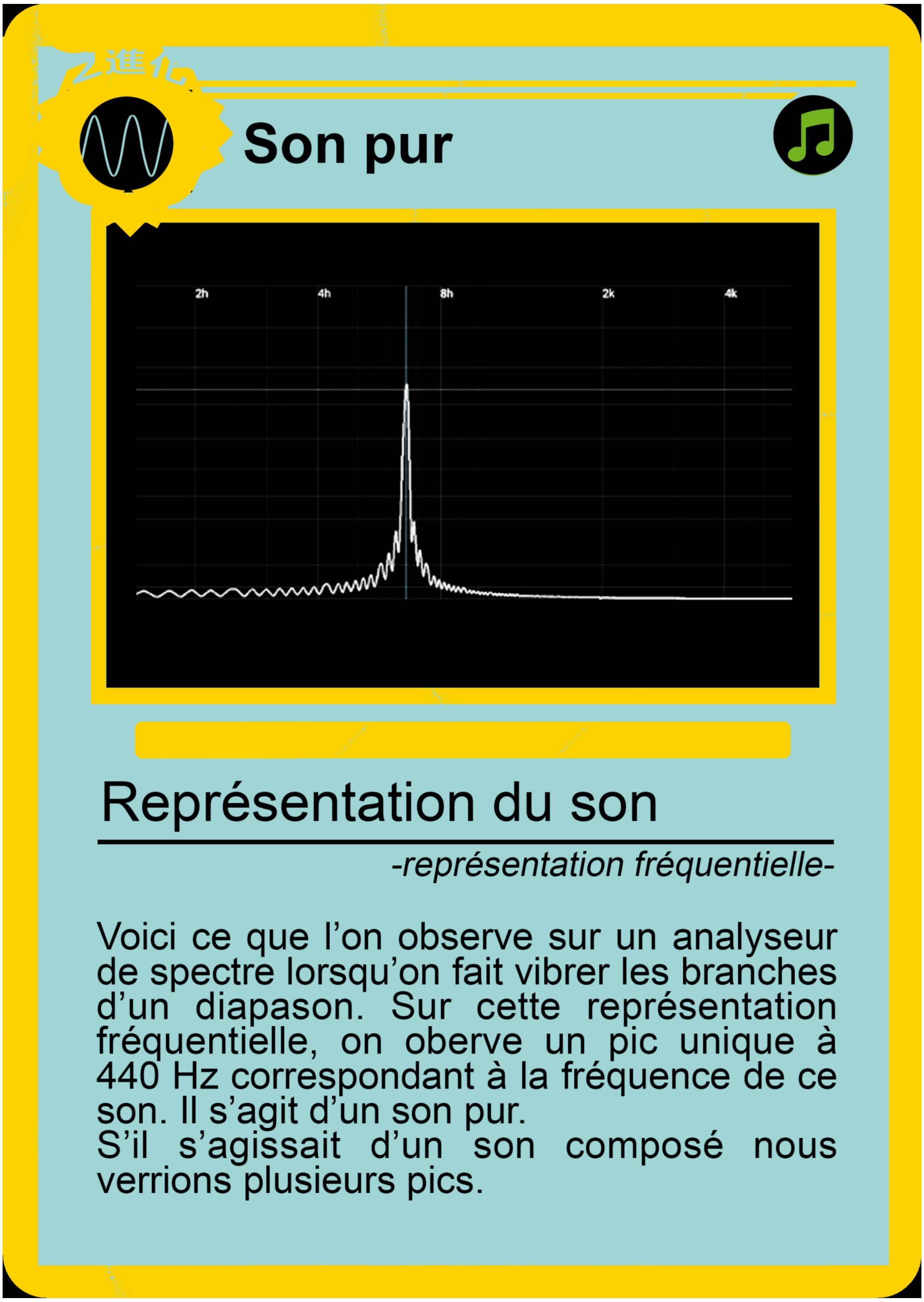
"*Le son est une vibration de l'air ou d'un fluide, on mesure sa fréquence en Hertz c'est-à-dire le nombre d'oscillations par seconde. Un diapason est conçu pour que ses branches vibrent 440 fois par seconde. ce qui en faisant vibrer l'air alentour produit le son correspondant à la note La. Si ça vibre plus vite, le son est plus aigu, si ça vibre moins vite le son est plus grave.*
Quand je veux créer une mélodie, je choisis avant tout des sons. Ils peuvent être graves, aigus. Pour aujourd'hui je choisis une hauteur moyenne. Sauf que ce son pur comme celui du diapason n'est pas très beau à l'oreille. Pour rendre plus agréable cette note de musique, je vais l'enrichir avec d'autres sons.
Tu viens de jouer un son composé. Un son composé de fréquence f est une somme de sons de fréquences multiples de f. f est appelée fréquence fondamentale et détermine la hauteur du son. Les autres fréquences (2f, 3f, 4f, etc.) sont appelées harmoniques et déterminent en partie le timbre du son. La note qu'on vient d'entendre est toujours un La mais en plus de sa fréquence fondamentale à 440 Hz, on a rajouté des vibrations à 880 Hz, 1320 Hz.
L'identité d'un son qu'on appelle le timbre dépend en partie de la présence et de l'intensité sonore de ces fréquences harmoniques.

D'accord, et donc sur mon synthé j'ai pleins d'autres boutons pour changer le timbre."

f. Son pur, son composé [cartes]

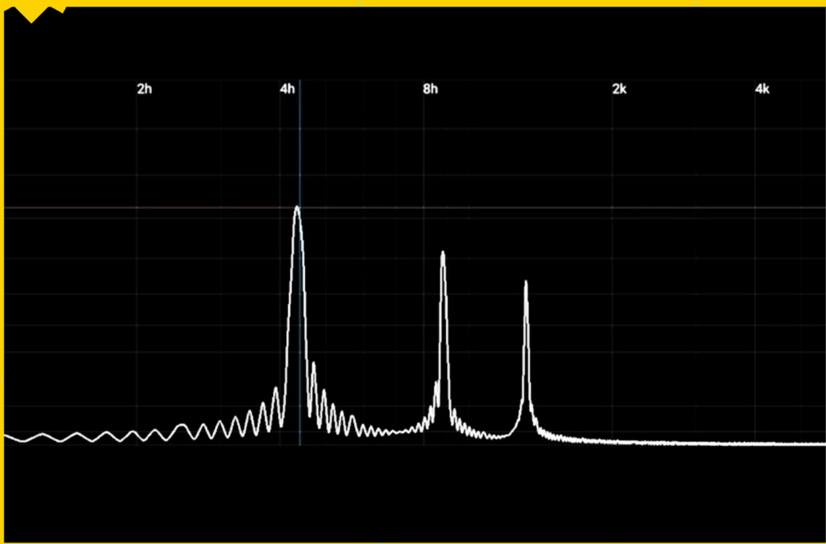
Analyse temporelle [carte]

Analyse spectrale [carte]



Son pur [carte]

Son composé



Représentation du son

-représentation fréquentielle-

On observe sur cette représentation d’une note de musique des pics correspondant à la fréquence fondamentale qui donne la hauteur du son et aux fréquences harmoniques dont le nombre et l'amplitude déterminent le timbre du son. Celles-ci sont des multiples de la fréquence fondamentale. Sur cette image, le premier pic est à 440 Hz, le second à 880 Hz et le dernier à 1 320 Hz.

Son composé [carte]

2. Puissance sonore et intensité sonore

a. Intensité sonore

L'intensité d'un son, notée I, est liée à l'amplitude de vibration mécanique du signal sonore : plus cette amplitude est élevée, plus le son est intense, et plus il sera perçu comme "fort".
Par définition, l'intensité sonore, en watt par mètre carré, est la valeur de la puissance transférée par l'onde sonore à travers une surface : $I = \frac{P}{S}$
avec P en watt (W) et S en mètre carré $\left(m^2\right)$.

> Proposition d'illustration expérimentale :
> Enregistrement du son du diapason à 20 cm et à 1 m -> modification de l'amplitude du signal -> modification de l'intensité sonore

b. Niveau d'intensité sonore

Les valeurs des intensités sonores s'étalent sur une grande échelle d'ordres de grandeur.
Le *niveau d'intensité sonore* L permet d'utiliser une échelle plus adaptée et plus proche des sensations auditives. Il se calcule à l'aide de la formule :

$$L = 10 \log \left(\frac{I}{I_0}\right)$$

où :

- $\log$ est la fonction *logarithme décimal* (présente sur les calculatrices),
- I est l'intensité sonore $\left(\text{en } W.m^{-2}\right)$,
- I_0 est l'intensité sonore du seuil d'audibilité à la fréquence de $1\ 000$ Hz.

On a $I_0 = 1,0 \times 10^{-12}\ W.m^{-2}$.
Le niveau d'intensité sonore L obtenu s'exprime en *décibels* (abréviation : dB).

> Le *seuil d'audibilité* correspond, pour une fréquence sonore donnée, à la plus petite intensité sonore perçue par une oreille humaine. Pour une fréquence de 1000 Hz, ce seuil est de $1,0 \times 10^{-12}\ W.m^{-2}$, ce qui correspond à un niveau d'intensité sonore de 0 dB.

> Proposition d'illustration expérimentale :
> Illustrer la non-linéarité du niveau d'intensité sonore en ajoutant deux sources.

> *Complément :*
>
> Le sonomètre permet de mesurer le niveau d'intensité sonore.

Sonomètre [photo]

Sur cette image, le niveau d'intensité sonore est de $85{,}8$ dB, juste au-dessus du seuil de risque fixé par l'Organisation Mondiale de la Santé (voir les cartes de synthèse ci-dessous pour en savoir plus).

Complément : une propriété remarquable du logarithme

La fonction logarithme a une propriété remarquable, elle « transforme la multiplication en addition » ! C'est-à-dire que, pour tous nombres réels a et b, on a :

$$\log(ab) = \log(a) + \log(b)$$

Question

Expliquer à l'aide de la propriété précédente le fait que quand on double la puissance d'un son, le niveau d'intensité sonore augmente d'environ 3dB.

[solution n°2 p.66]

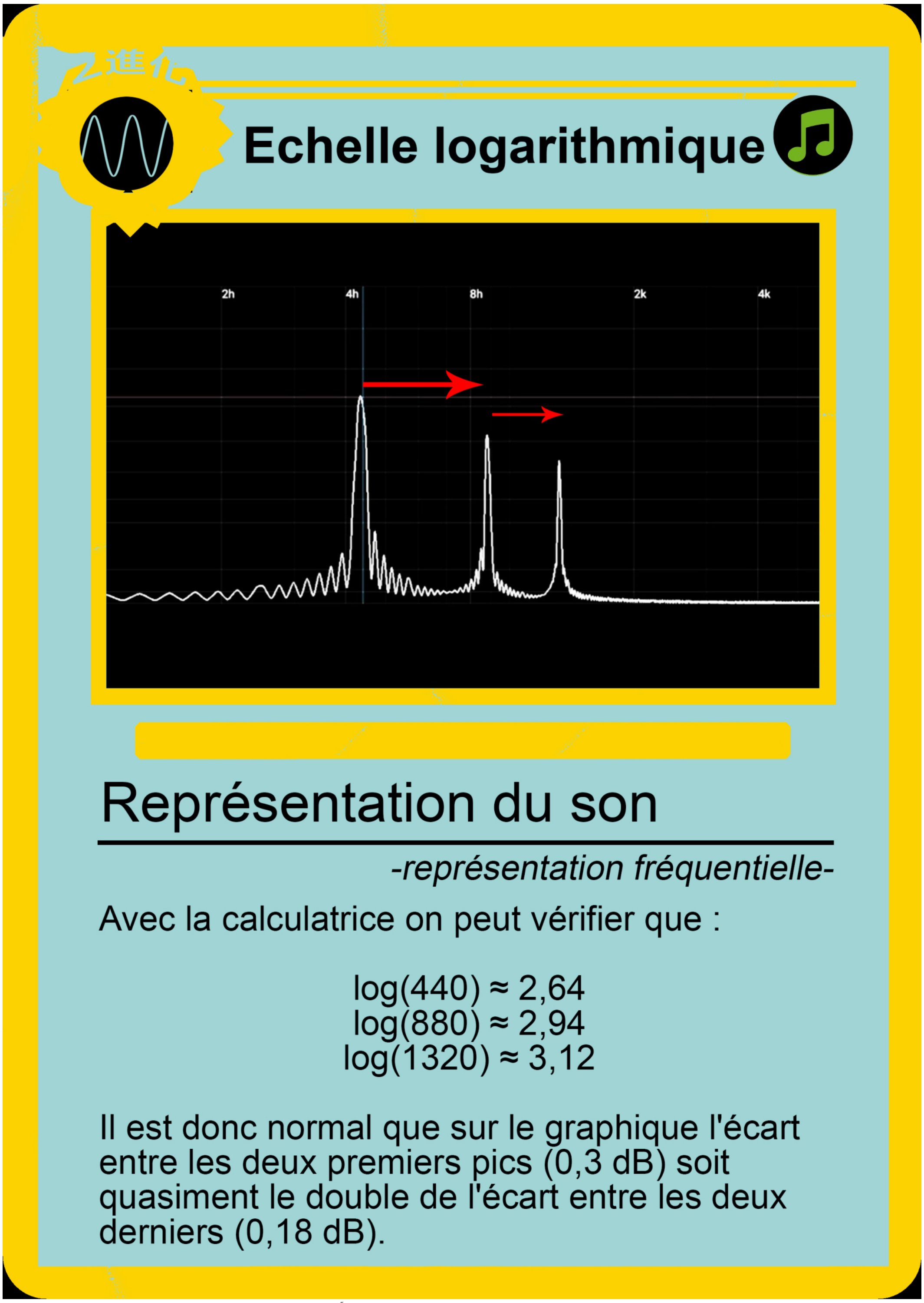
Complément :

La fonction $\log$ utilisée ici est le *logarithme décimal*. On peut se faire une idée de cette fonction : c'est l'exposant qui apparaît quand on écrit le nombre en argument sous forme de puissance de 10. On a donc les quelques valeurs suivantes :

x	$1 = 10^0$	10	100	$1\,000$	$10\,000$
$\log(x)$	0	1	2	3	4

On voit sur ces valeurs qu'en utilisant la fonction $\log$ pour calculer le niveau d'intensité, l'étalement des valeurs sur l'échelle obtenue va considérablement réduire !

Un autre exemple de valeur de la fonction $\log$: on sait que $\sqrt{10} = 10^{1/2} \approx 3{,}16$, on en déduit que $\log(3{,}16) \approx 0{,}5$.



Échelle logarithmique [carte]

c. Niveau sonore [video#04]

[cf. Niveau sonore [vidéo]]

"*Sur son synthétiseur quand Grand Ciel joue la première note à la hauteur qu'il a choisie ça génère un signal électrique dont on peut modifier l'amplitude. Si l'amplitude du signal est importante c'est qu'il y a une forte intensité sonore.*

T'es sérieux là ? Toute cette grande phrase pour dire que je peux monter le son en tournant ce bouton. Aïe par contre quand c'est trop fort ça pète les oreilles du coup pour que ça fasse moins mal j'ai plutôt envie de m'éloigner.

Et c'est normal, en doublant sa distance par rapport aux enceintes on divise l'intensité sonore par quatre. En boite de nuit, s'éloigner des hauts parleurs c'est fortement protéger ses oreilles.

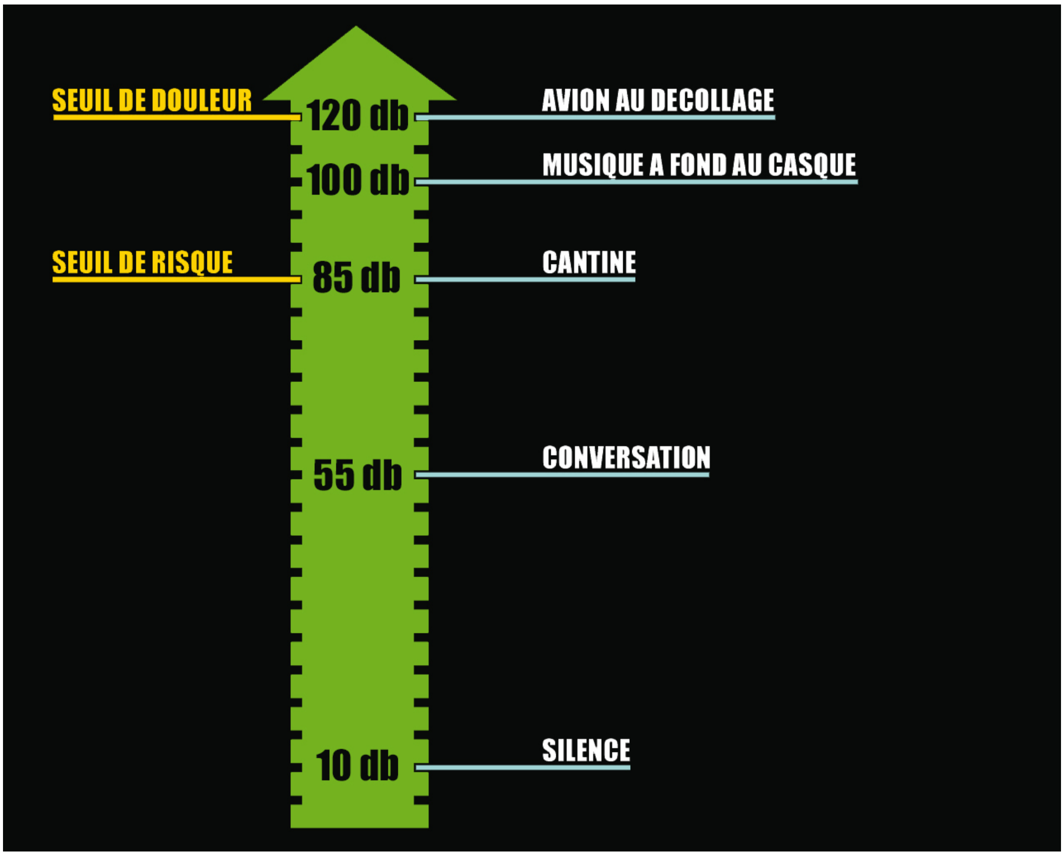
Moi je peux choisir si je joue certaines notes fortes ou pas fortes par contre j'avoue que je ne sais pas comment les gens les écouteront

Pour le contrôler et mesurer le niveau d'intensité sonore on utilise un sonomètre qui indique un résultat en décibels (dB)

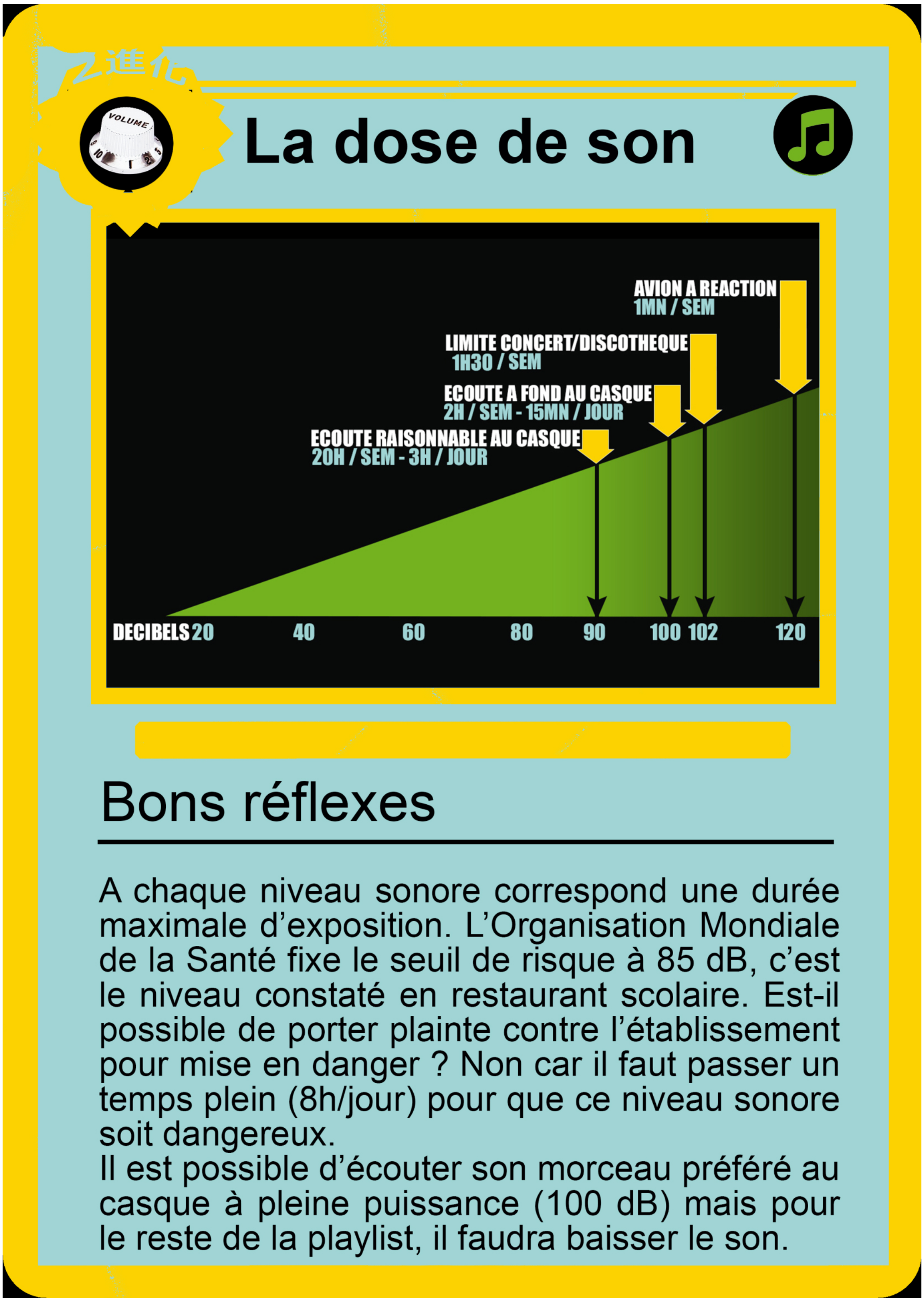
Donc si on double la puissance en watt (et donc l'intensité sonore) on double les décibels ?

Et non, pour être plus fidèle à la sensation auditive, le niveau d'intensité sonore est exprimé en décibels sur une échelle logarithmique. Doubler l'intensité sonore, ça n'est augmenter que de 3dB.

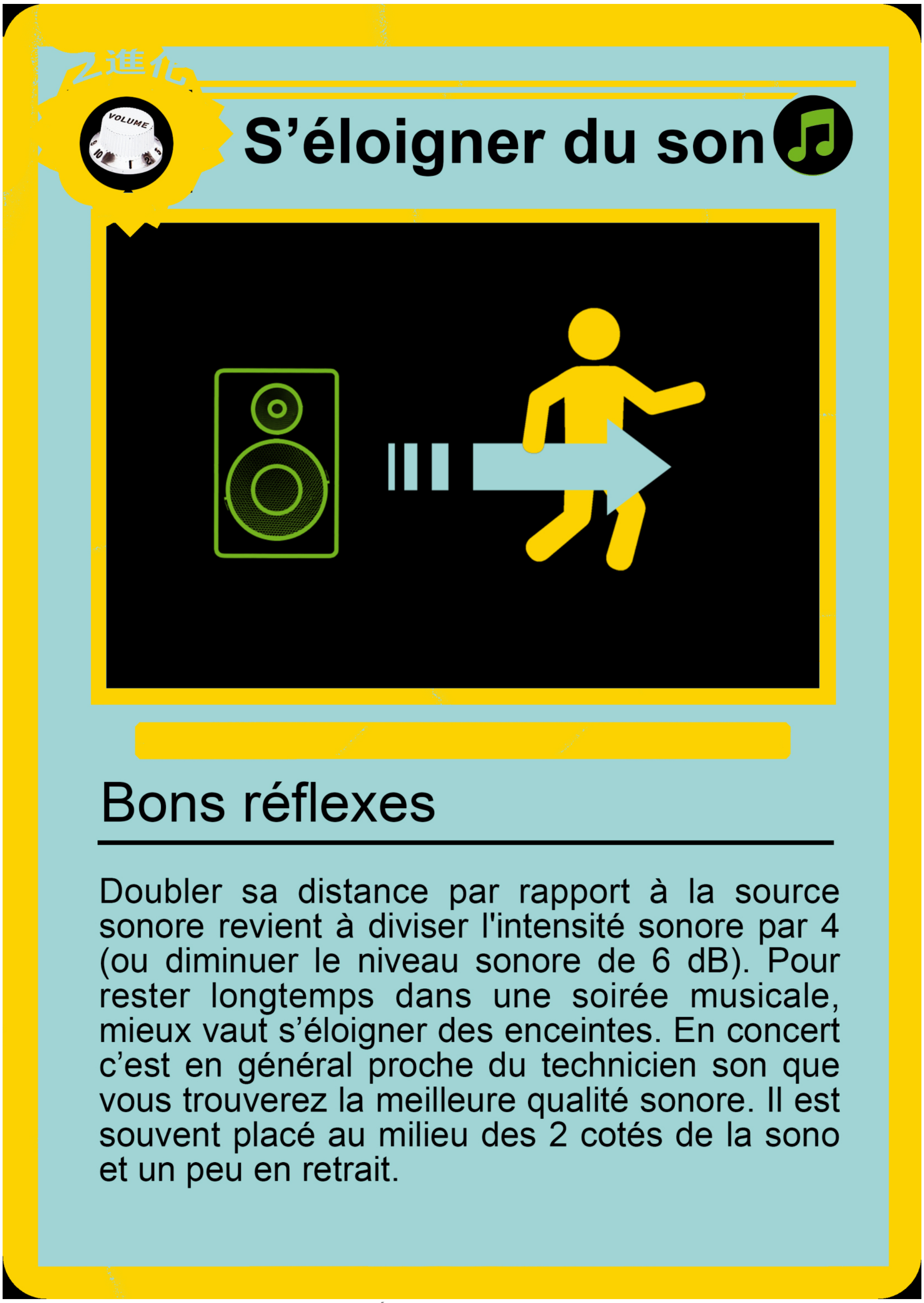
Je vais donc jouer sur l'intensité pour créer des ressentis différents."



d. Niveau sonore [cartes]



Dose de son [carte]



Éloignement [carte]

Baisser le son [carte]

3. Cordes vibrantes et tuyaux sonores

a. La vibration d'une corde

Une corde tendue émet en vibrant un son composé dont les fréquences sont reliées aux caractéristiques de la corde telles que la longueur, la tension et la masse linéique (c'est-à-dire la masse par unité de longueur).
Plus la masse linéique est élevée, plus la fréquence est basse.

Plus la tension est forte, plus la fréquence est élevée (note plus aiguë).

Proposition d'illustration expérimentale :

Avec une guitare ou un sonomètre à cordes, faire des enregistrements pour montrer l'évolution de la fréquence fondamentale du son en fonction des caractéristiques (longueur, tension, masse linéique).

Observer en particulier que si l'on divise la longueur de la corde par 2, la fréquence fondamentale double.

Complément :

Dans les instruments à vent, un phénomène analogue se produit par vibration de l'air dans un tuyau.

III. La musique ou l'art de faire entendre les nombres

RÉSUMÉ :

Comment l'analyse mathématique du phénomène vibratoire du son aboutit-elle à une production artistique ? La musique et les mathématiques sont deux langages universels. Les Grecs anciens les ont dotés d'une origine commune puisque la théorie pythagoricienne des proportions avait pour but de percer les secrets de l'harmonie musicale. Depuis, les évolutions de la musique et des mathématiques se sont enrichies mutuellement.

VIDÉOS INCLUSES : "05 - DU SON À LA GAMME", "06 - DE LA GAMME DE PYTHAGORE À LA GAMME TEMPÉRÉE"

1. Du son à la gamme

RÉSUMÉ :

En musique, un intervalle entre deux sons est défini par le rapport (et non la différence) de leurs fréquences fondamentales. Deux sons dont les fréquences sont dans le rapport $\frac{2}{1}$ correspondent à une même note, à deux hauteurs différentes. L'intervalle qui les sépare s'appelle une octave. Une gamme est une suite finie de notes réparties sur une octave.

a. Intervalles de fréquences

Lorsqu'on pince une corde vibrante et la même corde dont la longueur est diminuée de moitié, les sons obtenus :

- sont particulièrement consonants (ils vont très bien ensemble à l'oreille)
- ont des fréquences fondamentales dont l'une est le double de l'autre

et ce quelle que soit la longueur (et donc la fréquence) de la corde dont on part. Notre ressenti et les variations de fréquences constatées nous amènent donc à considérer les rapports des fréquences fondamentales des sons.

Définition :

En musique, on appelle *intervalle entre deux sons* le rapport $\frac{f_2}{f_1}$ de la fréquence fondamentale f_2 du deuxième son par celle, f_1, du premier.

Question

On dit que l'intervalle est ascendant si $\frac{f_2}{f_1}$ est supérieur à 1, descendant sinon. Expliquer pourquoi en comparant les hauteurs des sons correspondants dans chaque cas.

[solution n°3 p.66]

Attention :

1. Le mot « intervalle » n'a pas le même sens ici que dans l'étude de l'ensemble $\mathbb{R}$ des nombres réels, où il désigne des sous-ensembles de $\mathbb{R}$ particuliers (par exemple l'intervalle $[1, 3]$ désigne le sous-ensemble des réels qui sont supérieurs ou égaux à 1 et inférieurs ou égaux à 3). En musique, un intervalle est un nombre réel strictement positif (rapport de deux nombres réels strictement positifs).
2. La *longueur* d'un intervalle de $\mathbb{R}$ s'obtient en faisant la différence des extrémités (par exemple celle de $[1, 3]$ est $3 - 1 = 2$). En musique la notion d'intervalle n'est pas liée à une différence mais à un rapport.

Question

Indiquer dans le tableau la différence et le rapport de chacune des fréquences avec celle du La2 :

Note	Fréquence (Hz)	Différence (avec La2)	Rapport (avec La2)
La2	220		
La3	440		
La4	880		

[solution n°4 p.66]

?

Question

L'oreille humaine entend les sons dont les fréquences sont comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz. Quel est l'intervalle perçu par l'oreille humaine ?

[solution n°5 p.66]

b. L'octave et la gamme

On a rappelé ci-dessus que les sons obtenus en pinçant une corde de longueur donnée et de longueur diminuée de moitié sont particulièrement consonants. On dit de tels sons qu'ils correspondent à la même *note* (à des hauteurs différentes).

i

Définition :

On appelle *octave* la donnée de deux sons d'intervalle égal à 2.

Exemple :

Par exemple, La2 et La3 forment une octave, ainsi que La3 et La4, ...

En termes de fréquences, une octave est donc la donnée de deux fréquences fondamentales dont l'une est le double de l'autre : f et $2f$; on retrouve la notion classique d'intervalle si on note cette octave :
$[f, 2f[$

L'octave suivante est alors $[2f, 4f[$, puis $[4f, 8f[$, $[8f, 16f[$ ... tandis que l'octave précédente est $\left[\frac{f}{2}, f\right[$, puis $\left[\frac{f}{4}, \frac{f}{2}\right[$, ...

Insistons à nouveau sur le fait que c'est le rapport des deux fréquences qui est constant dans chaque octave (égal à 2) et non la différence !

?

Question

Dans combien d'octaves l'oreille humaine peut-elle entendre des sons ?

[solution n°6 p.66]

+

Complément :

Mathématiquement, la solution la plus rigoureuse consiste à chercher l'exposant e tel que $20 \times 2^e = 20\,000$, c'est-à-dire tel que $2^e = 1\,000$. En prenant le logarithme décimal, on obtient $\log(2^e) = \log(1000)$. Comme $\log(2^e) = e\log(2)$, on trouve $e = \dfrac{\log(1000)}{\log(2)}$, ce qui donne pour l'exposant e la valeur approchée $e \approx 9{,}97$. L'oreille humaine entend donc effectivement dans environ 10 octaves !

Pour pouvoir jouer de la musique il suffit de se donner des notes dans l'octave $[f, 2f[$, c'est-à-dire des fréquences f_1, f_2, ..., f_g comprises entre f et $2f$. On aura alors les mêmes notes, avec des fréquences doubles ($2f_1$, $2f_2$, ..., $2f_g$), dans l'octave supérieure $[2f, 4f[$; puis les mêmes avec des fréquences quadruples ($4f_1$, $4f_2$, ..., $4f_g$) dans l'octave $[4f, 8f[$ ... mais aussi les mêmes avec des fréquences moitié ($\left(\frac{f_1}{2}, \frac{f_2}{2}, \dots, \frac{f_g}{2}\right)$ dans l'octave inférieure $\left[\frac{f}{2}, f\right[$. Et ainsi de suite.

i

Définition :

> Une *gamme* est une suite finie de notes réparties dans une octave.

Une fois la fréquence f choisie (par exemple $f = 440$ Hz pour le La3), quelles notes choisir parmi toutes les fréquences comprises entre f et $2f$ pour composer la gamme ? Pour chacune des fréquences fondamentales f_1, f_2,... f_g des notes de la gamme, l'intervalle $\frac{f_i}{f}$ devra être compris entre 1 et 2 afin que f_i soit comprise entre f et $2f$:

$$f \leq f_i \leq 2f \Leftrightarrow 1 \leq \frac{f_i}{f} \leq 2$$

Se donner une gamme revient donc à choisir des nombres compris entre 1 et 2 (un pour chaque note). Bien sûr il faut les choisir de façon à ce que les notes obtenues sonnent bien ensemble !

c. Du son à la gamme [video#05]

[cf. Du son à la gamme [vidéo]]
Transcription :
"Quand je joue des notes ensemble je me rends compte qu'elles ne sonnent pas de la même manière les unes avec les autres. Évidemment un La grave et un La aigu sonnent très bien ensemble.

Cet intervalle entre les deux notes qui viennent d'être jouées sur le synthétiseur s'appelle une octave, la note grave a une fréquence fondamentale de 440 Hz, celle de la note aiguë est de 880 Hz donc deux fois plus élevée. Le rapport des 2 fréquences est une fraction simple $\left(\frac{2}{1}\right)$*, les notes s'accordent parfaitement à l'oreille.*

Il y a des notes différentes qui vont très facilement ensemble, le La et le Mi par exemple.

Ici l'intervalle est une quinte, le rapport entre la fréquence fondamentale du Mi 660 Hz et celle du La 440 Hz est de $\frac{3}{2}$*. Il s'agit d'une fraction simple, les notes s'accordent bien à l'oreille.*

Par contre ces deux autres notes sont moins souvent utilisées ensemble :La et Ré#, ces 2 notes peuvent paraître un peu plus gênantes.

Il s'agit d'une quinte diminuée, la note la plus aiguë a une fréquence fondamentale de 622 Hz soit un rapport de $\frac{311}{220}$ *à celle de la note la plus grave, il s'agit d'une fraction compliquée, les notes paraissent moins consonantes. Les quintes diminuées ont été longtemps interdites par la religion catholique car elles leur évoquaient le diable, elles sont par contre beaucoup plus utilisées aujourd'hui, par exemple en musique métal.*

Eh bien concrètement dans mon morceau de musique, j'utiliserai des quintes justes mais aussi des accords diminués pour provoquer des émotions différentes."

2. Le cycle des quintes de Pythagore

RÉSUMÉ :

Dans l'Antiquité, la construction des gammes était basée sur des fractions simples $\left(\frac{2}{1}, \frac{3}{2}, \frac{4}{3}, \text{etc.}\right)$. En effet, des sons dont les fréquences sont dans ces rapports simples étaient alors considérés comme les seuls à être consonants. Une quinte est un intervalle entre deux fréquences de rapport $\frac{3}{2}$.

Les gammes dites de Pythagore sont basées sur le cycle des quintes. Pour des raisons mathématiques, ce cycle des quintes ne « reboucle » jamais sur la note de départ. Cependant, les cycles de 5, 7 ou 12 quintes « rebouclent » presque. Pour les gammes associées, l'identification de la dernière note avec la première impose que l'une des quintes du cycle ne corresponde pas exactement à la fréquence $\frac{3}{2}$.

Savoir-faire : - Calculer des puissances et des quotients en lien avec le cycle des quintes. - Mettre en place un raisonnement mathématique pour prouver que le cycle des quintes est infini.

a. Les quintes

Dans l'Antiquité, les seuls nombres connus sont les nombres rationnels, rapports de deux nombres entiers. Par ailleurs, on a vu qu'en réduisant la longueur d'une corde vibrante de moitié, le nouveau son obtenu est particulièrement consonant avec l'ancien (c'est l'octave) ; on obtient également un son consonant en réduisant la longueur aux $\frac{2}{3}$, c'est-à-dire en multipliant la fréquence par $\frac{3}{2}$.

Définition :

Une *quinte* est la donnée de deux sons d'intervalle égal à $\frac{3}{2}$.

Exemple :

Par exemple Do2 (130 Hz) et Sol2 (195 Hz) forment une quinte puisque $\frac{195}{130} = \frac{3}{2} = 1{,}5$.

Complément :

On passe à l'octave en pinçant la corde à la moitié de sa longueur, il pourrait sembler plus naturel que le passage à la quinte se fasse en la pinçant au tiers (c'est-à-dire en divisant la longueur par 3). Cela revient au même que de la pincer aux $\frac{2}{3}$: en pinçant au tiers, la fréquence est multipliée par 3, la note obtenue est en dehors de l'octave de la note de départ ; en pinçant aux $\frac{2}{3}$, la fréquence est multipliée par $\frac{3}{2}$, la note obtenue reste dans l'octave de la note de départ et, comme $\frac{3}{2} = 3 \times \frac{1}{2}$, c'est la même note qu'en pinçant au tiers, à l'octave en dessous.

Le cycle des quintes

À partir du constat que deux sons formant une quinte sont consonants, on construit une gamme en formant des quintes successives :

- f et $\frac{3}{2} \times f = \frac{3f}{2}$ forment une quinte donc on ajoute la note $\frac{3f}{2}$ (dans l'octave $[f, 2f[$) ;
- $\frac{3f}{2}$ et $\frac{3}{2} \times \frac{3f}{2} = \frac{9f}{4}$ forment une quinte, mais $\frac{9}{4} > 2$ donc $\frac{9f}{4}$ n'est pas dans l'octave $[f, 2f[$; la fréquence correspondant à la même note dans l'octave $[f, 2f[$ est la fréquence moitié : $\frac{9f}{4} \times \frac{1}{2} = \frac{9f}{8}$, on ajoute cette note dans l'octave $[f, 2f[$;
- la quinte suivante est donnée par $\frac{9f}{8}$ et $\frac{3}{2} \times \frac{9f}{8} = \frac{27f}{16}$, on ajoute la note $\frac{27f}{16}$ dans l'octave (car $\frac{27}{16} < \frac{32}{16} = 2$).

[cf. Cycle des quintes [anim.]]

Question

Compléter le tableau suivant en continuant le calcul des quintes, en revenant toujours dans l'octave $[f, 2f[$:

fréquence	f	$\frac{3f}{2}$	$\frac{9f}{8}$	$\frac{27f}{16}$				
intervalle	1	1,5	1,125	1,6875				

[solution n°7 p.66]

On constatera une fois le tableau rempli qu'au bout de 5 quintes, on arrive assez proche de l'octave ($1{,}8984375 \approx 2$) et, au bout de 7 quintes, assez proche de la note initiale ($1{,}06787109375 \approx 1$). Si on pousse jusqu'à 12 quintes, on arrive à l'intervalle

$$\frac{3^{12}}{2^{19}} = 1{,}0136432647705078125$$

c'est-à-dire qu'on retombe très proche de la note de départ.

Complément :

Peut-on retomber exactement sur la note de départ ? Il faudrait pour cela trouver des exposants entiers n et p tels que :

$\frac{3^n}{2^p} = 1$
ce qui équivaut à :
$3^n = 2^p$
Or 3^n est un entier impair tandis que 2^p est pair ... : c'est impossible !

On est obligé d'accepter de faire une approximation pour que le cycle des quintes finisse par revenir à la note de départ. Cette approximation est d'autant plus petite que le cycle est long et que le nombre de notes est grand (ce qui peut poser des problèmes en pratique). La quinte qu'on a diminuée ou allongée s'appelle le *loup*.

b. Les notes de la gamme de Pythagore

On trouve les notes de la gamme de Pythagore en appliquant le procédé décrit précédemment, appelé *cycle des quintes*, à partir de la note Fa.

?

Question

Partons du Fa3 (348 Hz) et appliquons le cycle des quintes jusqu'à la 7^{è} note, on obtient les notes de la gamme de Pythagore (dans le désordre !). Calculer leurs fréquences :

Fa	Do	Sol	Ré	La	Mi	Si
348						

[solution n°8 p.66]

Noter que $348 \times 1{,}06787109375 \approx 372$, on ne retombe pas exactement sur la note de départ après la 7^{e} note. Si on applique le cycle des quintes jusqu'à la 12^{e} note, on obtient 5 notes supplémentaires :
Do# , Ré# , Fa# , Sol# , La#
qui s'intercalent entre Do et Ré, Ré et Mi, Fa et Sol, Sol et La, La et Si.

?

Question

On donne les 5 derniers intervalles du cycle à 12 quintes sous forme de fractions : $\frac{3^8}{2^{12}}, \frac{3^9}{2^{14}}, \frac{3^{10}}{2^{15}}, \frac{3^{11}}{2^{17}}$ et $\frac{3^{12}}{2^{19}}$. En déduire les fréquences des 5 notes supplémentaires Do#, Ré#, Fa#, Sol# et La# (attention à l'ordre !).

[solution n°9 p.67]

La tradition veut qu'on appelle *gammes de Pythagore* les gammes à 5, 7 ou 12 notes obtenues de cette façon. Elles sont également apparues dans d'autres cultures indépendamment de la culture grecque antique (notamment en Chine).

+

Complément : quartes

On peut vérifier qu'au lieu d'utiliser des quintes, on aurait pu utiliser des *quartes* $\left(\text{deux notes dont l'intervalle vaut } \frac{4}{3}\right)$, on retrouve alors les mêmes notes car :
$\frac{4}{3} \times \frac{3}{2} = 2$
Sur les notes, les opérations « prendre la quinte » et « prendre la quarte » sont donc inverses l'une de l'autre ! Par exemple, Do et Sol forment une quinte donc Sol et Do forment une quarte (remarque : il s'agit alors du Do dans l'octave au-dessus du Sol).

Prendre la quarte d'une note, c'est multiplier sa fréquence par $\frac{4}{3}$, ce qui revient au même que la diviser par $\frac{3}{2}$ $\left(\text{c'est-à-dire la multiplier par } \frac{2}{3}\right)$ puis multiplier par 2 pour rester dans l'octave : $\frac{4}{3} = \frac{2}{3} \times 2$. Cette opération peut donc être vue comme une quinte *descendante* $\left(\text{on divise par } \frac{3}{2}\right)$, par opposition avec celle qu'on a utilisée jusque-là $\left(\text{multiplier par } \frac{3}{2}\right)$, qu'on peut appeler une quinte *ascendante*.

+ *Complément :* mode majeur

Il semble qu'historiquement la gamme de Pythagore était plutôt construite à partir de la note Do, en appliquant 5 quintes ascendantes pour obtenir les notes Sol, Ré, La, Mi, Si et 1 quinte descendante (ou 1 quarte) pour obtenir la note Fa. Cette construction (qui donne les mêmes notes que celles que nous avons utilisées en appliquant des quintes uniquement ascendantes à partir de Fa) est connue sous le nom de *mode majeur*. Elle donne la gamme de Do majeur, dans laquelle la quinte fausse se trouve entre Si et Fa, ce qui fait que ces notes risquent de ne pas très bien sonner ensemble (tandis que si on appliquait 6 quintes ascendantes à partir de Do, elle se trouverait entre Fa et Do).

3. La gamme tempérée

RÉSUMÉ :

Les intervalles entre deux notes consécutives des gammes dites de Pythagore ne sont pas égaux, ce qui entrave la transposition. La connaissance des nombres irrationnels a permis, au XVIIe siècle, de construire des gammes à intervalles égaux.
Savoir-faire : - Utiliser la racine douzième de 2 pour partager l'octave en douze intervalles égaux.

a. De la gamme de Pythagore à la gamme tempérée [video#06]

[cf. De la gamme de Pythagore à la gamme tempérée [vidéo]]
Transcription :
"Tiens tu vas savoir m'apporter une explication : j'ai fait jouer par un orgue un morceau que j'avais créé avec un synthétiseur, c'était massif mais ça a posé problème, à un moment l'accord sonnait faux. Ça aurait du sonner comme ça.
Si depuis un FA on monte dans les aigus de 12 quintes en multipliant la fréquence de chaque note par 3/2 la note obtenue n'est pas tout à fait un autre FA car il ne correspond pas à une ou plusieurs octaves de la note de départ. Pour que l'octave soit juste, une des quintes doit être modifiée, c'est ce qu'on appelle la quinte du loup. On obtient ainsi la gamme de Pythagore qui a servi à accorder cet orgue. Les compositeurs qui ont créé des morceaux pour les instruments accordés de cette façon évitaient d'utiliser cette quinte.
Ah ok ! Mais pourtant aujourd'hui je joue avec des musiciens pratiquant des instruments différents et tous sonnent juste ensemble ?
Oui afin de pallier à ce problème on accorde aujourd'hui en gamme tempérée c'est-à-dire qu'on a divisé l'octave en douze intervalles tous égaux. Pour y arriver, on doit multiplier la fréquence de chaque note par un nombre, la racine douzième de 2. C'est-à-dire le nombre qui donne 2 quand on le met à la puissance douze, ce qui assure qu'au bout de douze notes l'octave soit juste. On peut donc dire que c'est grâce aux mathématiques que la musique qu'on écoute aujourd'hui sonne ainsi.
Logique ! Donc je peux jouer toutes les notes de mon synthétiseur ensemble sans risquer de faire de fausses notes."

b. Les inconvénients des gammes de Pythagore

Les gammes de Pythagore sont restées très longtemps en usage et ont donné les noms de notes qu'on utilise encore aujourd'hui. Elles ont pourtant deux inconvénients majeurs :

- une des quintes est légèrement fausse, ce qui peut produire des dissonances et inciter les compositeurs à éviter d'utiliser les notes de cette quinte à proximité les unes des autres (pour ne pas faire entendre cette dissonance) ;
- les intervalles entre les notes des gammes pythagoriciennes ne sont pas tous égaux.

Lorsqu'on souhaite transposer un morceau, c'est-à-dire le jouer légèrement plus aigu ou plus grave, par exemple pour l'adapter à la tonalité d'un autre instrument que celui pour lequel il est écrit, ces différences d'intervalles posent des problèmes insolubles.

Question

Calculer les intervalles entre chaque note de la gamme de Pythagore à 7 notes et celle qui la précède (avec deux décimales) :

Si2	Do3	Ré3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Si3
247	261	294	330	348	391	440	495
	1,06						

[solution n°10 p.67]

Dans la gamme à 7 notes, il y a deux types d'intervalles :

- les uns à peu près égaux à $\frac{3^2}{2^3} = 1{,}125$
- les autres à peu près égaux à $\frac{2^8}{3^5} \approx 1{,}05$

Si on décide de multiplier la fréquence de chaque note d'un morceau par $\frac{3^2}{2^3}$, le Do va devenir Ré, le Ré devenir Mi, le Fa devenir Sol, le Sol devenir La et le La devenir Si mais le Mi ne deviendra pas un Fa ni le Si un Do et on n'aura pas dans la gamme les notes correspondant à cette transposition pour Mi et Si. Si on les remplace par Fa et Do, le résultat sonnera faux...

Complément :

Il en va de même pour la gamme de Pythagore à 12 notes : on a encore deux types d'intervalles valant approximativement $\frac{2^8}{3^5}$ et $\frac{3^7}{2^{11}} \approx 1{,}07$.

c. La racine douzième de 2

Pour remédier à cet inconvénient, les musiciens des XVIe et XVIIe siècles ont rivalisé d'imagination. Le fait que soient connus et acceptés, à cette époque, les nombres irrationnels (non égaux à un rapport entre deux nombres entiers, par exemple $\sqrt{2}$) leur a permis de proposer des gammes dans lesquelles tous les intervalles sont égaux, en particulier à partir de la gamme de Pythagore à 12 notes, dans laquelle ils sont déjà très proches. En effet on voudrait avoir l'égalité des rapports :

$$\frac{f_1}{f} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} = \frac{f_4}{f_3} = \frac{f_5}{f_4} = \frac{f_6}{f_5} = \frac{f_7}{f_6} = \frac{f_8}{f_7} = \frac{f_9}{f_8} = \frac{f_{10}}{f_9} = \frac{f_{11}}{f_{10}} = \frac{2f}{f_{11}}$$

Si x désigne un nombre égal à ces 12 rapports, alors $x^{12} = x \cdot x \cdot x \cdots x$ (12 facteurs) doit être égal à leur produit :

$$x^{12} = \frac{f_1}{f} \times \frac{f_2}{f_1} \times \frac{f_3}{f_2} \times \cdots \times \frac{f_{11}}{f_{10}} \times \frac{2f}{f_{11}}$$

donc, en simplifiant,

$$x^{12} = \frac{2f}{f} = 2.$$

On sait qu'il existe un unique nombre réel positif satisfaisant l'égalité $x^{12} = 2$.

Définition :

L'unique nombre réel positif dont la puissance douzième vaut 2 est appelé *racine douzième de* 2 et il est noté $\sqrt[12]{2}$.

Attention :

$\sqrt[12]{2}$ est donc l'unique nombre réel positif tel que $\left(\sqrt[12]{2}\right)^{12} = 2$.

Question

Déterminer une valeur approchée de $\sqrt[12]{2}$ à l'aide de la calculatrice.

[solution n°11 p.67]

Définition :

La *gamme tempérée* à 12 notes est construite à partir du La3, de fréquence 440 Hz, en appliquant des intervalles constants de $\sqrt[12]{2}$.

Puisque tous les intervalles sont égaux, il est maintenant toujours possible et très facile de transposer un morceau. Il n'y a pas dans cette gamme de "quinte du loup" un peu dissonante, le comma pythagoricien (l'erreur due au fait que le cycle des quintes ne se referme jamais exactement) est réparti uniformément dans tous les intervalles et devient ainsi imperceptible.

Question

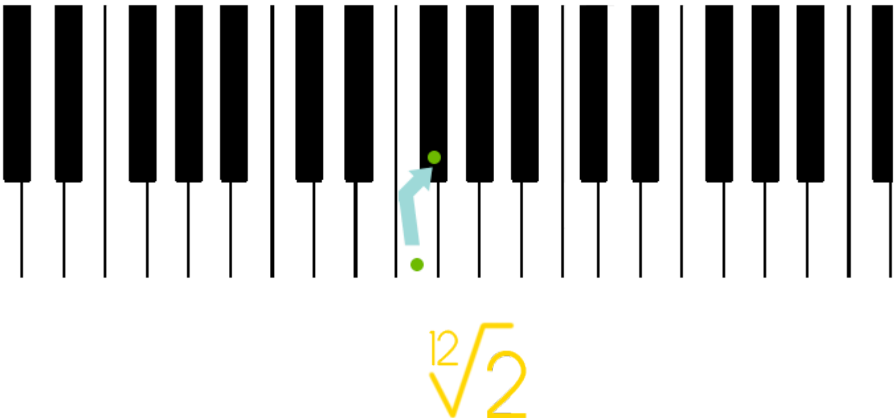
À l'aide de la valeur approchée de $\sqrt[12]{2}$, remplir le tableau des fréquences de la gamme tempérée à 12 notes (même si elles sont un peu modifiées, on garde le même nom pour les notes) en partant du La3 (fréquence 440 Hz) :

Do	Do#	Ré	Ré#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si
									440		

Vérifier pour terminer que l'intervalle entre le double de la fréquence trouvée pour Do et celle de Si est encore égal à $\sqrt[12]{2}$.

[solution n°12 p.67]

Les pianos sont accordés selon la gamme tempérée ; les touches blanches correspondent aux 7 notes provenant de la gamme à 7 notes (Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, Si), les touches noires correspondent aux 5 notes diésées (Do#, Ré#, Fa#, Sol#, La#) qui la complètent pour former la gamme à 12 notes, avec les fréquences calculées comme ci-dessus dans les deux cas.



Gamme tempérée [ill.]

Complément :

> On trouvera des valeurs plus précises des fréquences des notes de la gamme tempérée par exemple sur la page https://fr.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9quences_des_touches_du_piano

IV. Le son, une information à coder

RÉSUMÉ :

Le son, vibration de l'air, peut être enregistré sur un support informatique. Les techniques numériques ont mis en évidence un nouveau type de relations entre les sciences et les sons, le processus de numérisation dérivant lui-même de théories mathématiques et informatiques.
VIDÉOS INCLUSES : "07 - SIGNAL ANALOGIQUE ET SIGNAL NUMÉRIQUE", "08 - QUALITÉ AUDIO ET COMPRESSION".

1. Numérisation : échantillonnage et quantification

RÉSUMÉ :

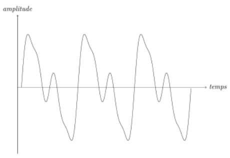
Pour numériser un son, on procède à la discrétisation du signal analogique sonore (échantillonnage et quantification). Plus la fréquence d'échantillonnage est élevée et la quantification est fine, plus la numérisation est fidèle, mais plus la taille du fichier audio est grande. La reproduction fidèle du signal analogique nécessite une fréquence d'échantillonnage au moins double de celle du son.
Savoir-faire : - Justifier le choix des paramètres de numérisation d'un son. - Estimer la taille d'un fichier audio.

a. Signal analogique et signal numérique [video#07]

[cf. Signal analogique et signal numérique [vidéo]]
Transcription :
"Mon morceau est fini ! Je vais pouvoir l'enregistrer sur mon ordinateur. Comme je vous l'ai dit mon synthétiseur est analogique mais l'ordinateur est numérique, ça va changer des choses.
Un signal analogique est un ensemble continu d'informations, on peut le représenter par une courbe. Une courbe est constituée d'une infinité de points. Pour que la musique soit numérisée sur un ordinateur il faut transformer le signal en un ensemble discontinu qu'on appelle aussi discret et qu'on peut représenter par un ensemble fini de points ; figure nous laissant imaginer la forme de la courbe initiale. La numérisation consiste donc à discrétiser des données continues, c'est-à-dire les transformer en un ensemble discontinu. Cela engendre systématiquement une perte d'information plus ou moins importante selon le nombre de points choisis.
Selon que l'on souhaite que le son soit de qualité comme sur un CD ♫ ou qu'il ne mobilise pas beaucoup d'espace comme en streaming sur un téléphone ♫, la quantification ne sera pas la même.
Pour ma musique, je vais essayer que cette perte d'informations ne gâche pas le son. Sur ce disque vinyle, la musique est en analogique, sur ce Compact Disque, elle est en numérique. Ça change mes sensations quand le les écoute notamment dans le corps, surtout quand le volume est fort, c'est sûrement pour ça que certains dj continuent d'utiliser des vinyles en soirée. Allez j'enregistre."

b. Discrétisation d'un signal

On rappelle qu'un son est une vibration de l'air que l'on peut transformer, grâce à un microphone, en un signal périodique représentant la tension électrique mesurée en fonction du temps. Ce signal périodique peut être sinusoïdal (son pur) ou non (son composé).
Prenons par exemple un signal périodique composé de plusieurs signaux sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence du son :



Ce graphe, bien que périodique, contient une infinité de points : à chaque instant (en nombre infini dans tout intervalle de temps) est associée une amplitude (dont la valeur appartient à un intervalle lui aussi infini). Il s'agit d'un signal continu. Il ne peut être stocké intégralement dans un ordinateur (il peut l'être par des moyens analogiques : enregistrement sur bande magnétique, gravure de disque vinyle,...), l'ordinateur ne contient en effet l'information que sous forme numérique, c'est-à-dire sous forme de nombres (!) choisis en nombre fini dans un ensemble fini.

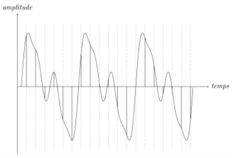
La discrétisation consiste à transformer le signal sonore constitué d'une infinité de points en une quantité finie de nombres pris dans un ensemble fini de nombres. Elle utilise deux procédés complémentaires (et similaires) : l'échantillonnage et la quantification.

c. Échantillonnage et quantification : définition et exemple

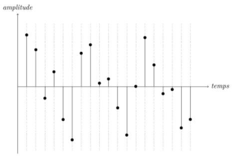
Définition :

L'*échantillonnage* est la sélection d'un échantillon d'instants régulièrement espacés pour lesquels on mesure l'amplitude du signal sonore.

Sur notre exemple sélectionnons des instants régulièrement espacés sur l'axe horizontal (des abscisses) :



Nous ne gardons que les points de la courbe dont les abscisses ont été sélectionnées, ce qui nous ramène à un nombre fini de valeurs du signal :

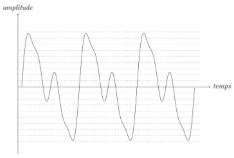


Ces valeurs se trouvent *a priori* dans un ensemble infini de valeurs possibles, que nous allons maintenant restreindre à un ensemble fini.

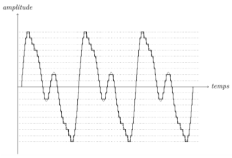
Définition :

La *quantification* consiste à sélectionner un ensemble fini de valeurs possibles pour l'amplitude du signal.

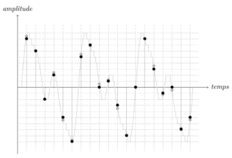
Sur le même exemple, sélectionnons un nombre fini de valeurs possibles sur l'axe vertical (des ordonnées), régulièrement espacées elles aussi :



On approxime chaque point de la courbe par le point de même abscisse dont l'ordonnée est la valeur possible sélectionnée la plus proche, ce qui nous donne une courbe « en escalier » :



Tous les points de la courbe en escalier ont leur ordonnée dans l'ensemble fini de valeurs sélectionnées.
En combinant les deux opérations, on atteint l'objectif qui est de représenter le signal par un nombre fini de points (en noir sur le graphique), dont les abscisses sont régulièrement espacées sur l'axe horizontal et dont les ordonnées appartiennent à l'ensemble fini de valeurs possibles sélectionnées sur l'axe vertical :



Attention :

L'information est maintenant *discrète* (contraire de continue), elle peut être représentée par un ensemble fini de nombres, eux-mêmes choisis dans un ensemble fini fixé à l'avance. Elle peut donc être stockée dans la mémoire d'un ordinateur ou sur d'autres supports numériques (CD, DVD, clé USB,...), elle peut être traitée par des logiciels et transmise de façon rapide et sûre (par internet par exemple).

On remarque que le procédé de discrétisation qui vient d'être décrit aboutit la plupart du temps à une perte d'information (sauf dans des cas très particuliers de signaux « en escalier »). Cette perte sera d'autant plus grande que les instants choisis pour l'échantillonnage seront peu nombreux, que les valeurs retenues pour la quantification seront peu nombreuses. Nous allons étudier cela plus en détails dans la prochaine séance.

d. Échantillonnage : quelle fréquence ?

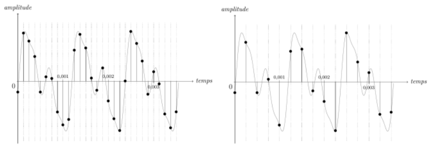
Définition :

La *fréquence d'échantillonnage* f_e est le nombre d'instants sélectionnés par seconde pour prendre la mesure de l'amplitude du signal.

Si on note T_e la durée (en secondes) entre deux instants sélectionnés, on a $f_e \times T_e = 1$ donc $f_e = \frac{1}{T_e}$.

Question

Quelle fréquence d'échantillonnage a été utilisée pour sélectionner des instants dans chacun des deux graphes ci-dessous ? L'unité de temps sur l'axe des abscisses est la seconde.



[solution n°13 p.67]

On sent bien que, si on ne prend pas suffisamment de mesures du signal par seconde, c'est-à-dire si f_e est trop petite, par exemple si f_e est inférieure à la fréquence du signal, l'information qu'on obtiendra ne rendra pas bien compte du signal reçu. La théorie de l'information développée notamment par Shannon vers le milieu du XXe siècle permet de donner un sens précis à cette intuition. Le résultat à retenir est le suivant.

Attention : Théorème de Shannon

Pour pouvoir reconstituer le signal d'origine à partir de l'échantillonnage, il faut et il suffit que la fréquence d'échantillonnage soit au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans le signal à numériser.

Question

L'oreille humaine entend les sons dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et $20\,000$ Hz. Quelle valeur minimale doit avoir la fréquence d'échantillonnage d'un système destiné à numériser convenablement les sons que nous pouvons entendre ?

[solution n°14 p.67]

Question

La voix humaine produit des sons de fréquence comprise entre 100 et $3\,400$ Hz, quelle valeur la fréquence d'échantillonnage d'un système téléphonique doit-elle avoir au minimum pour une transmission convenable ?

[solution n°15 p.68]

Exemple :

En pratique, on utilise souvent des fréquences d'échantillonnage légèrement plus grandes que le double de la fréquence maximale du signal :

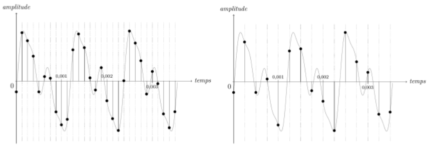
Support	**fréquence d'échantillonnage**
CD audio	$44,1$ kHz

DVD	48 kHz
Téléphone	8 kHz
Radio numérique	$22{,}5$ kHz

?

Question

L'échantillonnage présenté dans les deux graphes ci-dessous permet-il de numériser convenablement le signal ?



[solution n° 16 p.68]

Le théorème de Shannon donne une indication claire de la fréquence d'échantillonnage à utiliser : au moins le double de la fréquence maximale contenue dans le signal reçu. En pratique il faudra décider, comme dans le cas du téléphone ou du CD audio, de négliger les fréquences les plus hautes à partir d'un certain seuil (en particulier les fréquences inaudibles), en fonction de l'usage (numérisation fidèle de la voix ou d'une musique), de façon à ne pas stocker des valeurs d'échantillon inutiles. Chaque valeur à stocker prend en effet de la place en mémoire, comme on va le voir dans l'activité suivante.

e. Quantification : sur combien de bits ?

Dans les ordinateurs, l'élément de base de la mémoire est un circuit électronique à deux états, codés par les chiffres 0 et 1. Les ordinateurs contiennent un très grand nombre de tels circuits, dont les états sont souvent regroupés par paquets de 8.

i

Définition :

Un *bit* (abréviation de **bi**nary digi**t**) est l'un des deux chiffres 0 ou 1. Un *octet* est une suite de 8 bits.

?

Question

$00000000, 00000001, 00000010, 00000011$, ..., 11111111 sont quelques octets parmi tous les octets possibles. Combien y en a-t-il au total ?

[solution n° 17 p.68]

Exemple :

Il n'y a que $2 = 2^1$ nombres à 1 bit : $0, 1$
il y a $4 = 2^2$ nombres à 2 bits : $00, 01, 10, 11$
il y a $8 = 2^3$ nombres à 3 bits : $000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111$

!

Attention :

Pour tout entier naturel n, on peut écrire 2^n nombres avec n bits.

?

Question

Lorsqu'on écrit les nombres en base 10, combien y a-t-il de nombres à n chiffres ?

[solution n° 18 p.68]

+

Complément :

L'écriture en *binaire* (ou *en base* 2) consiste à écrire les nombres entiers uniquement avec des 0 et des 1, selon une règle précise que l'on montre sur un exemple, l'entier 2020 :

- la plus grande puissance de 2 inférieure ou égale à 2020 est $1024 = 2^{10}$ et $2020 = 1024 + 996$;
- la plus grande puissance de 2 inférieure ou égale à 996 est $512 = 2^9$ et $996 = 512 + 484$;
- la plus grande puissance de 2 inférieure ou égale à 484 est $256 = 2^8$ et $484 = 256 + 228$;
- la plus grande puissance de 2 inférieure ou égale à 228 est $128 = 2^7$ et $228 = 128 + 100$;
- la plus grande puissance de 2 inférieure ou égale à 100 est $64 = 2^6$ et $100 = 64 + 36$;
- la plus grande puissance de 2 inférieure ou égale à 36 est $32 = 2^5$ et $36 = 32 + 4$;

Comme $4 = 2^2$, on a maintenant la décomposition de 2020 en somme de puissances de 2 :
$2020 = 2^{10} + 2^9 + 2^8 + 2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^2$
Il faudra $11 = 10 + 1$ bits pour écrire 2020 en base 2 : de droite à gauche et pour $1 \leq n \leq 11$, on met le bit 1 en position n si 2^{n-1} apparaît dans la décomposition ci-dessus, 0 sinon. L'écriture de 2020 en base 2 est :
11111100100
Remarque : le procédé est similaire à celui utilisé en base 10, à la différence près qu'on a alors besoin de 10 chiffres : $2020 = 2 \times 10^3 + 0 \times 10^2 + 2 \times 10^1 + 0 \times 10^0$.

La quantification consiste à choisir le nombre de bits avec lesquels on mémorisera les valeurs échantillonnées du signal.

Méthode :

Pour quantifier un signal, on fixe le nombre n de bits sur lesquels on veut encoder les valeurs du signal puis on divise l'amplitude maximale du signal en 2^n intervalles de même taille, autant que le nombre de valeurs qu'on peut écrire sur n bits.

?

Question

La voix est encodée sur 8 bits par le téléphone tandis que la musique est encodée sur 16 bits sur les CD audio. Combien y a-t-il de valeurs possibles pour l'amplitude du signal dans chacun des deux cas ?

[solution n°19 p.68]

Le résultat est d'autant plus fidèle au signal reçu que le nombre de bits fixé pour la quantification est grand. En contrepartie, augmenter le nombre de bits augmente également la place nécessaire pour stocker l'information.

f. Taille des fichiers produits par la numérisation du son

?

Question

On a vu que le téléphone encode la voix sur 8 bits avec une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz. Le CD audio encode la musique sur 16 bits avec une fréquence d'échantillonnage de $44{,}1$ kHz ; de plus dans le cas du CD il s'agit en général d'enregistrement stéréo (c'est-à-dire que deux signaux musicaux sont enregistrés en parallèle). Combien de bits chacun des deux systèmes utilise-t-il à chaque seconde ? Combien d'octets ?

[solution n°20 p.68]

L'unité de mémoire la plus utilisée est l'octet avec ses multiples :

- 1 ko (« kilo octet ») vaut $1\ 000 = 10^3$ octets,
- 1 Mo (« méga octet ») vaut $1\ 000$ ko, soit $1\ 000\ 000 = 10^6$ octets
- 1 Go (« giga octet ») vaut $1\ 000$ Mo, soit 10^9 octets
- 1 To (« téra octet ») vaut $1\ 000$ Go, soit 10^{12} octets

?

Question

Quelle quantité de mémoire nécessite l'enregistrement stéréo d'une heure de musique au format CD audio ? On utilisera l'unité la plus appropriée pour donner le résultat.
Même question pour le son d'un film encodé au format « ac3 » sur un DVD (48 kHz et 24 bits, stéréo).

Lequel des deux encodages prend le plus de place en mémoire ? Dans quel rapport par rapport à l'autre ?

[solution n°21 p.68]

La capacité de stockage d'un CD audio standard est de 682 Mo, c'est-à-dire qu'on peut y enregistrer un peu plus d'une heure de musique avec les paramètres indiqués ci-dessus.

Méthode : Calcul de la taille d'un fichier audio

On peut résumer les calculs effectués sur les exemples dans une formule. Le nombre d'octets nécessaires au stockage de t secondes d'un signal échantillonné sur Q bits à une fréquence d'échantillonnage f_e est :

$$t \times f_e \times \frac{Q}{8}$$

La taille N du fichier audio contenant t secondes d'un son numérisé avec ces paramètres est :

$$N = n \times t \times f_e \times \frac{Q}{8}$$

où n est le nombre de voies : $n = 1$ pour un enregistrement monophonique, $n = 2$ pour un enregistrement stéréo (il y a alors deux signaux à stocker en parallèle).

Question

Un réseau informatique domestique de mauvaise qualité possède un débit binaire de 230 ko/s, c'est-à-dire qu'il peut transmettre 230 ko d'information par seconde. Le son du CD pourra-t-il être transmis sur ce réseau ? Et celui du DVD ?

[solution n°22 p.69]

Le *débit binaire*, qui mesure la quantité de données numériques transmises par unité de temps, est également souvent exprimé en bits par seconde (bit/s) et ses multiples (kbit/s, Mbit/s,...).

Question

Quel débit binaire en Mbit/s doit avoir un réseau pour transmettre correctement le son d'un CD ?

[solution n°23 p.69]

Exemple :

Quelques valeurs standard de débit binaire :

- une connexion Bluetooth : 3 Mbit/s ;
- une connexion ADSL à Internet : 13 Mbit/s ;
- un câble avec prise USB.2 : 480 Mbit/s.

2. Compression

RÉSUMÉ :

La compression consiste à diminuer la taille d'un fichier afin de faciliter son stockage et sa transmission. Les techniques de compression spécifiques au son, dites « avec perte d'information », éliminent les informations sonores auxquelles l'oreille est peu sensible.
Savoir-faire : - Calculer un taux de compression. - Comparer des caractéristiques et des qualités de fichiers audio compressés.

a. Qualité audio et compression [video#08]

[cf. Qualité audio et compression [vidéo]]

Transcription :

"Après avoir enregistré je vais appliquer plusieurs traitements de son. Cette phase s'appelle le mastering, c'est là que je vais contrôler ce qui sort à droite ou ce qui sort à gauche -la stéréo-, l'équilibre entre les basses et les aiguës -l'égalisation- ou encore la différence entre les sons les plus faibles et les sons les plus forts -la dynamique-. Le mastering dépend de la mode du moment ; par exemple aujourd'hui la tendance c'est de faire des compressions audiodynamiques pour que tous les sons soient au maximum du début à la fin du morceau, pour que ça fasse « gros son ». Mais attention la musique transformée ainsi soumet nos oreilles à des intensités dangereuses. Le mastering dépend aussi de la destination finale du morceau, il ne sera pas le même si on fait un vinyle, un cd ou si on le diffuse en mp3 sur internet.

Le mp3 inventé en 1995 dans les débuts d'internet est une manière de compresser la musique précédemment numérisée pour qu'elle prenne moins de place. A l'époque, télécharger un morceau pouvait pendre plusieurs heures donc la musique se devait d'adopter un format qui permette d'avoir des fichiers de taille réduite. Pour ce faire le mp3 élimine les informations sonores auxquelles l'appareil auditif est peu sensible. Il enlève par exemple une partie des sons très graves et très aigus puisque l'oreille les entend moins bien. Il supprime aussi certaines nuances, notamment en regroupant sur la même fréquence des sons de hauteur très proche. Cette technique de compression informatique est dite « avec perte d'information ». Heureusement on sait aujourd'hui réaliser des compression haute résolution comme pour le Flac, format numérique compressé « sans perte d'information ».

Et quand on veut que le mp3 soit le fichier le plus léger possible, la qualité baisse et moi qui ai fait la musique je suis un peu déçu que les gens l'écoutent comme ça. Je préfère que vous écoutiez ma musique en FLAC ♫ qu'en mp3 ♫. Le pire pour moi c'est que pour compenser la perte d'information du mp3, vos téléphones ou vos enceintes Bluetooth modifient les réglages pour que ça ne s'entende pas ; ce n'est donc plus moi, le musicien, qui choisit les réglages de son, ce sont nos appareils qui les imposent."

Baisser le son [carte]

b. Comment réduire la taille des fichiers audio ?

On l'a vu, un fichier audio prend une certaine place en mémoire dans l'ordinateur et nécessite un certain débit en cas de transmission avec lecture en direct (en « streaming »), un certain temps en cas de simple téléchargement. La compression consiste à diminuer la taille des fichiers audio afin de faciliter leur stockage et leur transmission, en particulier pour l'écoute de musique en direct sur internet.
Plusieurs techniques de compression existent, certaines sont sans perte, d'autres avec perte.

Définition :

Une technique de compression est *sans perte* si elle permet de récupérer, après décompression, l'intégralité de l'information obtenue par la numérisation du son.

Exemple :

Le format FLAC, en utilisant des redondances dans les fichiers audio, permet de réduire leur taille de 30% à 70% sans perte d'information.

Au contraire, les techniques de compression *avec perte* ne permettent pas de retrouver l'intégralité du signal numérisé après décompression. La technique la plus utilisée consiste à éliminer du fichier audio les sons qui sont peu audibles par l'oreille humaine :

- les sons très graves et les sons très aigus que l'oreille entend peu ;
- les sons de faible niveau sonore survenant en même temps que des sons plus forts.

On peut également regrouper des sons de fréquences proches les unes des autres en un seul son plus fort.

Exemple :

Le format mp3 utilise des techniques de compression avec perte d'information. Il peut permettre de réduire d'un facteur environ 10 la taille d'un fichier audio. Cependant, le son qu'on obtient en décompressant le fichier n'est pas identique au son initial, une partie de l'information a été perdue dans la compression.

Un bon moyen de comparer les différentes techniques de compression est de calculer le rapport entre la taille du fichier obtenu et celle du fichier d'origine, qu'on appelle le *taux de compression*.

Exemple :

Avec FLAC, le taux de compression varie entre $0{,}3$ et $0{,}7$ (le calcul sera détaillé dans l'activité suivante).
Avec mp3, le taux de compression sera de l'ordre de $0{,}1$, lorsque la taille est réduite d'un facteur 10 comme évoqué dans l'exemple ci-dessus. Nous verrons dans l'activité suivante que cela dépend du type de mp3 utilisé.

c. Taux de compression

Définition :

Le *taux de compression* est le rapport entre la taille N_c du fichier compressé et la taille N_o du fichier audio d'origine (les deux tailles étant exprimées dans la même unité) :

$$\tau = \frac{N_c}{N_o}$$

Exemple :

Reprenons l'exemple du FLAC, qui réduit la taille des fichiers de 30% à 70% :

- si la taille est réduite de 30%, cela signifie que $N_c = N_o - 0{,}3 \times N_o = (1 - 0{,}3)N_o = 0{,}7\,N_o$, donc $\tau = \frac{N_c}{N_o} = 0{,}7$: le taux de compression est de $0{,}7$;
- de même, on obtient que le taux de compression est de $0{,}3$ quand la taille est réduite de 70%.

Rappel :

Prendre 30% d'une quantité, c'est la multiplier par $0{,}3$;
réduire une quantité de 30%, c'est la multiplier par $1 - 0{,}3 = 0{,}7$.

Question

On trouve sur internet de la musique à écouter en streaming au format mp3 à 128 kbit/s, c'est-à-dire utilisant 128 kbit par seconde. On rappelle qu'un fichier audio au format CD, en stéréo sur 16 bits avec une fréquence d'échantillonnage de $44{,}1$ kHz, utilise $176{,}4$ ko par seconde. Quel est le taux de compression d'un fichier provenant d'un tel format et passant à celui du service de streaming évoqué ci-dessus ?

[solution n°24 p.69]

?

Question

D'autres taux de compression sont possibles dans le format mp3 : on peut produire des fichiers compressés à 192 kbit/s (donnant un son souvent considéré comme de bonne qualité), 256 kbit/s (très bonne qualité) ou 320 kbit/s (excellente qualité). Calculer le taux de compression d'un fichier au format CD standard (voir exercice précédent) lorsqu'on le compresse dans chacun de ces formats.

Sachant qu'une heure de musique numérisée au format CD standard nécessite environ 635 Mo, en déduire la place occupée après compression dans chacun de ces formats.

[solution n°25 p.69]

V. Entendre la musique : comment l'Homme peut-il percevoir et interpréter la musique ?

RÉSUMÉ :

L'air qui vibre n'est musique que parce que notre oreille l'entend et que notre cerveau la perçoit comme telle. Mais l'excès de sons, même s'il est musical, est une forme de perturbation de l'environnement.
VIDÉOS INCLUSES : "09 - L'OREILLE", "10 - SENSATIONS ET PERCEPTION DU SON", "11 - LES TRAUMATISMES".

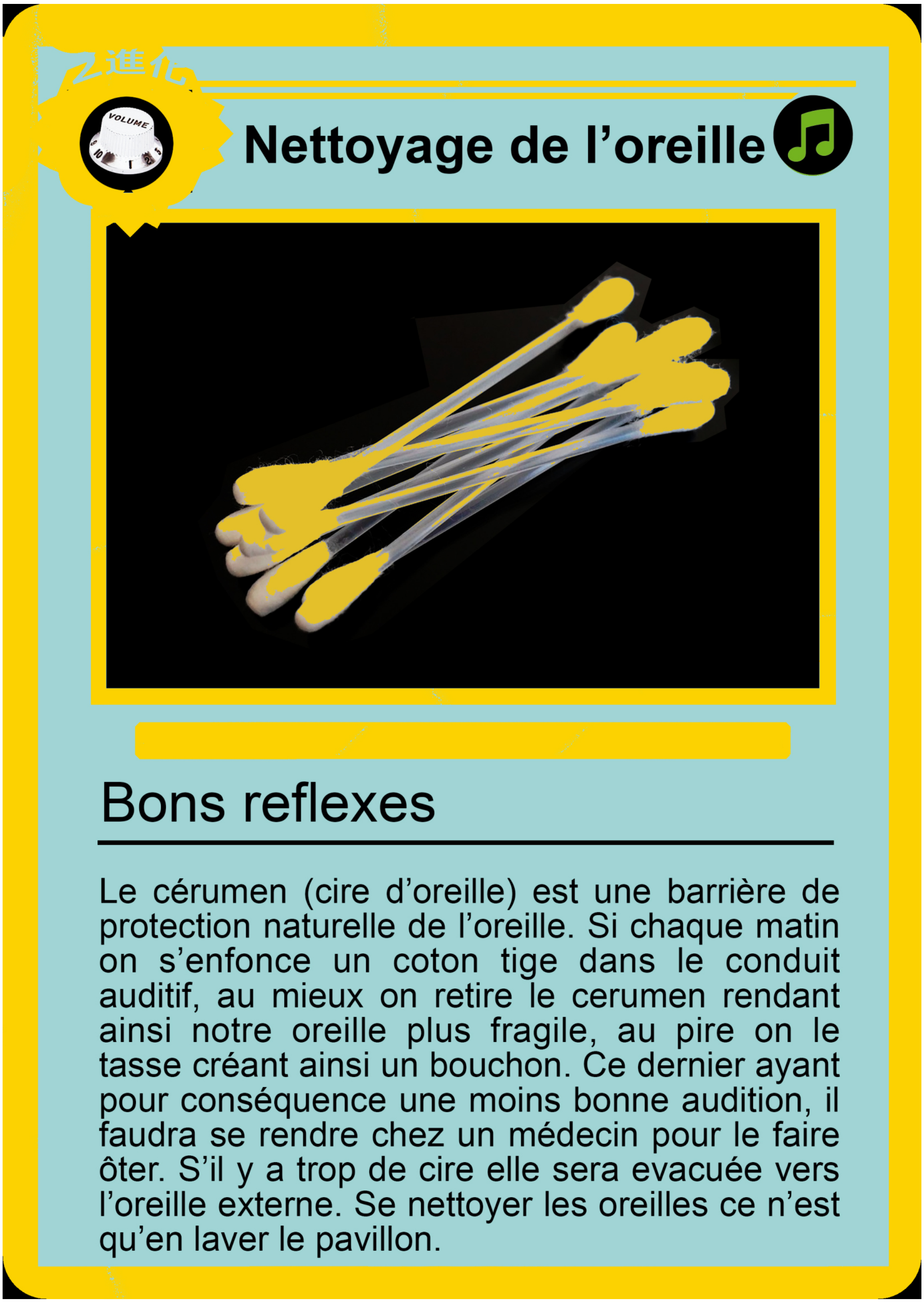
1. L'oreille : organe de l'audition

a. L'oreille [video 09]

[cf. L'oreille [vidéo]]
Transcription :
"Tu sais en plus du synthétiseur je joue aussi de la guitare électrique ça ajoute d'autres sonorités à ma musique, en fait c'est comme une guitare classique dans laquelle on a placé un micro.

Presque, en fait la vibration de la corde est transformée par le micro en signal électrique qui est transmis grâce à un câble à un amplificateur doté d'un haut-parleur qui retransformera le signal électrique en son. C'est un peu comme dans ton oreille.
Mon oreille ? Mais attends je la branche pas... elle n'est pas électrique ?

Lorsqu'un son pénètre dans ton oreille externe par le conduit auditif pour aller faire bouger ton tympan, la vibration sera amplifiée par 3 osselets de l'oreille moyenne situés juste derrière le tympan : le marteau, l'enclume et l'étrier. La vibration est ensuite transmise à la cochlée dans l'oreille interne. La cochlée est un organe en forme de coquille d'escargot rempli d'un liquide qui transmet les vibrations à des cellules surmontées de cils, comme de petits poils. Les cellules disposées à l'entrée de la cochlée sont spécialisées dans les aigus, celles qui se trouvent tout au fond sont spécialisées dans les sons graves. Ensuite ces cellules ciliées vont coder la vibration en message nerveux, des signaux électriques, qui seront transmis par le nerf auditif vers le cerveau où ils seront interprétés. La vibration est transformée en signal électrique puis interprétée, un peu comme la guitare électrique donc !
Maintenant que j'ai pigé comment ça marche je vais avancer dans mon morceau pour agiter nos cerveaux."



Nettoyer l'oreille [carte]

b. L'anatomie de l'oreille

? **Retrouvez l'organisation de notre oreille !**

Question

A l'aide du document, légender l'anatomie de l'oreille.
Document 1 : L'oreille humaine :

L'oreille externe est constituée du **pavillon** et du **conduit auditif**, alors que *l'oreille moyenne* est composée du **tympan**, fine membrane permettant en vibrant d'actionner la **chaîne des osselets**. **La trompe d'eustache** est le conduit qui rejoint la gorge et les fosses nasales.

L'oreille interne est constituée principalement par **la cochlée.** La cochlée est constituée de cellules spécialisées, les cellules ciliées, qui vont se mettre en mouvement par la vibration de la lymphe dont elle est remplie. Elle est reliée au cerveau par le **nerf auditif**.

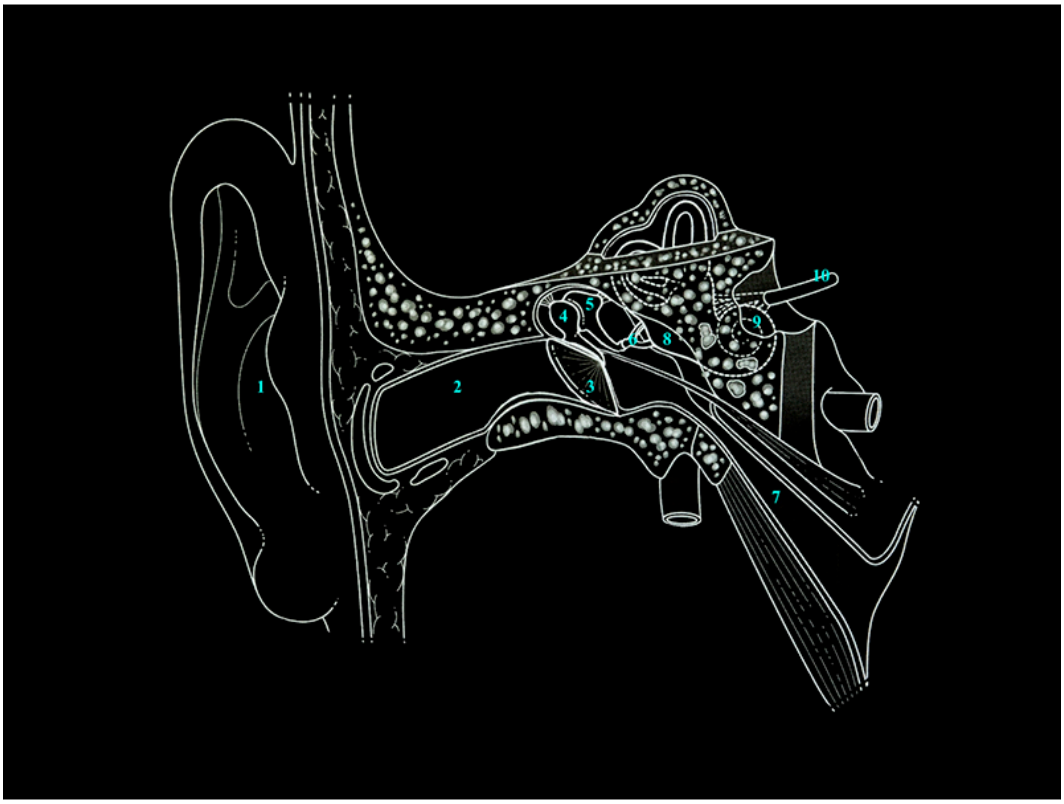


Schéma vierge de l'oreille [exercice]

Télécharger le schéma de l'oreille sans légende[p.]

[solution n°26 p.69]

À retenir

L'oreille humaine peut percevoir les sons d'un niveau sonore compris entre 0 et 120 décibels (dB) et d'une fréquence comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz.
Elle est composée de 3 parties : oreille externe, moyenne et interne.
L'oreille externe est constituée du pavillon et du conduit auditif qui canalise, et transmet les ondes sonores extérieures qui vont faire vibrer la membrane fine du tympan avec la même fréquence.
Dans l'oreille moyenne, les vibrations du tympan sont transmises à la chaîne des osselets (marteau, enclume et étrier qui sont les trois plus petits os du corps). Cette vibration en chaîne des osselets permet une amplification des ondes sonores.

Les ondes sonores sont ensuite transmises à l'oreille interne.

c. L'oreille interne : conversion des sons en messages nerveux

Organisation de l'oreille interne

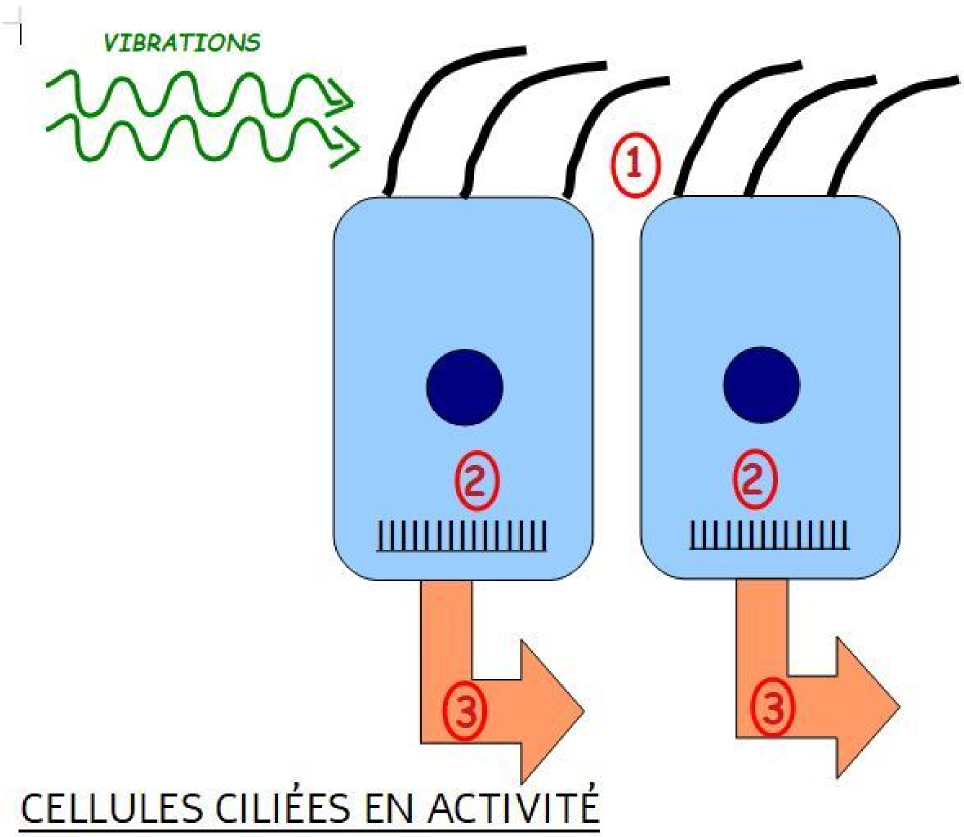
L'étrier, dernier osselet dans l'oreille moyenne, va vibrer et appuyer sur la fenêtre ovale de l'oreille interne ou cochlée. Le liquide de l'oreille interne (l'endolymphe) va donc se mettre en mouvement et déplacer les cils vibratiles des cellules ciliées de la cochlée. En fonction de la fréquence de l'onde sonore, ce ne sont pas les mêmes cellules ciliées qui sont activées.
Pour les sons aigus (fréquences hautes), ce sont les cellules ciliées les plus proches de l'entrée de la cochlée qui sont activées. Pour les sons graves (fréquences basses), ce sont les cellules ciliées les plus profondes.
Les cellules ciliées vont convertir la vibration de leurs cils en message de nature électrique c'est-à-dire en message nerveux. Ce message nerveux électrique est ensuite transmis le long de fibres nerveuses formant le nerf auditif vers le cerveau.

?

Le rôle des cellules ciliées

Question

Faire correspondre les termes suivants aux numéros du schéma : - mouvements des cils vibratoires ; - conversion du message vibratoire en message électrique ; - transmission du message nerveux vers le cerveau.

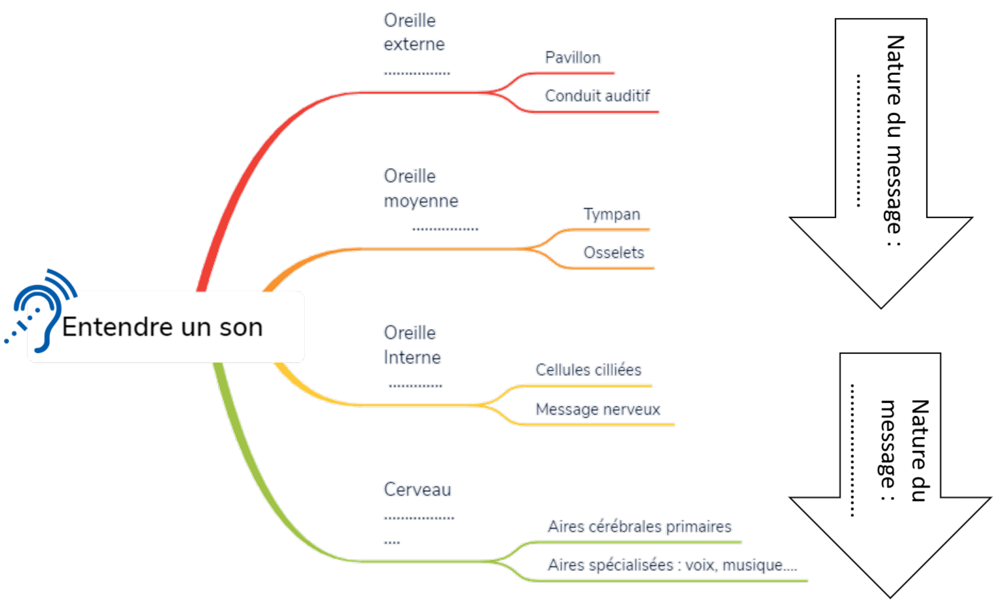


[solution n°27 p.70]

?

Question

Replacer les termes : Capter, Convertir, Interpréter le signal, Transmettre et déterminer la nature du message.



Télécharger la carte mentale à remplir [ill.][p.]

[solution n°28 p.70]

2. L'interprétation des sons par le cerveau

a. Sensations et perception du son [Vidéo#10]

[cf. Sensations et perception du son [vidéo]]

Transcription :

"Quand je fais mes morceaux il faut que je réfléchisse à ce que ça va faire aux gens. J'ai compris l'effet du niveau sonore ou des fréquences mais malgré tout quand je fais une musique certains vont adorer et d'autres vont détester, pourtant nos oreilles fonctionnent pareils alors qu'est-ce qui se passe ?

Ça se passe dans notre cerveau et même si la science a encore beaucoup à apprendre de son fonctionnement on peut déjà mesurer l'activité cérébrale en détectant les variations de l'afflux sanguin dans les différentes parties actives du cerveau: c'est l'IRM fonctionnelle. L'oreille est reliée par le nerf auditif à une zone superficielle du cerveau spécialisée dans l'audition. On parle jusque-là de sensation ; ce mécanisme est le même pour tous les êtres humains. Après quoi le message nerveux va activer des zones plus profondes pour que la mélodie soit traitée. Par exemple : elle peut paraître familière et donc rassurante si on l'a déjà entendue ; c'est une région impliquée dans la mémoire qui sera alors activée. Elle peut aussi provoquer des émotions mettant ainsi en jeu une autre région : l'amygdale cérébrale. Cette deuxième partie du parcours de la musique dans notre cerveau relève de l'interprétation et elle est différente chez chacun d'entre nous.

Ah, c'est pour ça que des mélodies peuvent beaucoup plaire à un groupe de personnes mais paraître désagréables à d'autres. Moi par exemple ma grand-mère elle adore le biniou ♫ je trouve ça agressif, pour moi ça ne sonne pas bien. A contrario j'aime bien certaines musiques extrêmes comme le métal ♫ et quand je le fais écouter à ma grand-mère, elle dit que ce n'est pas de la musique, que c'est juste du bruit. En fait le bruit, c'est de la musique qu'on n'aime pas !

Oui la perception est différente chez chacun d'entre nous notamment en fonction de notre culture et de nos expériences. Quand la musique est traitée mais qu'elle ne provoque pas d'émotion et qu'elle n'est pas familière, nous l'interprétons comme une succession de sons sans aucun sens ni organisation. Or on définit la musique comme « sons organisés » ; si notre cerveau ne détecte aucun sens ni organisation, cette musique est perçue comme un bruit. Heureusement, si nous répétons l'expérience d'écouter cette musique, elle pourra devenir familière : on peut acquérir des goûts musicaux. Chez certaines personnes, des défaillances dans ce circuit de perception les empêchent de trouver la moindre mélodie ou le moindre rythme dans un ensemble de sons : on parle alors chez ces sujets d'amusie.

D'accord, tu me dis donc que plus on écoute une musique, plus elle a de chances de nous plaire. Je vais donc répéter la même mélodie plusieurs fois dans mon morceau, ça fera un refrain. ♫"

b. Activité : perception sonore et IRM

Un cas d'étude

Élise qui jusqu'alors appréciait énormément écouter de la musique a vu son comportement changer radicalement : depuis son AVC (accident vasculaire cérébral), elle s'en désintéresse totalement (on parle d'*amusie*). Elle décide alors de consulter son médecin, en lui déclarant que même si son audition est toujours aussi bonne, la musique ne lui procure plus aucune émotion, ni joie, ni tristesse. Son médecin lui prescrit alors une IRM fonctionnelle.

Objectif

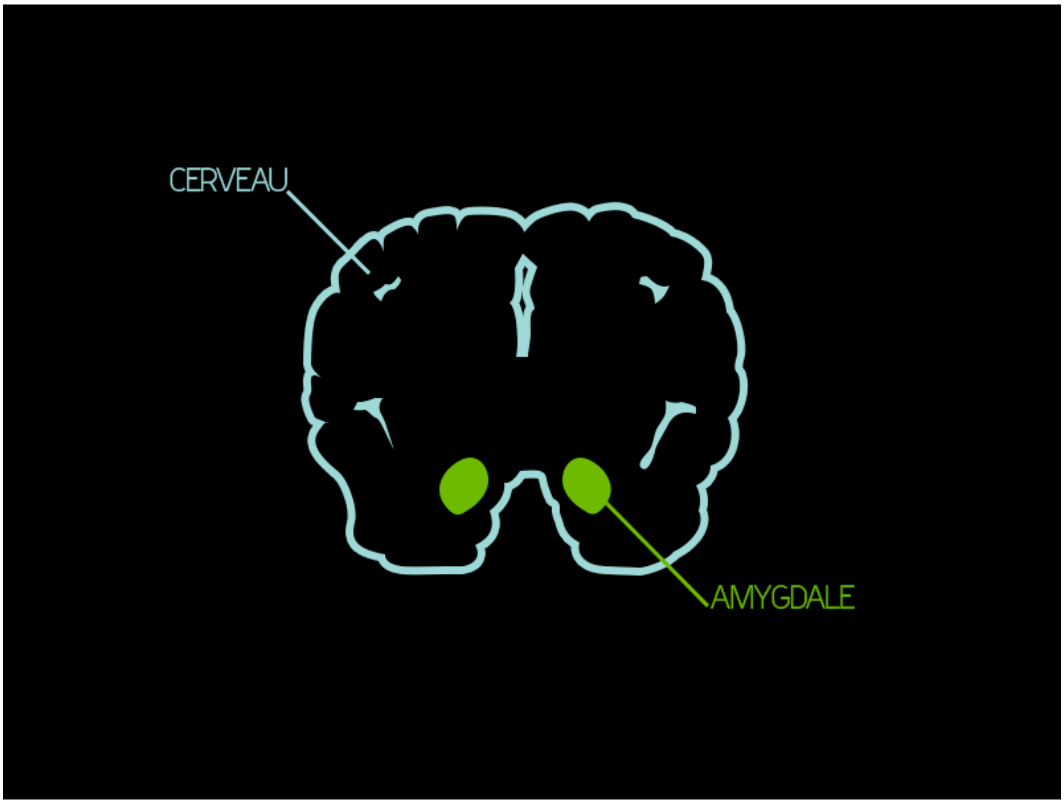
On cherche à identifier quelles zones cérébrales sont impliquées dans la perception sonore et dans son interprétation (musique angoissante, ou joyeuse, ...) pour aider Élise à comprendre son changement de comportement.

Document 1 : la différence entre une IRM anatomique et une IRM fonctionnelle

L'IRM ou imagerie par résonance magnétique est une technique d'imagerie médicale non invasive permettant de visualiser certains organes comme le cerveau.
On distingue deux types d'IRM : l'IRMa (anatomique) et l'IRMf (fonctionnel).
La première permet de visualiser uniquement les structures de l'organe étudié alors que la seconde permet de repérer l'activité de tissus biologiques. Cette technique est fondée sur le fait que l'hémoglobine (protéine qui transporte le dioxygène dans le sang) perturbe la résonance magnétique des autres atomes de son voisinage. Cette perturbation dépend de la charge de l'hémoglobine en O_2*. Quand une région du cerveau s'active, le débit de sang riche en dioxygène augmente et entraîne une modification du signal de résonance. Ainsi, on observe des tâches de couleurs vives sur une zone fortement irriguée sur une IRMf.*
On peut donc localiser les régions cérébrales en activité et déterminer leur rôle fonctionnel.

Document 2 : le rôle des amygdales dans les émotions

Les émotions que nous ressentons (peur, désir, colère...) font intervenir une zone de notre cerveau : l'amygdale. Cette structure paire (une droite et une gauche) se situe dans la région antérieure du lobe temporal du cerveau. Ses neurones sont mobilisés lors des émotions.
Lorsqu'un individu écoute une musique joyeuse, on peut observer sur un IRMf une activation des amygdales.



Document 3 : compte-rendu de l'IRM anatomique d'Élise

On observe une lésion bilatérale (= de chaque côté) des amygdales droite et gauche chez Élise. Il n'est pas possible de l'afficher en 3D dans le logiciel Eduanatomist2.

Ressource

Simulateur d'IRM à l'adresse https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/IRMvirtuelle/ (lire le protocole d'utilisation)

?

Question

Réaliser un compte rendu où il faudra :

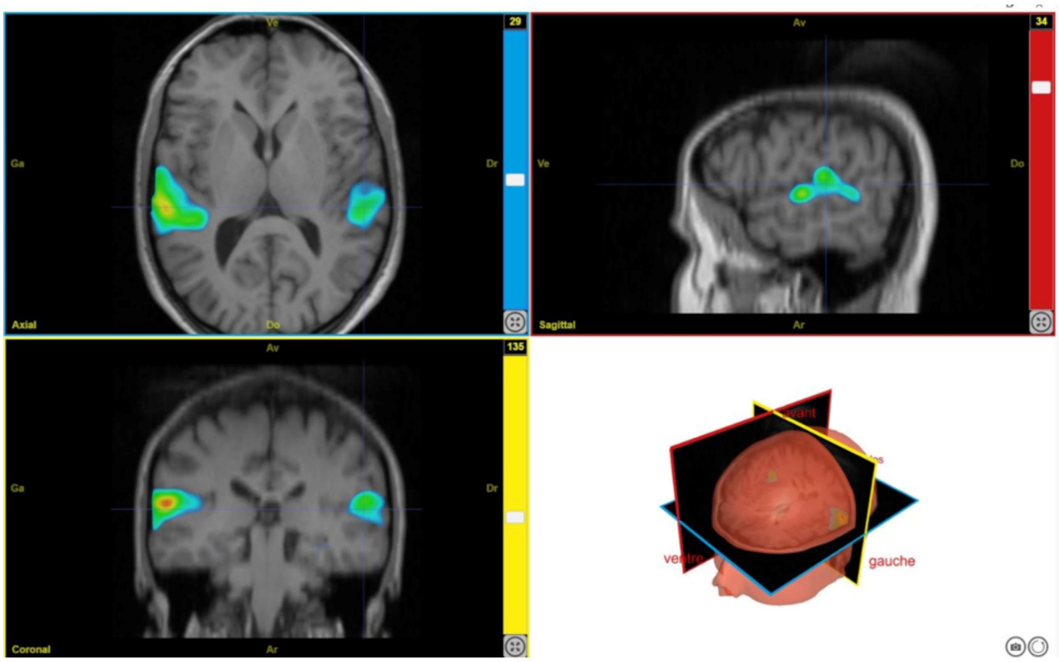
1. Identifier, à l'aide du document 3 ou du simulateur d'IRM (et de son protocole d'utilisation), les aires auditives cérébrales.
2. Expliquer à Élise pourquoi depuis son AVC elle souffre d'amusie.

[solution n°29 p.70]

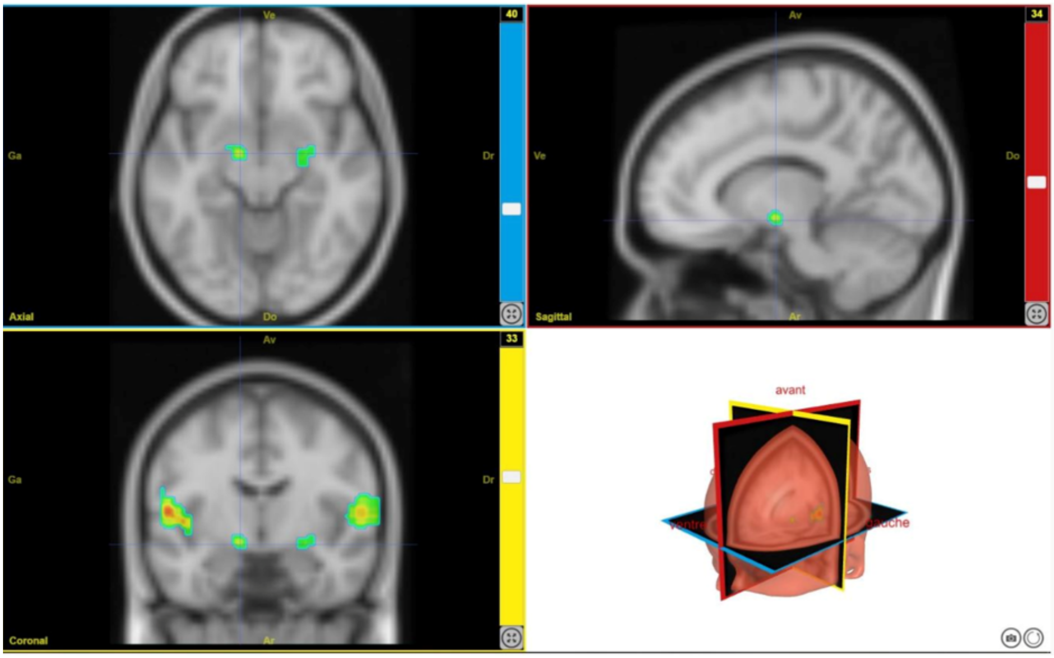
\+

Complément : Images complémentaires au document 3

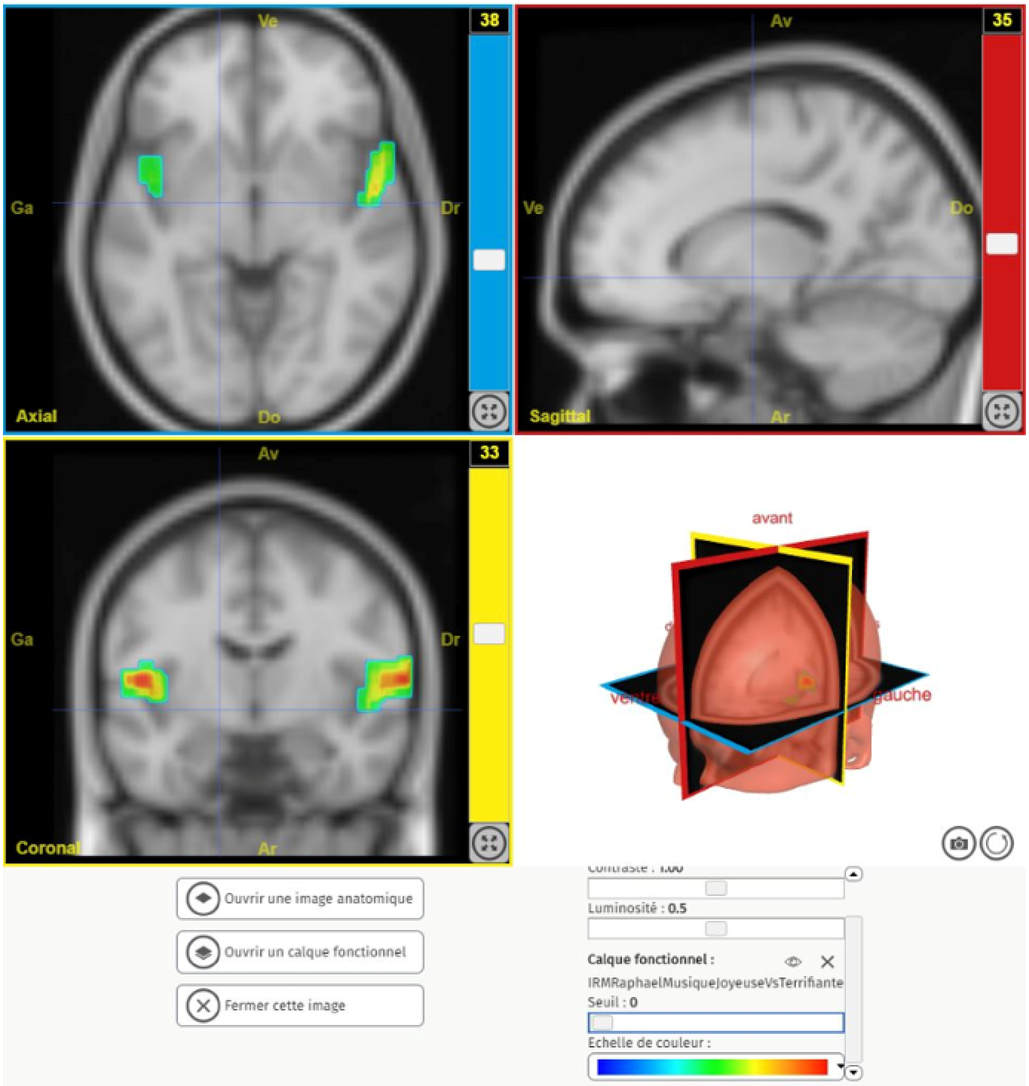
L'IRMf d'un patient sain écoutant d'un son neutre :



L'IRMf d'un sujet sain écoutant de la musique joyeuse alternée à de la musique terrifiante :

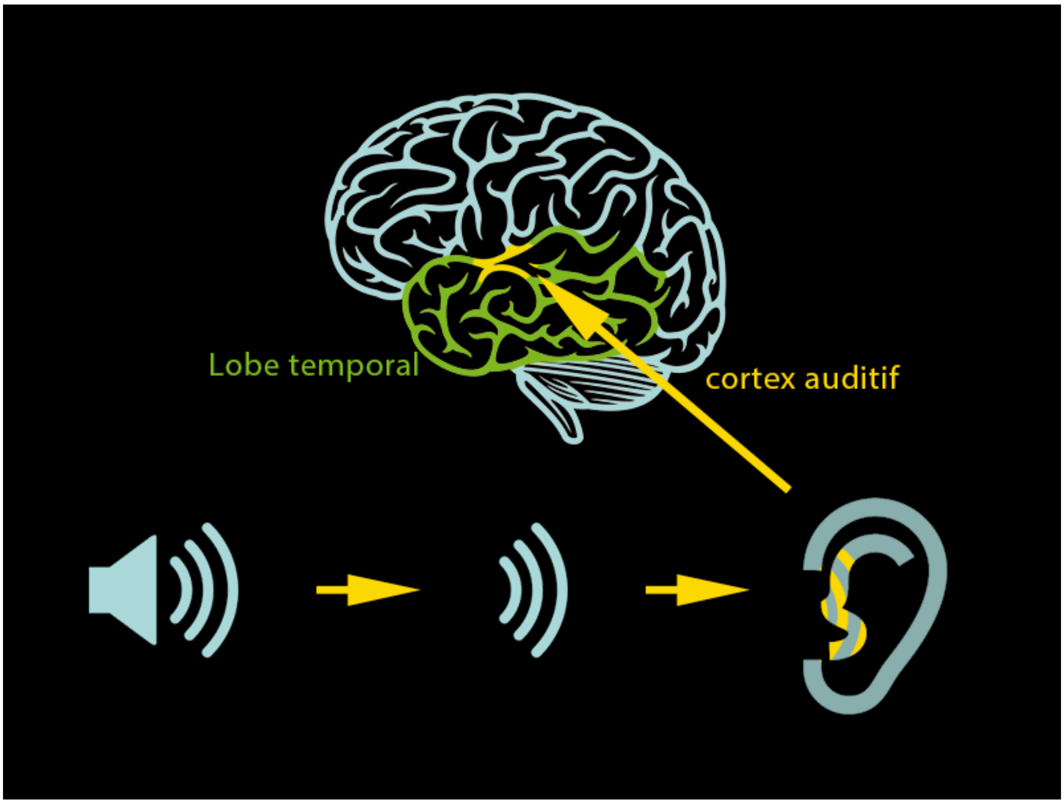


L'IRMf d'Élise écoutant de la musique joyeuse alternée à de la musique terrifiante :



c. À retenir

Les messages nerveux issus des cellules ciliées sont acheminés vers les aires auditives du cortex cérébral.
Ces aires auditives sont localisées dans les lobes temporaux (droit et gauche) du cerveau et elles s'activent lorsque l'on entend un son.
Les aires auditives primaire et secondaire permettent de percevoir puis d'identifier, et de caractériser un son. Lors de la perception d'une musique, des émotions sont suscitées et d'autres zones du cerveau s'activent également comme l'amygdale par exemple.



Parcours du son dans le cerveau [ill.]

3. Fragilité de l'oreille

a. Les traumatismes [video#11]

[cf. Les traumatismes [vidéo]]
Transcription :
"Être musicien quand c'est un travail à temps plein, ça veut dire faire de la musique 15 à 20h par semaine en plus des concerts. Parfois après les répétitions je dois t'avouer que j'ai l'impression de moins bien entendre, d'avoir du coton dans les oreilles. ♫
C'est une perte d'audition, ça veut dire que les cellules ciliées de ton oreille sont abîmées ou détruites par trop de vibrations. Ces pertes peuvent être temporaires, c'est-à-dire qu'après du repos elles vont se remettre, ou définitives si on répète trop souvent ces situations à risque. Après l'âge de six ans, notre corps ne fabrique plus ces cellules ; la destruction de l'une d'elle est donc irréversible, elle ne se régénérera jamais. Les cellules qui sont spécialisées dans les aigus sont plus fragiles, c'est donc ces sons que l'on n'entend plus quand notre oreille est usée par le temps ou par une trop forte exposition.
Mhmmm... ce n'est quand même pas super rassurant ce que tu m'évoques. L'autre fois, en festival, j'ai assisté à des concerts qui s'enchaînaient toute la soirée. Quand je me suis couché, j'avais un sifflement dans l'oreille. ♫
C'est ce qu'on appelle un acouphène. Quand une cellule ciliée est abîmée ou détruite, elle n'envoie plus aucune information au cerveau. Habitué à recevoir le signal de cette cellule, le cerveau est comme en manque de stimulation et pour compenser ce manque il va recréer artificiellement cette sensation. Bien sûr personne n'est à côté de toi pour te siffler dans l'oreille, le bruit n'existe pas, il s'agit d'un son fantôme. Si la cellule n'est qu'abîmée, en général après une bonne nuit de sommeil dans le calme

l'acouphène disparaît. Si après 12h il est encore présent allez consulter d'urgence. Il existe des traitements mais qui ne fonctionnent que si on les prend 48h maximum après l'apparition de l'acouphène.

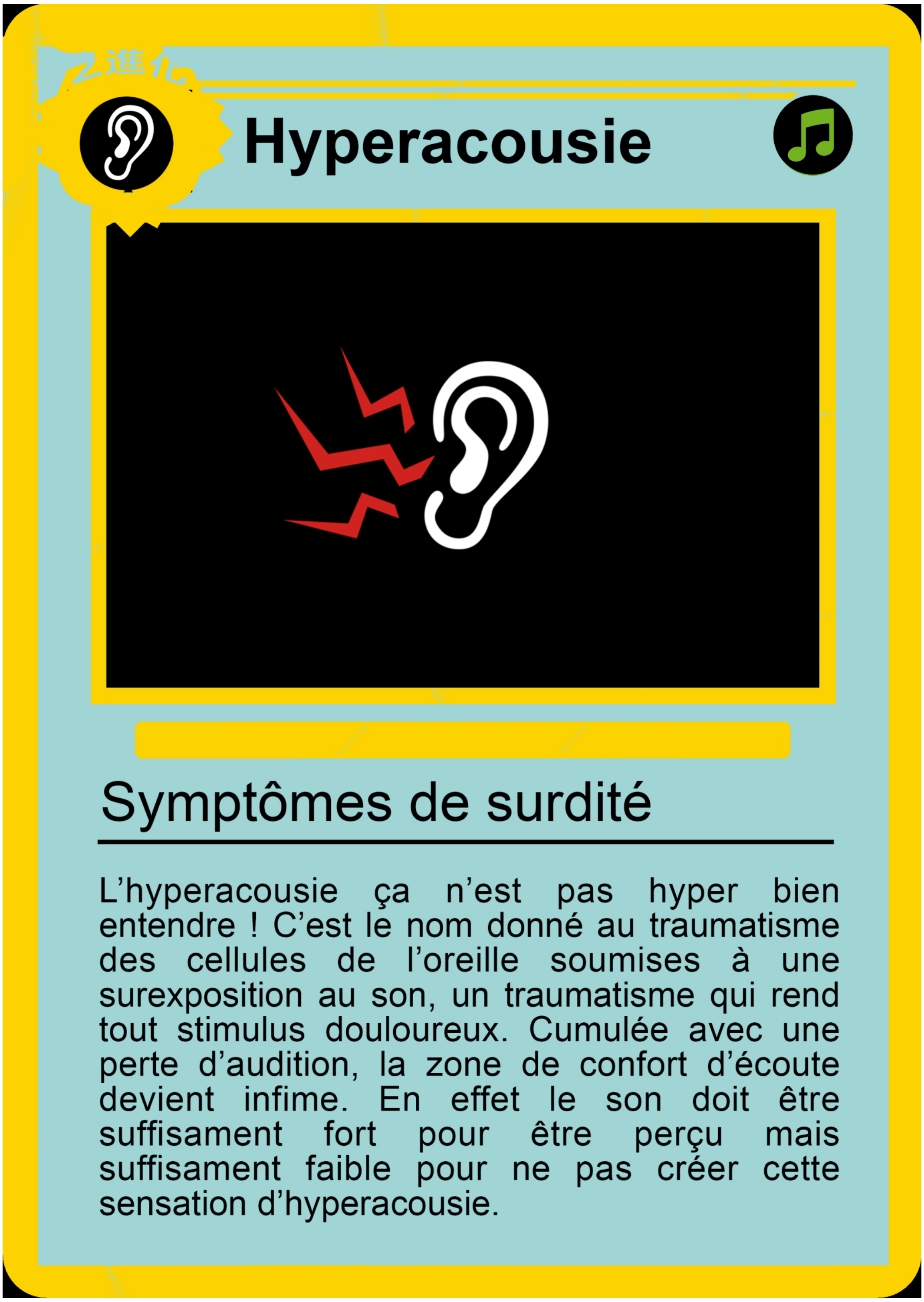
Pour aller plus loin, tu sais après un mois de travail intense en studio, tous les soirs quand je rentre chez moi je n'arrive même plus à écouter de la musique. Le moindre son un peu fort m'agresse les oreilles, ça devient douloureux. ♫

L'hyperacousie ça n'est pas hyper mieux entendre, c'est quand les sons deviennent douloureux pour notre oreille. Quand les cellules deviennent trop sensibles parce qu'on les a trop sollicitées, cela crée un traumatisme et donne cette sensation. Se sentir agressé au moindre son est un réel handicap dans une société où l'oreille est sans cesse sollicitée, les gens qui en souffrent ont tendance à s'isoler. Pour éviter que cela arrive, en concert ou en discothèque, pensez aux bouchons.

Bon, tu sais avec ce que tu viens de me dire, je vais baisser le son avant que ces symptômes deviennent définitifs chez moi !"

b. Les traumatismes [cartes]

Acouphène [carte]



Hyperacousie [carte]

Perte d'audition [carte]

Faire des pauses [carte]

Protections [carte]

c. Son et cellules ciliées

? **Destruction cellules ciliées : une expérience sur des rats**

Question

Des rats ont été exposés à des bruits semblables à des expositions d'intensité croissante. Chez l'être humain, lorsque les cellules ciliées sont endommagées, elles ne peuvent être ni réparées ni remplacées. Ces dégâts sont irréversibles.
Document : Effet des ondes sonores de forte intensité sur les cellules ciliées de rats :

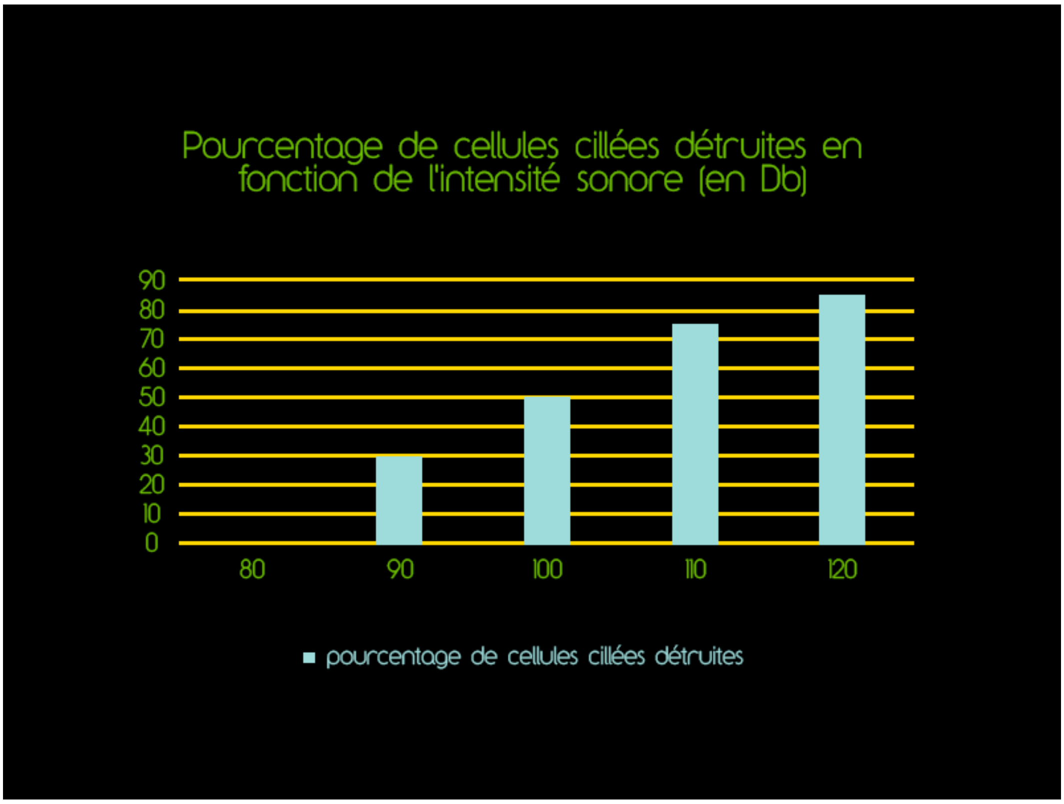


Diagramme montrant la destruction des cellules en fonction du niveau d'intensité sonore

Consignes : Montrer que l'intensité sonore peut endommager les cellules ciliées.

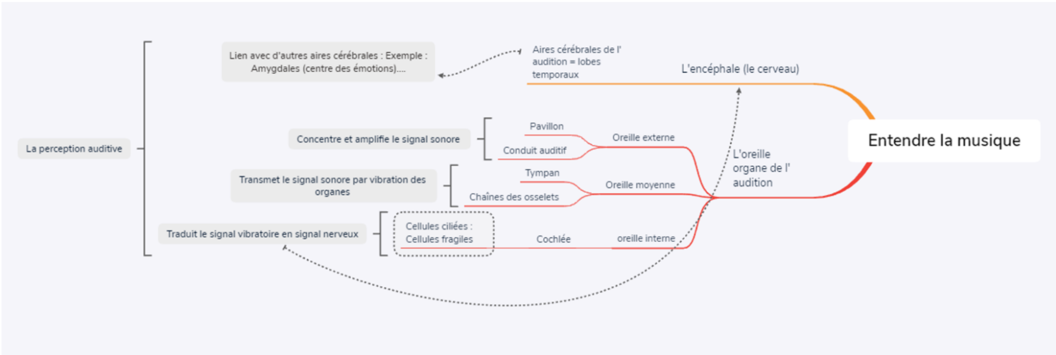
[solution n°30 p.70]

À retenir

Les cils vibratiles des cellules ciliées sont fragiles et facilement endommagés par l'exposition à des sons trop intenses (à partir de 85 dB, alors que le seuil de la douleur est à 120 dB), si elle est prolongée ou répétée fréquemment : concerts trop près des enceintes, musique dans les écouteurs trop forte... Ces cellules spécialisées n'ont pas la capacité de se régénérer. Ces dégâts sont irréversibles et peuvent engendrer une surdité précoce.

4. Synthèse

a. Carte mentale

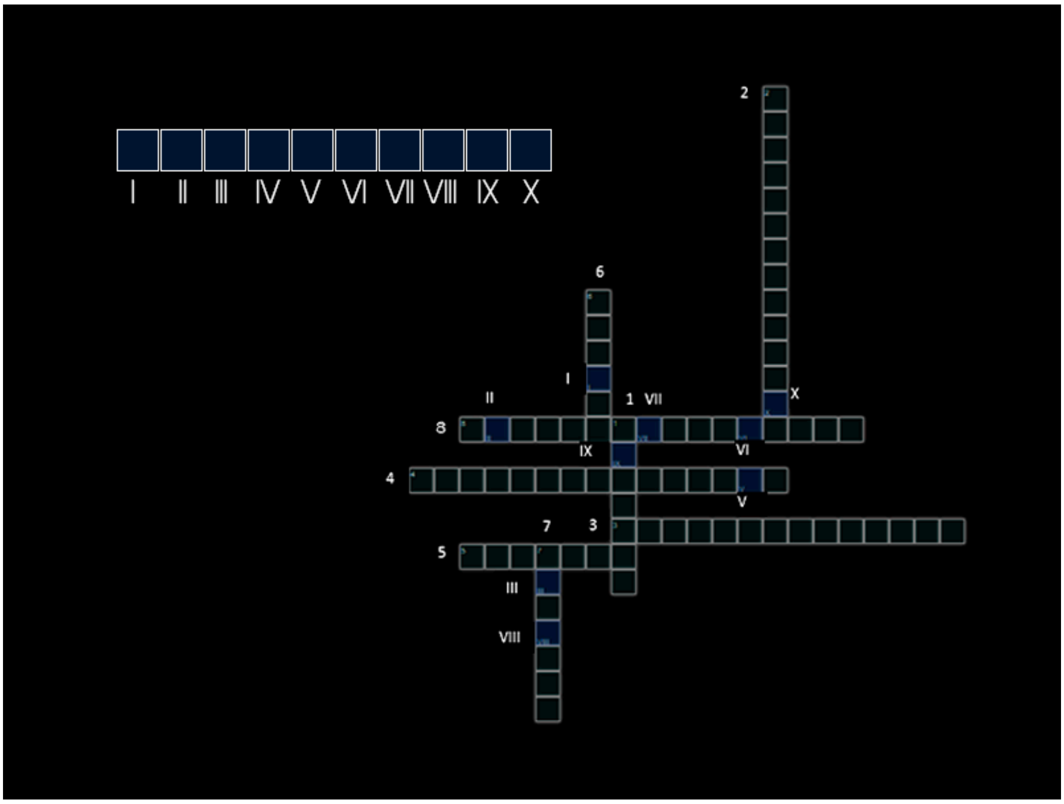


Télécharger la carte mentale bilan[p.]

?

Révision

Question



Mot fléché vierge [exercice]

Compléter le mot fléché et découvrir le mot mystère. Attention l' espace entre deux mots ne doit pas être pris en compte .

Définitions :

1 Organe de l'oreille interne constitué de cellules spécialisées

2 Ensemble d'organes permettant de canaliser les sons

3 Zones où se situent les aires cérébrales dédiées à l'audition
4 Cellules spécialisées permettant de transformer les vibrations sonores en messages nerveux
5 Trouble entraîné par l'altération irréversible des cellules de l'oreille interne
6 Fine membrane située dans l'oreille moyenne qui vibre
7 Unité de l'intensité du niveau sonore
8 Imagerie médicale permettant la visualisation des zones actives du cerveau

Télécharger le mot fléché vierge[p.]

[solution n°31 p.70]

SOLUTIONS

Solution n°1

Exercice p. 15

La courbe noire en trait plein a la plus grande période, donc la plus basse fréquence : c'est la fondamentale.
La courbe en traitillés (- - -) a une période moitié de celle de la courbe noire ; sa fréquence est donc le double de la fondamentale et le rapport des fréquences vaut 2.
La courbe en pointillés (. . .) a une période qui vaut le quart de celle de la courbe noire ; sa fréquence est donc le quadruple de la fondamentale et le rapport des fréquences vaut 4.

Solution n°2

Exercice p. 22

Notons I_1 l'intensité sonore initiale et $L_1 = 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$ son niveau d'intensité. L'intensité du son double en même temps que sa puissance donc le niveau d'intensité L_2 après avoir doublé la puissance du son est :

$$L_2 = 10 \log\left(\frac{2I_1}{I_0}\right) = 10 \log\left(2 \times \frac{I_1}{I_0}\right) = 10 \log(2) + 10 \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 10 \log(2) + L_1$$

Or $log(2) \approx 0.30103$ (à 10^{-5} près) donc $10 \log(2) \approx 3$ (au centième près), donc on a bien $L_2 \approx 3 + L_1$.

Solution n°3

Exercice p. 29

Si $\frac{f_2}{f_1} \geq 1$ alors $f_2 \geq f_1$ c'est-à-dire que la fréquence *augmente* en passant du 1er son au 2e, d'où la dénomination d'intervalle *ascendant*. C'est le contraire dans l'autre cas.

Solution n°4

Exercice p. 29

Note	Fréquence (Hz)	Différence (avec La2)	Rapport (avec La2)
La2	220	0	1
La3	440	220	2
La4	880	660	4

Solution n°5

Exercice p. 30

L'intervalle perçu par l'oreille humaine est le rapport $\frac{20\,000}{20} = 1\,000.$

Solution n°6

Exercice p. 30

L'oreille humaine entend les sons dont les fréquences sont comprises entre 20 Hz et 20 000 Hz. Si l'on fait commencer la première octave à 20 Hz, on trouve que l'oreille humaine entend des sons dans les octaves $[20, 40[$, $[40, 80[$, $[80, 160[$, $[160, 320[$, $[320, 640[$, $[640, 1280[$, $[1280, 2560[$, $[2560, 5120[$, $[5120, 10240[$ et $[10240, 20480[$, soit 10 octaves (presque complètes). On aurait pu en trouver 11 (un peu moins complètes) en commençant par l'octave $[11, 22[$.

Solution n°7

Exercice p. 32

fréquence	f	$\frac{3f}{2}$	$\frac{9f}{8}$	$\frac{27f}{16}$	$\frac{81f}{64}$	$\frac{243f}{128}$	$\frac{729f}{512}$	$\frac{2187f}{2048}$
intervalle	1	1,5	1,125	1,6875	1,265625	1,8984375	1,423828125	1,06787109375

Remarque : pour la ligne "intervalle", on a donné les expressions décimales exactes des fractions $\frac{81}{64}$, $\frac{243}{128}$, $\frac{729}{512}$ et $\frac{2187}{2048}$, déterminées par le procédé ci-dessus ; par exemple $\frac{3}{2} \times \frac{81}{64} = \frac{243}{128}$, $\frac{3}{2} \times \frac{243}{128} = \frac{729}{256}$, mais ce nombre est supérieur à 2 donc on prend sa moitié $\frac{729}{512}$, et $\frac{3}{2} \times \frac{729}{512} = \frac{2187}{1024}$, qui à nouveau est supérieur à 2 donc qu'on divise par 2.

Solution n°8

Exercice p. 33

Fa	Do	Sol	Ré	La	Mi	Si
348	522	391	587	440	661	495

Remarque : pour les calculs on est toujours reparti de la fréquence initiale (348 Hz), qu'on a multipliée par la valeur *exacte* de l'intervalle calculée dans l'activité précédente ; puis on a arrondi les résultats aux entiers les plus proches, par exemple $348 \times 1{,}125 = 391{,}5$ arrondi à 391.

Solution n°9

Exercice p. 33

La première nouvelle note est celle déjà calculée ci-dessus : $348 \times 1{,}06787109375 \approx 372$.

On trouve les quatre notes manquantes en multipliant 348 par les 4 premières fractions données dans l'énoncé et en arrondissant aux entiers les plus proches, on trouve les valeurs : $557, 418, 627$ et 470.

On remet dans l'ordre dans un tableau pour faire correspondre avec les notes diésées (en se rappelant qu'on a commencé la gamme à Fa) :

Fa#	Sol#	La#	Do#	Ré#
372	418	470	557	627

On voit qu'une fois les 5 nouvelles notes remises dans l'ordre, il n'y en a pas entre Si et Do, d'où le fait qu'il n'existe pas de Si diésé (de même pour Mi).

Le dernier intervalle donné permet de vérifier qu'on retombe presque sur la note de départ au bout des 12 quintes : $348 \times \dfrac{3^{12}}{2^{19}} \approx 353$. Le petit écart restant est le *comma pythagoricien*.

Solution n°10

Exercice p. 35

Si2	Do3	Ré3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Si3
247	261	294	330	348	391	440	495
	1,06	1,13	1,12	1,05	1,12	1,13	1,12

Solution n°11

Exercice p. 35

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

Solution n°12

Exercice p. 36

Do	Do#	Ré	Ré#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La	La#	Si
262	277	294	311	330	349	370	392	415	440	466	494

On trouve la fréquence de La# en multipliant celle de La par $\sqrt[12]{2}$, puis en arrondissant à l'entier le plus proche : $440 \times \sqrt[12]{2} \approx 466$; pour celle de Si, on peut multiplier le résultat (non arrondi) précédent par $\sqrt[12]{2}$ ou multiplier la fréquence de La par $\left(\sqrt[12]{2}\right)^2$: $440 \times \left(\sqrt[12]{2}\right)^2 \approx 494$.

Pour Sol#, on divise la fréquence du La par $\sqrt[12]{2}$: $\dfrac{440}{\sqrt[12]{2}} \approx 415$; pour Sol on divise celle de La par $\left(\sqrt[12]{2}\right)^2$, et ainsi de suite jusqu'au Do pour lequel on divise la fréquence de La par $\left(\sqrt[12]{2}\right)^9$.

Enfin $\dfrac{2 \times 262}{494} \approx 1{,}0607 \approx \sqrt[12]{2}$. Bien sûr les arrondis aux entiers les plus proches ont fait perdre en précision (la bonne valeur pour le Do à l'octave est $440 \times \left(\sqrt[12]{2}\right)^3 \approx 523$ tandis que $2 \times 262 = 524$).

Solution n°13

Exercice p. 40

Dans le premier graphe, on a sélectionné 8 instants dans chaque intervalle de $0{,}001$ seconde, donc $8\ 000$ instants par seconde, la fréquence d'échantillonnage est donc $8\ 000$ Hz, c'est-à-dire 8 kHz.

Dans le second graphe, on a sélectionné 4 instants dans chaque intervalle de $0{,}001$ seconde, deux fois moins que dans le premier ; la fréquence d'échantillonnage est donc la moitié de la précédente, c'est-à-dire 4 kHz.

Solution n°14

Exercice p. 40

D'après le théorème de Shannon, la fréquence d'échantillonnage f_e doit être au moins égale au double de la fréquence maximale du signal considéré. La fréquence maximale des sons que nous pouvons entendre est $20\,000$ Hz, donc on doit avoir $f_e \geq 2 \times 20\,000 = 40\,000$ Hz.

Solution n°15

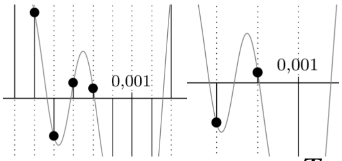
Exercice p. 40

À nouveau la valeur minimale de la fréquence d'échantillonnage cherchée est le double de la fréquence maximale du signal à transmettre, on doit donc avoir $f_e \geq 2 \times 3\,400 = 6\,800$ Hz.

Solution n°16

Exercice p. 41

D'après le théorème de Shannon, on doit considérer la fréquence maximale du signal à numériser, c'est celle de la sinusoïde de plus petite amplitude qui apparaît dans les images ci-dessous, obtenues en zoomant dans chacun des deux graphiques aux environs de l'abscisse $0{,}001$:



Dans le premier cas, l'écart T_e entre deux instants sélectionnés est inférieur à la moitié de la période T de la petite sinusoïde : $T_e \leq \dfrac{T}{2}$; en passant à l'inverse pour obtenir les fréquences, cela donne : $f_e \geq 2f$, la fréquence d'échantillonnage est supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans le signal, qui est donc convenablement numérisé.
Dans le second cas, on voit sur l'image zoomée que l'écart T_e est nettement supérieur à la moitié de la période T (T_e semble même assez proche de T) ; en passant à l'inverse, on obtient $f_e < 2f$, la fréquence d'échantillonnage est strictement inférieure au double de la fréquence maximale contenue dans le signal, qui n'est donc pas convenablement numérisé.

Solution n°17

Exercice p. 41

Pour chacune des 8 positions dans l'octet, il y a deux choix possibles (0 ou 1). On a donc $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^8 = 256$ octets possibles.

Solution n°18

Exercice p. 41

Pour chacun des n chiffres, on a le choix entre les 10 chiffres utilisés en base 10 : 0, 1, 2, ..., 8, 9. Il y a donc $10 \times 10 \times \cdots \times 10 = 10^n$ nombres à n chiffres en base 10.

Solution n°19

Exercice p. 42

Téléphone : on dispose de 8 bits donc de $2^8 = 256$ valeurs possibles pour l'amplitude.

CD audio : on dispose de 16 bits donc de $2^{16} = 65\,536$ valeurs possibles pour l'amplitude.

Solution n°20

Exercice p. 42

Le téléphone prend $8\,000$ valeurs par seconde et chacune d'elle est encodée sur 8 bits, il utilise donc $8\,000 \times 8 = 64\,000$ bits à chaque seconde. Pour avoir le résultat en octets, on divise par 8 : le téléphone utilise $8\,000$ octets, soit 8 ko, à chaque seconde.
Le CD prend $44\,100$ valeurs par seconde pour chacun des deux signaux et chaque valeur est encodée sur 16 bits, il utilise donc $2 \times 44\,100 \times 16 = 1\,411\,200$ bits à chaque seconde. En octets cela donne $\dfrac{1\,411\,200}{8} = 176\,400$ octets, soit $176{,}4$ ko.

Solution n°21

Exercice p. 42

D'après l'exercice précédent, une seconde de musique enregistrée en stéréo sur CD audio nécessite $176{,}4$ ko d'espace mémoire. Pour 1h de musique, c'est-à-dire 60×60 secondes, on multiplie par $3\,600$, ce qui donne $3\,600 \times 176{,}4 = 635\,040$ ko, c'est-à-dire $635{,}04$ Mo.

Pour le son du film, une seconde nécessite $\frac{2 \times 48 \times 24}{8} = 288$ ko, donc une heure nécessite $288 \times 3{,}6 = 1\,036{,}8$ Mo, c'est-à-dire $1{,}036$ Go.

L'encodage du son sur le DVD prend plus de place que celui de la musique sur le CD, dans le rapport $\frac{1{,}036}{635{,}04} \approx 1{,}63$

On retrouve exactement ce rapport en calculant $\frac{48 \times 24}{44{,}1 \times 16}$.

Solution n° 22

Exercice p. 43

On peut répondre à l'aide des résultats trouvés précédemment :

- oui pour le son du CD, qui utilise $176{,}4$ ko/s ;
- non pour celui du DVD, qui nécessite 288 ko/s.

Solution n° 23

Exercice p. 43

Le son d'un CD nécessite $176{,}4$ ko par seconde, soit $8 \times 176{,}4 = 1\,411{,}2$ kbit par seconde, ou encore $1{,}4112$ Mbit par seconde. Le réseau doit donc avoir un débit au moins égal à $1{,}4112$ Mbit/s.

Solution n° 24

Exercice p. 46

Commençons par mettre les tailles de fichiers dans la même unité, par exemple en kbit. Pour une seconde de musique, le fichier sur CD nécessite $176{,}4 \times 8 = 1\,411{,}2$ kbit, tandis que le format mp3 considéré en utilise 128. Le taux de compression est donc :

$$\frac{128}{1\,411{,}2} \approx 0{,}09$$

Solution n° 25

Exercice p. 47

On a vu qu'une seconde de musique occupait $1\,411{,}2$ kbit dans le format CD standard. Les taux de compression cherchés sont donc :

- mp3 à 192 kbit/s : $\frac{192}{1\,411{,}2} \approx 0{,}14$
- mp3 à 256 kbit/s : $\frac{256}{1\,411{,}2} \approx 0{,}18$
- mp3 à 320 kbit/s : $\frac{192}{1\,411{,}2} \approx 0{,}23$

Puisque le taux de compression est égal à la taille du fichier compressé divisée par celle du fichier d'origine :

$$\tau = \frac{N_c}{N_o},$$

la taille du fichier compressé est égale à celle du fichier d'origine multiplié par le taux de compression :

$$N_c = N_o \times \tau.$$

Appliquons la formule en exprimant les tailles des fichiers dans la même unité (ici en Mo) :

- mp3 à 192 kbit/s : $635 \times \frac{192}{1\,411{,}2} \approx 86{,}4$ donc la taille du fichier compressé est $86{,}4$ Mo (au dixième près)
- mp3 à 256 kbit/s : $635 \times \frac{256}{1\,411{,}2} \approx 115{,}2$ donc la taille du fichier compressé est $115{,}2$ Mo (au dixième près)
- mp3 à 320 kbit/s : $635 \times \frac{192}{1\,411{,}2} \approx 144{,}0$ donc la taille du fichier compressé est $144{,}0$ Mo (au dixième près)

Solution n° 26

Exercice p. 50

1 - Pavillon

2 - Conduit auditif

3 - Tympan

4 - Marteau
5 - Enclume
6 - Étrier
7 - Trompe d'Eustache
8 - Cochlée
9 - Nerf auditif

Solution n°27

Exercice p. 51

1 - mouvements des cils vibratoires / 2 - conversion du message vibratoire en message électrique / 3 - transmission du message nerveux vers le cerveau.

Solution n°28

Exercice p. 51

Solution n°29

Exercice p. 54

Solution n°30

Exercice p. 62

Le graphique représente le % de cellules ciliées détruites chez des rats en fonction de l'intensité sonore (y=f(x)).
On observe que plus l'intensité sonore augmente, plus le % de cellules ciliées détruites augmente. Si on augmente l'intensité de 30 Db alors le pourcentage de cellules détruites passe de 30% à 85 %.
On peut donc conclure qu'une intensité sonore trop élevée va endommager les cellules ciliées et entraîner une surdité.

Solution n°31

Exercice p. 63

1-Cochlée
2-oreille externe (sans espace)
3-Lobes temporaux (sans espace)
4-Cellules ciliées (sans espace)
5-Surdité
6-Tympan
7-Decibel
8-IRM fonctionnel (sans espace)
MOT MYSTÈRE : PRÉVENTION