

## ACOUSTIQUE 3 : **ACOUSTIQUE MUSICALE ET PHYSIQUE DES SONS**

### Matériel :

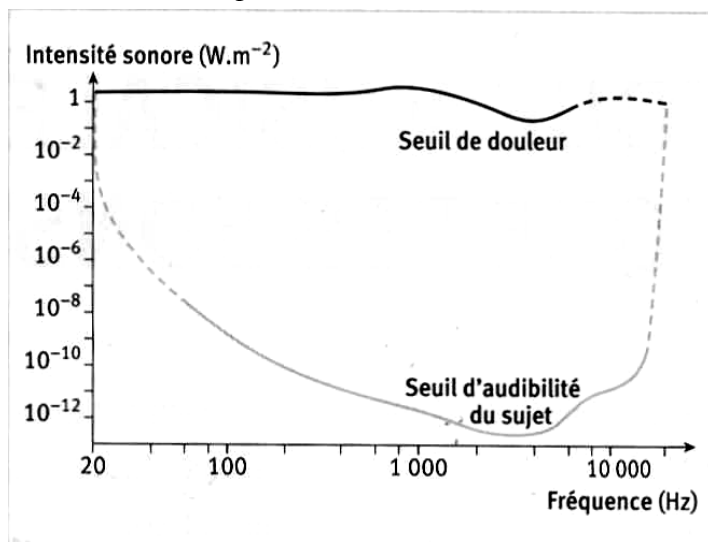
- Logiciel winoscillo
- Logiciel synchronie
- Microphone
- Amplificateur
- Alimentation -15 +15 V
- 2 GBF
- 2 hauts parleurs identiques
- Un sonomètre
- Guitare
- Synthétiseur

### Connaissances et savoir-faire exigibles :

- (1) Savoir que la hauteur d'un son est mesurée par la fréquence de son fondamental.
  - (2) Savoir que le timbre d'un son émis par un instrument dépend de l'instrument (harmoniques, transitoires d'attaque et extinction).
  - (3) Savoir que le niveau sonore s'exprime en dBA.
  - (4) L'expression du niveau sonore étant donnée, savoir l'exploiter.
  - (5) Savoir lire et exploiter un spectre de fréquences.
- Savoir-faire expérimentaux :
- (6) Acquisition et analyse d'une note produite par un instrument de musique.

### La réception sonore :

Lecture document livre p 78 et réponses aux deux questions + quel est le domaine de fréquences audibles par l'homme.



Doc. 1. Audiogramme d'un sujet ne présentant pas de trouble auditif.

Principe de construction d'un audiogramme : Pour une fréquence donnée, l'intensité sonore  $I$  est progressivement augmentée jusqu'à ce que la personne perçoive le signal sonore. La courbe obtenue, représentant le seuil de perception sonore en fonction de la fréquence, est appelée **audiogramme**. L'audiogramme suivant est celui d'un sujet ayant une ouïe particulièrement fine.

Sur cet audiogramme figure aussi le seuil de douleur. Aller au delà de ce seuil peut provoquer des troubles irréversibles de l'audition, troubles qui seront aggravés par une écoute prolongée. A 4000 Hz, le domaine d'intensité des sons audibles s'étend très approximativement de  $10^{-12}$  W.m<sup>-2</sup> à 1W.m<sup>-2</sup>.

1. Quelle unité est utilisée pour exprimer l'intensité sonore qui figure en ordonnée de l'audiogramme ?  
Watt par mètre carré
2. Proposer alors une définition pour cette grandeur physique.  
 $Intensité = Puissance / surface$

#### 1) L'oreille de l'homme et les sons :

La perception des sons dépend de chaque individu. Pour l'homme, on réalise un audiogramme pour tester la « qualité » de l'audition : on enregistre l'**intensité sonore** perçue par le sujet en fonction de la fréquence.

**L'oreille humaine « normale » perçoit les sons compris entre 20 Hz et 20 000 Hz avec un pic de sensibilité à 3000 Hz.**

#### 2) Notion d'intensité sonore :

Comme le montre l'audiogramme, certains sons seront perçus douloureusement par l'oreille lorsque leur intensité sonore est trop élevée :

*Expérience : enregistrement de la corde de guitare pincée faiblement puis fortement*

L'intensité sonore est liée à l'**amplitude** de la **vibration** sonore perçue et dépend de la **puissance** transmise par cette **vibration** au récepteur (membrane du micro, tympan de l'oreille...) :

La **puissance** émise se répartit sur une portion de **sphère** dont la surface augmente avec l'**éloignement** de la source sonore : l'intensité sonore s'**affaiblit** donc avec la **distance** du récepteur à la source.

Définition mathématique :

Soit I l'intensité sonore et P la puissance acoustique transférée à travers la surface d'aire S :

$$I = \frac{P}{S} \begin{cases} I \text{ s'exprime donc en } \text{W.m}^{-2} \\ P \text{ s'exprime en Watt (W)} \\ S \text{ s'exprime en mètre carré (m}^2\text{)} \end{cases}$$

Deux valeurs références :

- le seuil d'audibilité est fixé à  $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$
- le seuil de douleur est atteint pour  $I = 25 \text{ W.m}^{-2}$

3) Niveau sonore <sup>(3) et (4)</sup> :

La **sensation physiologique n'est pas proportionnelle à l'intensité sonore définie ci-dessus**. En effet, lorsque l'on assiste à un concert, les intensités sonores dues à chaque instrument s'ajoutent, pourtant on ne perçoit pas le son proportionnellement plus fort.

a. Expérience :

Prouvons ce qui est dit ici par une expérience de **mesure de niveau sonore : cette mesure se réalise avec un sonomètre, qui mesure le niveau sonore en décibel acoustique (dBA)**.

- Alimenter séparément avec des tensions de même fréquence (en utilisant un GBF), deux haut-parleurs HP<sub>1</sub> et HP<sub>2</sub> placés côte à côte.
- Branchez HP<sub>1</sub> seul et réglez l'amplitude de la tension afin qu'un sonomètre placé à une distance de l'ordre de 2 m environ indique 50 dBA environ.
- Branchez HP<sub>2</sub> seul et réglez-le de la même manière.
- Branchez alors les deux HP simultanément et lisez l'indication du sonomètre.

b. Observation :

Le sonomètre indique 53 dB !

c. Définition mathématique :

En effet, le niveau sonore, grandeur liée à la sensibilité de l'oreille est définie par :

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0} \begin{cases} L : \text{niveau sonore en décibel acoustique (dBA)} \\ I : \text{intensité sonore du son perçu en Watt par mètre carré (W.m}^{-2}\text{)} \\ I_0 : \text{seuil d'audibilité (W.m}^{-2}\text{)} \end{cases}$$

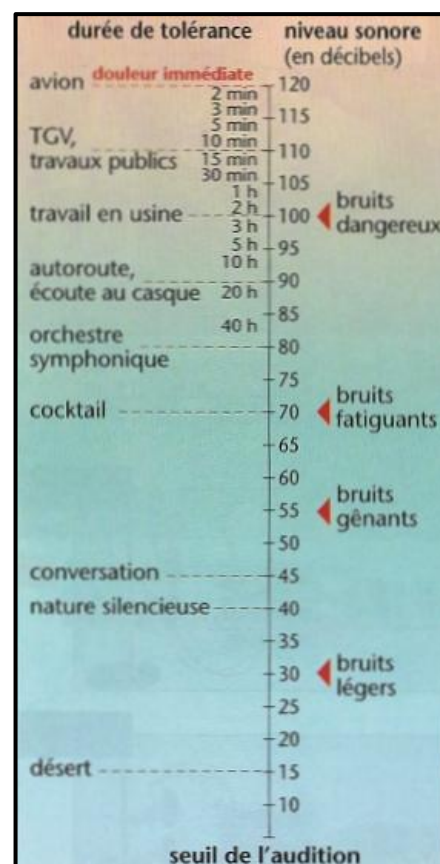
Vérifiez que si on double l'intensité sonore du son perçu, le niveau sonore augmente de 3 dBA :

$$L_{double} = 10 \log \frac{2I}{I_0} = 10 \log 2 + 10 \log \frac{I}{I_0} = 3 + L_{simple}$$

d. Echelle de niveau sonore :

On peut associer un niveau sonore aux sons courants que nous pouvons percevoir, et ainsi définir des bruits légers, gênants, dangereux.

Grâce au logarithme, on a une échelle plus commode à exploiter qui s'étend de 0 à 120 dBA, alors qu'en intensité sonore elle s'étendait de  $10^{-12}$  à  $25 \text{ W.m}^{-2}$ .



## II Analyse d'un son :

### 1) Intensité sonore :

Comme nous l'avons vu précédemment, l'intensité d'un son dépend de l'**amplitude** de la **vibration** qui produit le son.

### 2) Hauteur d'un son <sup>(1)</sup> :

#### a. Expérience :

- On enregistre sous le logiciel synchronie, par l'intermédiaire d'un micro relié à un amplificateur, le son produit par deux cordes différentes de la guitare.
- On mesure la fréquence obtenue grâce aux deux signaux périodique obtenue.
- On compare la hauteur des deux sons perçus à l'oreille avec leur fréquence.
- On peut vérifier les mesures de fréquences en demandant au logiciel de tracer les spectres en fréquences de ces deux signaux.

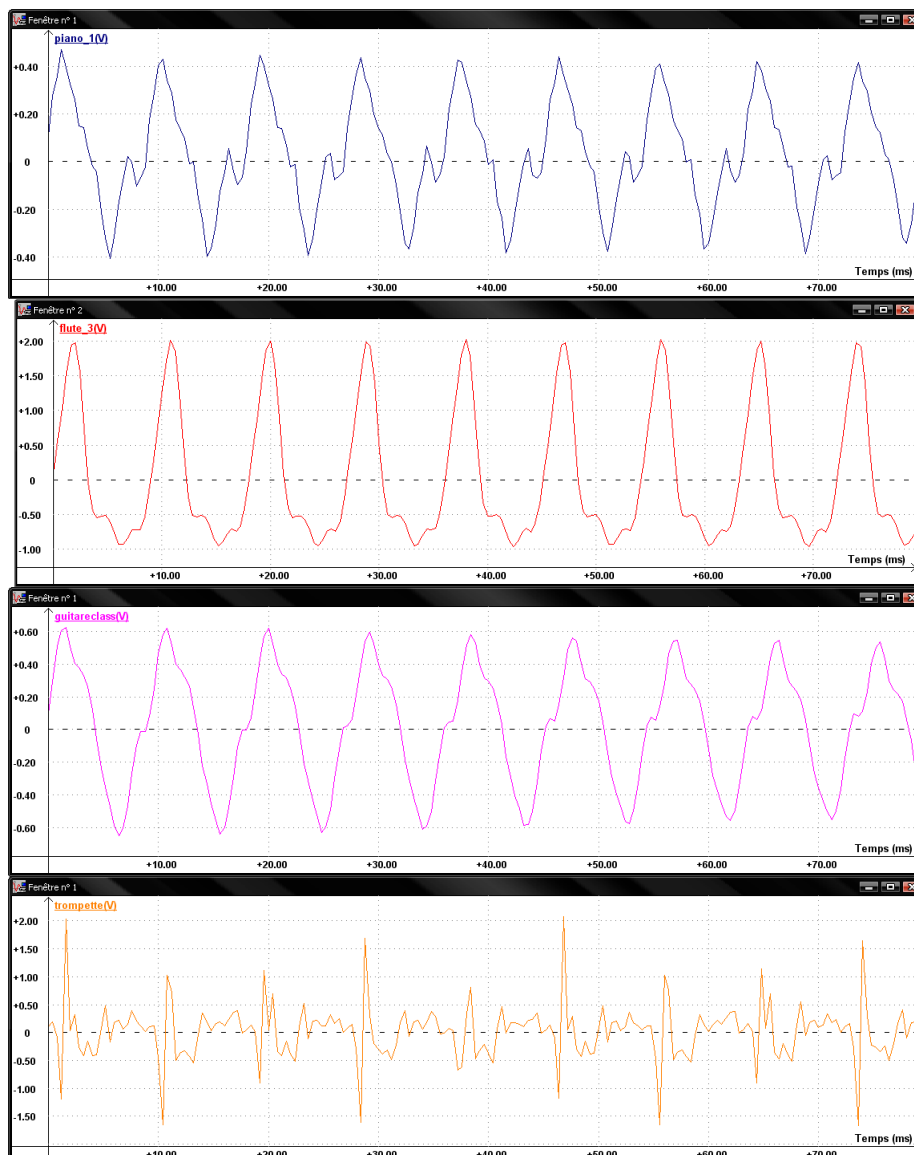
#### b. Conclusion :

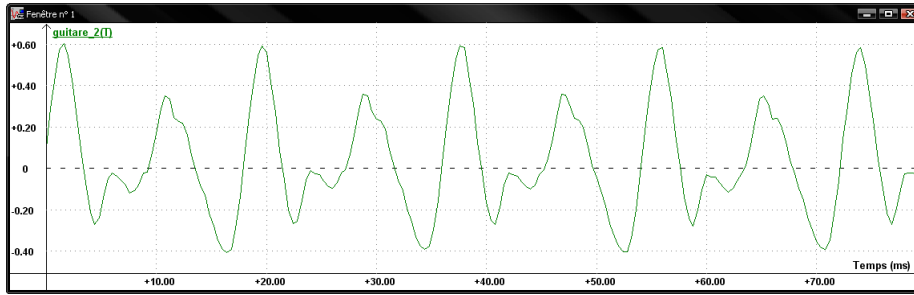
**La sensation de hauteur d'un son dépend de la fréquence du fondamental de celui-ci. Plus la fréquence du fondamental est grande, plus le son perçu est haut (aigu).**

### 3) Timbre d'un son <sup>(2) et (5)</sup> :

#### a. Expérience :

- Enregistrons à l'aide d'un synthétiseur et de notre logiciel d'acquisition le signal obtenu par la même note jouée par des instruments différents :



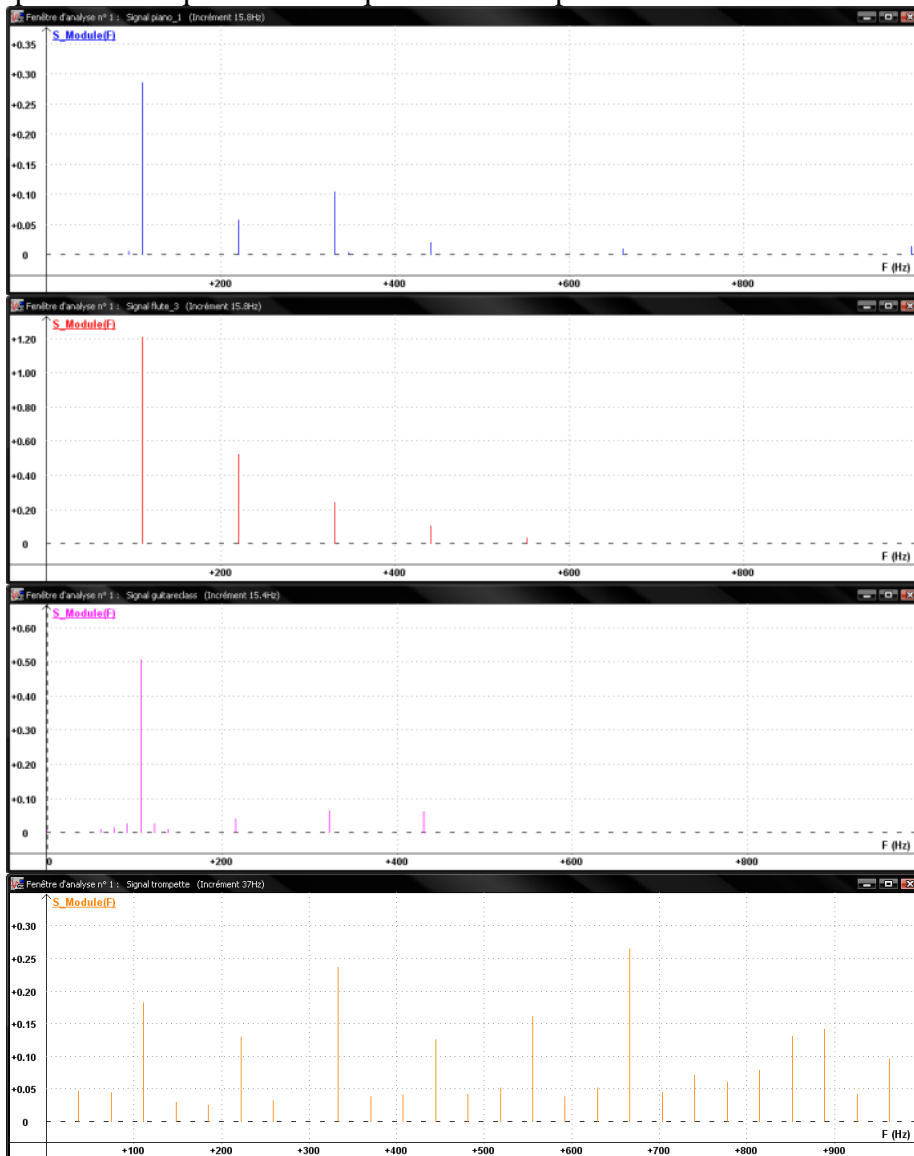


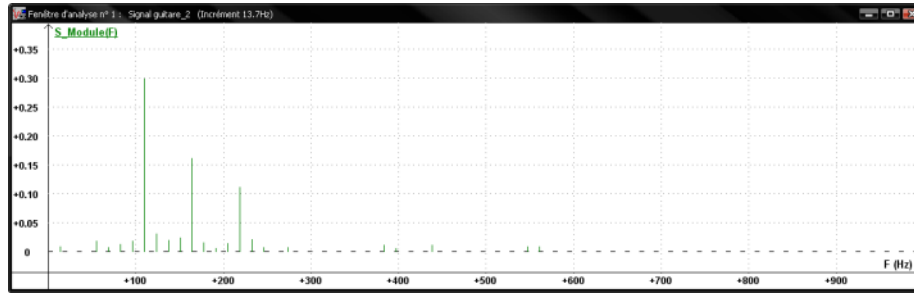
- *Comparez les signaux obtenus :*

En obtient des signaux qui sont tous périodiques, mais qui ont des formes totalement différentes.

Nous avons déjà vu qu'un signal périodique non sinusoïdal pouvait être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de diverses fréquences : quand on fait cette opération, on obtient le spectre en fréquence du signal considéré, et on a ainsi accès au mode fondamental et aux modes harmoniques du son analysé.

- Réalisons le spectre en fréquence de chaque instrument pour la note considérée :





• *Que remarque-t-on ?*

Il y a présence du même fondamental sur chaque spectre en fréquence (on rappelle que nous jouons la même note), mais la composition en harmonique est différente d'un instrument à l'autre.

b. Notion de timbre :

Une même note jouée par **différents instruments** ne donne pas la même **sensation** auditive, pourtant on reconnaît tous (enfin presque tous ...) la même note :

Une note est caractérisée par la fréquence du mode **fondamental (hauteur de la note)** mais sa **perception** auditive est caractérisée par son **timbre** qui correspond au **spectre des harmoniques** : la richesse des différents **harmoniques** dans ce **spectre** change la **perception**.

Mais le timbre est aussi déterminée par les transitoires d'attaque et d'extinction de la note, c'est à dire la manière dont l'intensité sonore de la note s'établit et disparaît lorsque l'instrument joue la note :

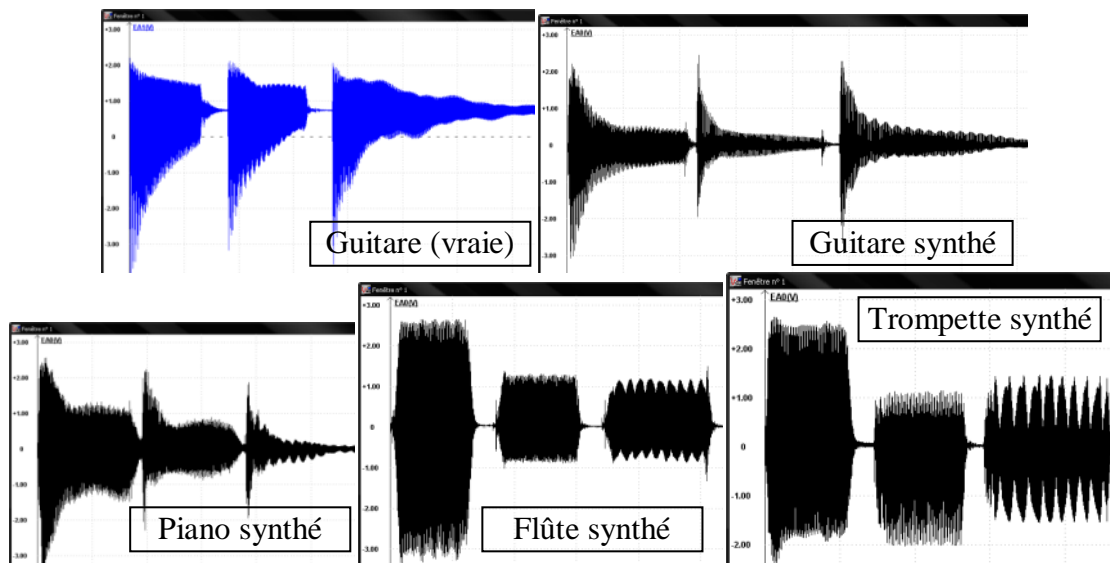
c. Enveloppe d'un son

Une vibration sonore associée à une note émise par un instrument ne conserve pas généralement la même amplitude pendant toute la durée de l'émission. L'enveloppe du son nous permet de « visualiser » les transitoires d'attaque et d'extinction, ainsi que le corps du son :

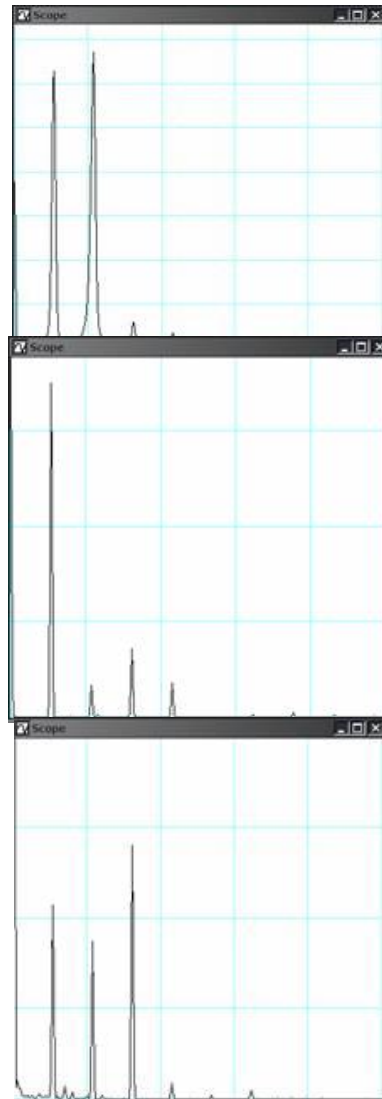
- L'attaque du son : il s'agit de la montée en amplitude de la vibration sonore au début de l'émission.
- L'extinction du son : il s'agit de la phase pendant laquelle l'amplitude de la vibration diminue avant de s'annuler, à la fin de l'émission.
- Le corps du son : c'est la phase entre l'attaque du son et son extinction.

Expériences :

- Enregistrements et visualisation des enveloppes de sons émis par différents instruments :



- Aussi, on peut voir que la durée de présence des harmoniques dans le son est également perceptible et intervient dans le timbre d'un son :  
Expérience : sur la guitare et avec le logiciel synchronie ou winoscillo, « enregistrez » le spectre en fréquence de la corde de guitare pincée à trois instants différents : attaque, corps et extinction du son.



#### d. Création d'un son :

On peut pour parfaire cette théorie d'étude des sons complexes, essayer de créer un son à l'aide d'un générateur, en faisant varier la présence des différents harmoniques et en écoutant le son perçu.

### III Octave et gamme tempérée :

*Lecture document livre p 81*

- L'intervalle entre deux notes (ou deux sons) est le rapport de leurs fréquences : la fréquence la plus grande (plus aigu) par la fréquence la plus faible (plus grave).
- Une octave correspond à un intervalle égal à 2. La gamme tempérée divise l'octave en 12 intervalles égaux, appelés demi-ton, de valeur  $2^{1/12}$ .
- La gamme tempérée basée sur les intervalles nécessite une fréquence de référence. Par convention, il s'agit de la fréquence du La<sub>3</sub> égale à 440 Hz.



## Étude de documents

# 3

## Présentation de la gamme tempérée

La **gamme tempérée**, qui est la gamme musicale que nous utilisons de nos jours, a été élaborée à la fin du  $xvii^e$  siècle par A. Werckmeister (1645-1706). Quelques années plus tard, elle s'est imposée à l'ensemble de la musique européenne, en particulier sous l'impulsion de J.-S. Bach et de J.-P. Rameau.

### Document

#### De l'octave à la gamme tempérée

En appuyant la corde d'une guitare contre le manche au niveau d'une case, on réduit la longueur sur laquelle elle vibre lorsqu'elle est pincée. Depuis longtemps, les musiciens avaient remarqué que pour des longueurs égales à, par exemple,  $L$ ,  $4L/5$ ,  $2L/3$ ,  $L/2$ , les sons étaient consonants, c'est-à-dire agréables à entendre lorsqu'ils étaient produits ensemble ou à la suite les uns des autres. On appelle  $f$  la hauteur de la note obtenue avec la longueur  $L$ ; pour la longueur  $L/2$ , la hauteur de la note est alors égale à  $2f$ .

L'oreille est donc sensible au rapport des hauteurs de deux notes. Ce rapport est appelé **intervalle**. Une **octave** désigne l'intervalle particulier de valeur égale à 2. À partir de ces rapports rationnels entre les fréquences des sons consonants, on peut construire une gamme musicale dite **naturelle**. Celle-ci présente néanmoins un inconvénient majeur : l'intervalle entre deux notes de hauteurs voisines n'est pas constant. On ne peut donc pas modifier d'un même intervalle la hauteur de toutes les notes d'une œuvre pour la transposer dans une tonalité différente. Pour cette raison, une gamme se rapprochant de la gamme naturelle a été construite : il s'agit de la **gamme tempérée**.

La gamme tempérée est construite en divisant l'octave en 12 intervalles égaux de valeur  $t_{1/2}$  appelés demi-ton. Soit  $f_1, f_2, \dots, f_{12}$ , les hauteurs successives séparées par un intervalle d'un demi-ton. Nous avons donc  $f_{12}/f_1 = (f_{12}/f_{11}) \times (f_{11}/f_{10}) \times \dots \times (f_2/f_1)$ , soit  $2 = (t_{1/2})^{12}$ . Ainsi, la valeur du demi-ton est égale à  $2^{1/12}$ . Le ton est un intervalle de 2 demi-tons ; il vaut  $2^{1/12} \times 2^{1/12} = 2^{1/6}$ .

Ainsi, pour la gamme de do majeur, les fréquences se calculent à partir de celle du do en sachant que les intervalles successifs ont pour valeurs : 1 ton, 1 ton, 1/2 ton, 1 ton, 1 ton, 1 ton, 1/2 ton. On obtient alors la gamme :

Do	Ré	Mi	Fa	Sol	La	Si	Do
$f_1$	$2^{2/12}f_1$	$2^{4/12}f_1$	$2^{5/12}f_1$	$2^{7/12}f_1$	$2^{9/12}f_1$	$2^{11/12}f_1$	$2f_1$
	$\overset{=}{2^{1/6}f_1}$	$\overset{=}{2^{1/3}f_1}$			$\overset{=}{2^{3/4}f_1}$		

On distingue deux notes séparées par une octave en les affectant d'un indice d'autant plus grand que la hauteur est élevée : ainsi le  $sol_4$  est à l'octave supérieure du  $sol_3$ . Les **notes altérées**, par un dièse ou un bémol, sont obtenues en ajoutant ou en retranchant un demi-ton. Dans la gamme tempérée, la hauteur du ré dièse est égale à celle du mi bémol.

Jean-Sébastien BACH (1685-1750) apporta son appui à l'adoption du système de la gamme tempérée en lui consacrant deux livrets intitulés « Le clavier bien tempéré ».

### Questions

1. Considérons deux notes séparées par  $n$  demi-tons. Montrer que le rapport de leur hauteur est égal à  $2^{n/12}$ .
2. La hauteur du  $la_3$  est fixée à 440 Hz. Recopier le tableau ci-dessus en y ajoutant la hauteur des notes.
3. Quelle est la hauteur du  $sol_3$  dièse dans cette gamme ?
4. L'intervalle de « quinte » naturelle est égal à  $3/2$ . Dans la gamme tempérée, il est égal à trois tons et demi : calculer sa valeur.
5. Donner deux notes non altérées de la gamme tempérée séparées par une quinte.
6. Pourquoi considère-t-on que la consonance de la quinte dans la gamme tempérée est pratiquement parfaite ?
7. Montrer que la hauteur du ré dièse est égale à celle du mi bémol dans la gamme tempérée.
8. On transpose une partition en changeant sa tonalité ; cette opération consiste à modifier toutes les notes d'un même intervalle. La tonalité d'une œuvre est augmentée de 2 tons. Par quelle note le  $do_3$  est-il remplacé ? Le  $mi_3$  ? Le  $si_3$  ?