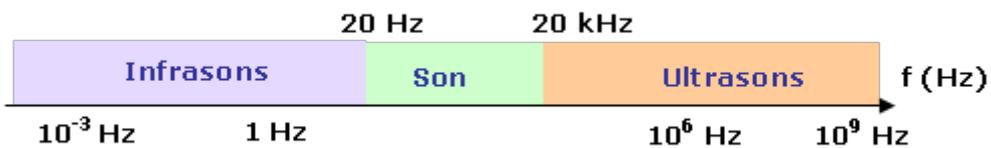


Les ondes sonores

Une onde sonore ou acoustique est une perturbation mécanique périodique qui se propage dans un milieu matériel fluide élastique (l'eau ou l'air par exemple), en s'éloignant de sa source. C'est une onde de compression-dilatation du milieu dans lequel elle se propage.

Par exemple, Une corde de guitare qui vibre, va transmettre sa vibration à l'air. Cette vibration va se propager dans l'air jusqu'à nos oreilles qui vont recevoir la vibration.

L'être humain peut entendre des sons dont les fréquences s'étalent de 20Hz à 20kHz environ.

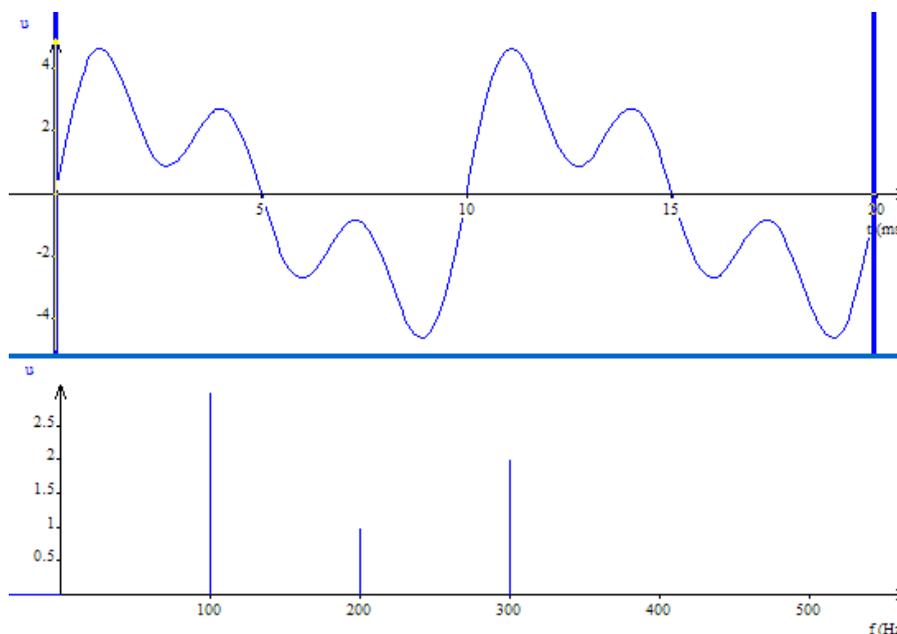


Un son pur est un signal sonore sinusoïdale de fréquence f (Hz) qui ne varie pas au cours du temps. Le signal sonore délivré par un diapason est un son pur.

La plupart des sons que nous percevons dans notre environnement ne sont pas purs mais complexes. Ils sont composés de plusieurs sons purs de fréquences et d'amplitudes différentes. Un son musical est un cas particulier de son complexe, produit par un instrument de musique. Un son musical est périodique (de période constante au cours du temps), mais n'est pas forcément sinusoïdal. C'est en fait, une superposition de plusieurs signaux sinusoïdaux.



Il est possible de décomposer un signal sonore $u(t)$ de fréquence f associé à la propagation d'une onde sonore périodique non sinusoïdale, en une somme infinie de signaux sinusoïdaux, c'est la décomposition de Fourier du signal :



Le signal ci-dessus de fréquence $f=100$ Hz ($T=10$ ms) se décompose de la façon suivante :

$$u(t) = 3 \times \sin(2 \times \pi \times 100 \times t) + \sin(2 \times \pi \times 200 \times t) + 2 \times \sin(2 \times \pi \times 300 \times t)$$

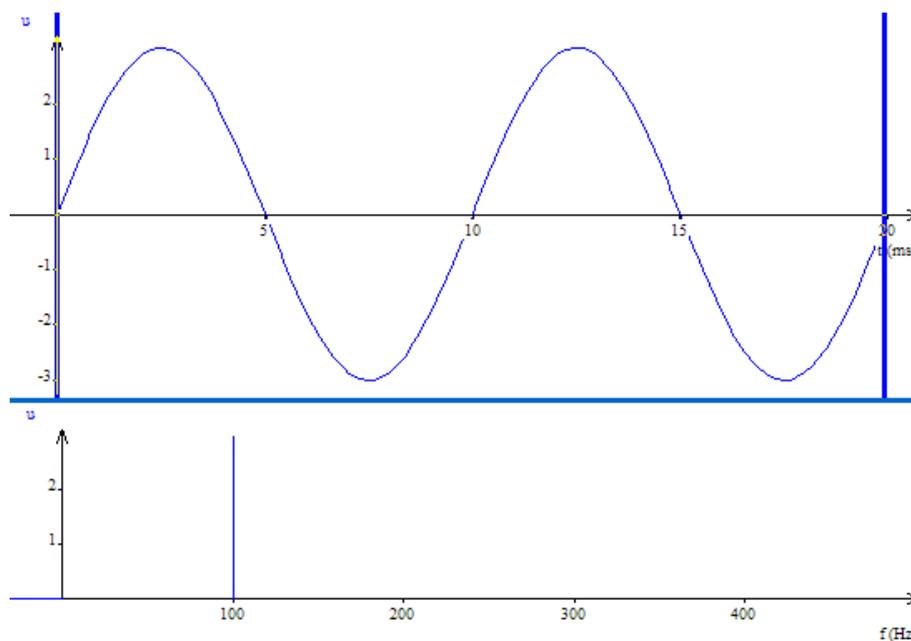
Un signal sonore complexe périodique de fréquence f est donc une superposition de signaux sinusoïdaux :

- un signal sinusoïdal à la fréquence f nommée "fondamental" ou "première harmonique",
- un signal sinusoïdal à la fréquence $2f$, la "deuxième harmonique",
- un signal sinusoïdal à la fréquence $3f$, la "troisième harmonique", etc...

La représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de la fréquence constitue le spectre du signal (voir image ci-dessus).

Les harmoniques sont des signaux sinusoïdaux de fréquences $f_n = n \times f$. Le nombre n est un entier positif appelé rang de l'harmonique.

Dans le cas d'un son pur, le spectre du signal sonore ne présente qu'une unique harmonique, le fondamental.



Spectre d'un son pur de fréquence $f=100$ Hz

Un son musical est caractérisé par sa hauteur et son timbre :

. Hauteur d'un son musical

La hauteur d'un son musical est la fréquence f , exprimée en hertz (symbole : Hz), de l'onde sonore périodique. C'est la fréquence du fondamental dans la décomposition de Fourier de cette onde.

La hauteur d'un son musical est associée au nom de la note jouée (do, ré, mi, ... d'une certaine octave). Le terme de hauteur vient du fait que les notes sont écrites sur une portée musicale de telle manière que la position verticale de la note sur la portée corresponde à son nom.



Si la fréquence est multipliée par deux, on passe à l'octave supérieure. À l'inverse si la fréquence est divisée par deux, on passe à l'octave inférieure.

Une note de musique correspond à une fréquence d'un son à toutes les octaves.

La note "la" correspond à la fréquence $f=440$ Hz, mais aussi à 880 Hz (octave supérieure), 220 Hz (octave inférieure), etc.

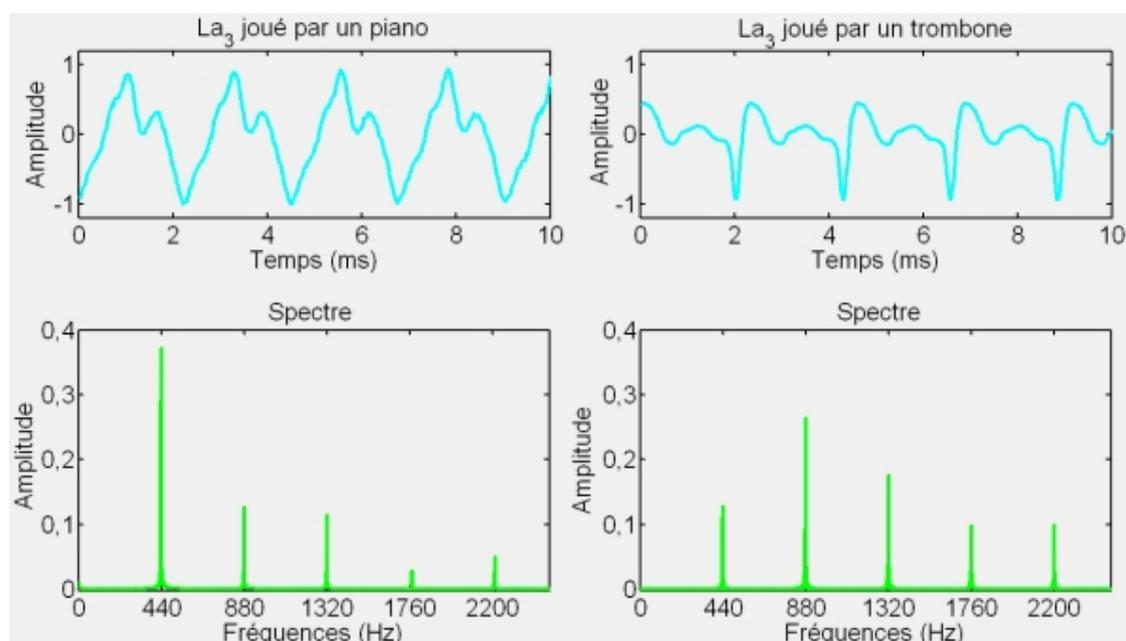
Une onde sonore est d'autant plus aiguë que sa fréquence est grande. Elle est d'autant plus grave que sa fréquence est petite.

. Timbre d'un son musical

Une note de hauteur donnée n'est pas perçue de la même manière selon qu'elle jouée par un diapason ou par un piano. Le timbre du son est différent.

Des sons de même hauteur peuvent donner des sensations différentes en raison de leur timbre. Le timbre d'un son est lié à sa composition spectrale (présence, importance et durée des harmoniques) et à son évolution au cours du temps.

Le timbre d'un son dépend donc de l'instrument qui émet ce son. Les oscillogrammes de deux sons musicaux de même hauteur nous permettent de vérifier que ces deux sons ont même période, donc même fréquence fondamentale. Par contre, les allures de ces deux sons en fonction du temps sont très différentes. Les spectres de Fourier des deux sons font apparaître des harmoniques de mêmes fréquences, mais d'amplitudes différentes d'un son à l'autre.



. Les différentes notes de musique

Chaque note est caractérisée par une fréquence fondamentale déterminée. Lorsque deux notes sont séparées d'une octave, le rapport de leur fréquence est égal à deux.

Dans la pratique, ces deux notes ont le même nom, comme par exemple le "la" de l'octave 3 et le "la" de l'octave 4, nommée couramment "la3" et "la4" pour éviter toute ambiguïté entre elles.

On appelle gamme l'ensemble des notes (de Do à Si) composant une octave donnée. Dans la gamme tempérée, c'est-à-dire celle utilisée dans la musique occidentale, l'octave est divisée en 12 demi-tons, ce qui correspond à 12 notes, en comptant les notes diésées (#).

Par exemple, pour l'octave 1, voici les valeurs de fréquence des 12 notes:

Note	Fréquence (Hz)
Do	65
Do# ou Réb	69
Ré	74
Ré# ou Mib	78
Mi	83
Fa	87
Fa# ou Solb	93
Sol	98

Note	Fréquence (Hz)
Sol# ou Lab	104
La	110
La# ou Sib	117
Si	123

Le # signifie dièse et le b signifie bémol. Ce sont des altérations des notes de la gamme de base (Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, Si). Le dièse augmente la fréquence de la note et le bémol la diminue. Ainsi un La # est situé en fréquence entre le La et le Si

- En notation latine (la notation historique : do ré mi ...)

On a l'habitude d'écrire que le diapason (la note qui nous sert de référence à 440 Hz) est le "la3". Dans ce système, on peut se donner en repère que la première octave entièrement audible commence par le do0.

- En notation américaine (la notation scientifique : A B C ...)

Dans cette notation, le "la" du diapason est le **A4**. C'est le système qui est utilisé en langage Arduino. Dans ce système, on a choisi de dire que le C (do) le plus grave d'un clavier de piano à 88 touches est le C1. Suivant ce repère, on a alors **A4 = 440 Hz**.

Voici un tableau qui référence la fréquence des notes de musique en hertz de la gamme tempérée (notation américaine en noir et notation latine en rouge)

Note octave	0 (-1)	1 (0)	2 (1)	3 (2)	4 (3)	5 (4)	6 (5)	7 (6)	8 (7)
C (Do)	16,35	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00	4186,01
C# – Db (Do#)	17,32	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46	4434,92
D (Ré)	18,35	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32	4698,64
D# – Eb (Ré#)	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02	4978,03
E (Mi)	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02	5274,04
F (Fa)	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83	5587,65
F# – Gb (Fa#)	23,12	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96	5919,91
G (Sol)	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96	6271,93
G# – Ab (Sol#)	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44	6644,88
A (La)	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00
A# – Bb (La#)	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31	7458,62
B (Si)	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07	7902,13