Acoustique musicale

Les notes musicales ont quatre caractéristiques que sont la hauteur, le timbre, la durée, l'intensité et la durée. Voyons cela de plus près.

Les ficelles TICE

Acquérir un son sur PC
Utiliser Audacity, qui permet de créer un fichier .wav ou .mp3

Convertir un fichier .wav en format .csv pour tableur (Latis ou autre)
Utiliser Acquisonic, et sauvegarder sous la forme d'un fichier texte que l'on importe ensuite dans n'importe quel tableur. Attention au nombre de données : choisir une partie du signal seulement.

- Audacity téléchargeable gratuitement ici : http://audacity.sourceforge.net/?lang=fr ainsi qu'en version portable ici : http://framakey.org/Portables/AudacityPortable?from=Portables.PortableAudacity
- Acquisonic de N. Bonnin, téléchargeable gratuitement ici : http://www.scientillula.net/logiciels/acquisonic/acquisonic.html

1 – Quelques idées sur la notion de hauteur

On se propose de réaliser deux enregistrements du son d'une flûte à bec.

- Enregistrer le son (1) émis quand on ne bouche aucun trou.
- Enregistrer le son (2) émis quand tous les trous sont bouchés.

Visualiser l'allure du signal micro dans les deux cas. Pour chacune,

1. Caractériser la forme de l'onde (sinusoïdale ? triangulaire ? créneau ? périodique ? quelconque ?)
2. Déterminer la période et la fréquence de chaque son.

Conclusion

La fréquence caractérise la hauteur du son : plus le son est _________ , plus sa fréquence est élevée.

*Le **diapason** standard a été fixé, sur l'initiative de la France, à 870 vibrations par seconde à la température de 15°. Plus précisément, le diapason a été fixé, à Paris au milieu du XIX^ème^ siècle, à 870 vibrations "simples" pour la note la3. Les "vibrations simples" de l'époque sont considérées aujourd'hui comme des demi-vibrations : le diapason est donc à 435 vibrations "doubles", soit 435 Hertz. La température de 15° est celle à laquelle l'instrument fabriqué alors (par Lissajous – il est conservé aujourd'hui au Conservatoire National des Arts et Métiers) a été jugé juste. Une Commission internationale réunie vers 1880 a jugé que les Français étaient bien cruels de faire jouer leurs musiciens à une température aussi basse et a supposé que les instruments jouant à 435 Hz à 15° seraient plus proches de 440 Hz à 20°: c'est l'origine du diapason moderne. Mais le diapason de Lissajous, même chauffé à 20°, fait toujours entendre à peu près 435 Hz… Peu importe, il s'agit avant tout d'une convention internationale.*

2 – Quelques idées sur la notion de timbre

On arrive sans difficulté à distinguer à l'oreille le son d'une flûte de celui d'un violon jouant la même note car leur *timbre* est différent. Essayons de comprendre de quoi il s'agit.

En 1822, le mathématicien Joseph Fourier montre que n'importe quelle fonction périodique peut se décomposer comme une somme de fonctions sinusoïdales simples de fréquences multiples d'une fréquence f appelée fondamentale.
Faire l'analyse de Fourier d'un signal périodique, c'est donc déterminer quelles sont les fonctions périodiques « simples » (appelées *harmoniques*) qui composent ce signal complexe.

Les contributions scientifiques du physicien Joseph Fourier concernent de nombreux domaines. En fait, nous en profitons tous les jours, souvent sans le savoir : télécommunications, compression de son (MP3) ou d'image, imagerie médicale... Dans le cas précis d'un son musical, la théorie de Fourier permet de mieux saisir la structure des sons complexes, en les interprétant comme la superposition de sons simples ou « purs ». Mathématiquement, un son pur est une onde sinusoïdale [...]. Un son tenu, comme une voyelle que l'on chante à une hauteur fixée, correspond en première approximation à un phénomène périodique de fréquence f : c'est une vibration de l'air qui se répète dans le temps. D'après la théorie de Fourier, un tel son est interprété comme la superposition d'un son « pur » de fréquence f (appelé fondamental) et de sons « purs » de périodes $2f$, $3f$, $4f$, $5f$, etc, qui sont les harmoniques. L'analyse de Fourier consiste donc à extraire les contributions relatives de chacun des harmoniques.

D'après ***L'œuvre de Fourier et les mathématiques contemporaines***, Emmanuel Ferrand.

Modéliser à l'aide de Latis Pro

A l'aide de la feuille de calcul de Latis Pro, créer une variable temporelle échantillonnée par 500 points sur 20 ms à l'aide de la fonction RAMPE :

t = RAMPE(0;0,020;1000)

Pour i entier impair < 10, représenter les fonctions

$$u_i(t) = \frac{1}{i}\sin\left(2\pi i f_o\, t\right)$$

ainsi que la fonction somme $u(t) = \sum_i u_i(t)$

1. A quelle fonction périodique cette somme conduit-elle ?
2. A l'aide du traitement « Analyse de Fourier », tracer le spectre obtenu à l'ordinateur après analyse de Fourier de cette fonction périodique. Y indiquer clairement ce qu'on retrouve en abscisse et en ordonnée.

A l'aide du logiciel de traitement, réaliser l'analyse de Fourier du son émis par un diapason (diapason.wav), puis celui émis par la flûte (flute.wav) et celui d'un violon (violon.wav) produisant la même note.

Compléter ensuite le tableau suivant.

Instrument	**Harmonique 1 le fondamental**		**Harmonique 2**		**Harmonique 3**	
	fréquence	*amplitude*	*fréquence*	*amplitude*	*fréquence*	*amplitude*
diapason						
flûte						
violon						

a. Le son émis par un diapason est « pur ». Explique ce terme.
b. Quelle relation trouve-t-on entre les fréquences des différentes harmoniques ?

Pour l'harmonique de rang n, f_n = ____________

A l'aide de Latis Pro, on pourra essayer de reconstituer le signal le moins complexe et l'envoyer sur un haut-parleur. Que pensez-vous du résultat ? Interpréter.

Pour aller plus loin

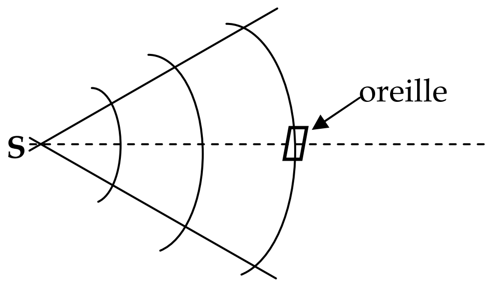
1. On entend très bien le son délivré par un haut-parleur relié à un GBF délivrant un signal sinusoïdal de fréquence 10 Hz. Pourquoi ?
2. Le fichier accord.wav correspond à un accord joué au piano : en expliquant votre démarche, retrouver les notes de l'accord et les jouer sur le piano virtuel piano.swf pour vérifier.

3 – Quelques idées sur la notion d'intensité sonore

Expérience : on place un sonomètre à proximité d'un haut-parleur : il indique le niveau sonore en décibels (dB).
Quand on augmente la tension efficace aux bornes du HP, le niveau acoustique augmente.
Si on éloigne le sonomètre de la source sonore, le niveau sonore diminue. Pourquoi ?

3.1 - Intensité sonore

La source S libère une *énergie acoustique* E_a (en joules) aux couches d'air en contact avec sa membrane. Cette énergie est transportée par une onde sphérique qui, en se propageant, augmente sa surface. Le sonomètre (ou l'oreille), de surface fixe, ne reçoit qu'une portion de cette énergie, portion d'autant plus faible qu'on s'éloigne de la source.



La *puissance acoustique* P_a correspond à l'énergie reçue par unité de temps : $P_a = \frac{E_a}{\Delta t}$ (en watt W).

L'*intensité sonore I* est la puissance acoustique reçue par unité de surface : $\mathbf{I = \frac{P_a}{S}}$ **(en W.m^{-2}).**

Le seuil de sensibilité de l'oreille est l'intensité de référence $I_o = 10^{-12}$ W.m^{-2}.
Le seuil de douleur est de quelques unités de I.

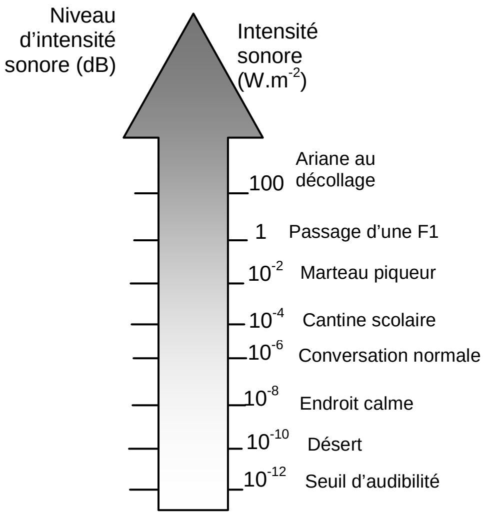
3.2 - Niveau sonore

Pour comparer les sensations perçues par l'oreille, on utilise une grandeur plus adaptée : le niveau sonore (ou acoustique) L.
Il est défini pour une intensité sonore I par la relation

$$\boxed{\mathbf{L = 10 \log \frac{\mathit{I}}{\mathit{I_0}}}}$$

L s'exprime en **décibels (dB)**

- Cette définition rappelle une notion vue pour les ondes sismiques au chapitre 1. Laquelle ?
- Indiquer les niveaux sonores sur le schéma ci-contre
- Comment évolue le niveau sonore quand l'intensité sonore est doublée ? Le vérifier, éventuellement, par l'expérience.



Les 8 notes de musique d'une octave s'étendant du do_i au do_{i+1}. Cet intervalle est divisé en 12 degrés et d'un degré i à un degré i+1, la fréquence est multipliée par $2^{(1/12)}$: $f_{i+1} = f_i \times 2^{1/12}$.

note	do	ré	mi	fa	sol	la	si	do
degré	0	2	4	5	7	9	11	12

Fréquences des hauteurs (en Hertz)

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

Les 8 notes de musique d'une octave s'étendant du do_i au do_{i+1}. Cet intervalle est divisé en 12 degrés et d'un degré i à un degré i+1, la fréquence est multipliée par $2^{(1/12)}$: $f_{i+1} = f_i \times 2^{1/12}$.

note	do	ré	mi	fa	sol	la	si	do
degré	0	2	4	5	7	9	11	12

Fréquences des hauteurs (en Hertz)

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