

Histoire de la notion de fréquence sonore

Apparition du concept et développement des procédés de mesure

Alain Boudet

Dr en Sciences Physiques

www.spirit-science.fr

31 aout 2017

Résumé: Ce n'est qu'au 17^e siècle qu'on a compris le lien direct entre la hauteur d'un son et la vitesse de sa vibration (sa fréquence). Mais on était alors dans l'incapacité d'évaluer cette fréquence. Il a fallu le développement progressif, à partir du 19^e siècle, de moyens techniques de mesure issus de recherches scientifiques - gravure et visualisation des vibrations - pour aboutir à la situation actuelle où la l'expression de la hauteur d'un son par sa fréquence en hertz nous est devenue familière et banale.

- Fréquence de vibration d'un son
- Objets sonores vibrants
- Sensation de hauteur
- Compter le nombre de vibrations
- Recherches en acoustique
- Rendre visibles les vibrations
- Graver les vibrations
- L'affichage électrique des vibrations sonores
- Popularisation de la mesure des fréquences sonores
- **Annexe**
 - Du mouvement, de la tension, de la force de la pesanteur, & des autres propriétés des cordes Harmoniques, & des autres corps
 - En savoir plus

Il nous semble aujourd'hui banal de parler de la **fréquence d'un son**. Or c'est là une notion relativement récente. Nous savons aussi que la valeur de cette fréquence est en lien direct avec la sensation de hauteur du son, mais ce lien n'est apparu que peu à peu au cours de l'histoire. La nature des ondes sonores et leur composition en fréquences ont été découvertes au fur et à mesure des recherches scientifiques. La détermination de leurs caractéristiques a fait un bond spectaculaire avec l'invention des appareils électroniques, allant jusqu'aux ordinateurs et aux smartphones disponibles pour tous.

Dans cet article, j'expose comment la notion de fréquence des sons est venue à la conscience des savants et comment en pratique les scientifiques ont inventé des procédés de plus en plus perfectionnés pour la mesurer.

Fréquence de vibration d'un son

Le mot **fréquence** lui-même existe depuis longtemps et prend un sens en-dehors du champ sonore. Par exemple, nous pouvons dire: *La fréquence de parution du journal France-Spiritualité est de 4 fois par an.* **Le mot fréquence exprime la régularité de l'occurrence d'un événement dans le temps.**

La fréquence s'exprime donc en **nombre de fois par unité de temps** (seconde, heure, semaine, mois, année, etc.). Autre exemple: *La fréquence moyenne des battements d'un cœur humain au repos est de 60 à 70 à la minute.* Lorsque l'événement est un mouvement répétitif, cyclique, comme le battement du cœur, on peut aussi exprimer la fréquence en **périodes/seconde** ou **cycles/seconde**. Si je vois osciller le balancier d'une vieille horloge toutes les secondes imperturbablement, je peux dire qu'il oscille à une fréquence de 1 fois par seconde ou de 1 cycle/seconde.

En 1930, la Commission Électrotechnique Internationale (IEC) a proposé de remplacer la terminologie de cycles/seconde par le mot **hertz** noté **Hz**. Il a été adopté en 1960 par la Conférence générale des poids et mesures. 1 Hz désigne donc une fréquence de 1 événement ou 1 cycle par seconde. Un kilohertz (*kHz*) correspond à 1000 vibrations par seconde et un mégahertz (*MHz*) à 1 million de vibrations par seconde. Le nom a été choisi en l'honneur du physicien allemand **Heinrich-Rudolf Hertz** (1857 - 1894) pour ses travaux sur l'électromagnétisme (*voir article Concepts fondamentaux de la physique*).

Objets sonores vibrants

Déjà dans l'antiquité grecque, on savait que **le son est produit par un objet qui vibre** (membrane, lamelle de bois, objet métallique, corde tendue...).

Mais pour parler de la **fréquence d'un son**, il fallait se rendre compte que **la vibration est un mouvement répétitif qui se produit régulièrement plusieurs fois par seconde**.

Lorsque nous regardons une **corde de guitare** pendant son émission sonore, elle vibre tellement vite qu'on ne voit qu'un fuseau. Il faut la filmer et passer ensuite le film au ralenti pour s'apercevoir de son mouvement d'aller et retour. De même les membranes des **haut-parleurs** vibrent très vite lorsqu'elles émettent des sons (*voir articles Physique et perception du son et Son: Hauteur et fréquence*).

La **fréquence de vibration** est le nombre d'allers et retours que la membrane ou la corde effectuent par seconde.

Sensation de hauteur

Il fallait de plus comprendre que **la sensation de hauteur d'un son est liée à la vitesse de sa vibration**.

Reprenons l'exemple de notre haut-parleur: **lorsque le son émis est grave, les vibrations de la membrane sont lentes (fréquence faible). Elles deviennent plus rapides (fréquence élevée) lorsque le son monte dans les aigus** (*voir article Son: hauteur et fréquence*).

Au 16^e siècle, pour expliquer la sensation de l'oreille, on imaginait que le son venait frapper le tympan par une série de coups très rapides, mais on ne faisait pas de lien avec la hauteur. Le rapport entre la sensation de hauteur d'un son et la vitesse de vibration du corps sonore qui le produit ne sera véritablement établi qu'au 17^e siècle.

Ce lien avait pourtant été proposé par le philosophe grec **Platon** (vers 428 – vers 374 av.J.C.) dans son ouvrage le **Timée**: *Nous pouvons définir le son comme un coup donné par l'air à travers les oreilles au cerveau et au sang et arrivant jusqu'à l'âme. Le mouvement qui s'ensuit, lequel commence à la tête et se termine dans la région du foie, est l'ouïe. Ce mouvement est-il rapide, le son est aigu; s'il est plus lent, le son est plus grave; s'il est uniforme, le son est égal et doux, il est rude dans le cas contraire; il est fort grand, lorsque le mouvement est grand, et faible s'il est petit.*

Compter le nombre de vibrations

Pour déterminer les valeurs de ces fréquences, il fallait **compter** le nombre des vibrations qui se produisent en une seconde. Combien de fois par seconde une corde de violon vibre-t-elle lorsqu'elle produit le son UT? La vibration est tellement rapide qu'il est quasiment impossible de la distinguer à l'œil nu.



Pourtant le père **Marin Mersenne** (1588 - 1648), philosophe et savant français, y réussit en faisant preuve d'astuce. C'est l'un des premiers de notre période moderne à se pencher sur la question de la mesure des fréquences. Ses expérimentations sont exposées dans son *Harmonie Universelle* (1637) (*voir en annexe*). Il choisit une corde lâche et suffisamment longue pour qu'elle vibre lentement et qu'il puisse en voir les "tours et retours". Il comprend que la hauteur des sons de la corde est liée au nombre de ces tours et retours. Puis il extrapole ses résultats à des cordes tendues et courtes. La méthode est ingénieuse et novatrice, mais elle reste très imprécise, car il est bien difficile d'estimer ce nombre à l'œil nu.

À la même époque, en Italie, le célèbre astronome et physicien **Galilée** (1564 - 1642) étudie aussi le phénomène sonore, par analogie avec ses études sur le mouvement pendulaire. Il avait constaté que plus le pendule était long, plus la durée d'une oscillation augmentait (proportionnellement à la racine carrée de sa longueur). Il en serait donc de même des vibrations des cordes.

Galilée publie ses études sur le son en 1638, dans une dizaine de pages de ses *Discours et démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles touchant la mécanique et les mouvements locaux*. Observant les vaguelettes qui se forment autour d'un verre aux parois minces plongé dans l'eau lorsqu'il est mis en vibration sonore, il constate que *si le ton du verre venait à monter d'une octave, [il voit] aussitôt chacune de ces ondes se diviser en deux: phénomène qui prouve clairement que le rapport de un à deux est bien la forme propre de*

l'octave. (*cité par François Baskevitch, L'élaboration de la notion de vibration sonore: Galilée dans les Discorsi*)

Recherches en acoustique

La période est scientifiquement féconde. Les savants font des émules et les expériences se multiplient. La contribution du physicien français **Joseph Sauveur** (1653 - 1716) dans le domaine de l'acoustique musicale est fondamentale. En **1700**, il tire parti des battements d'intensité sonore qui se produisent lorsque deux notes de hauteur très proches sont produites simultanément pour déterminer la fréquence de certains sons musicaux. Sauveur trouva que la fréquence du LA de son clavecin était de 404 vibrations par seconde.

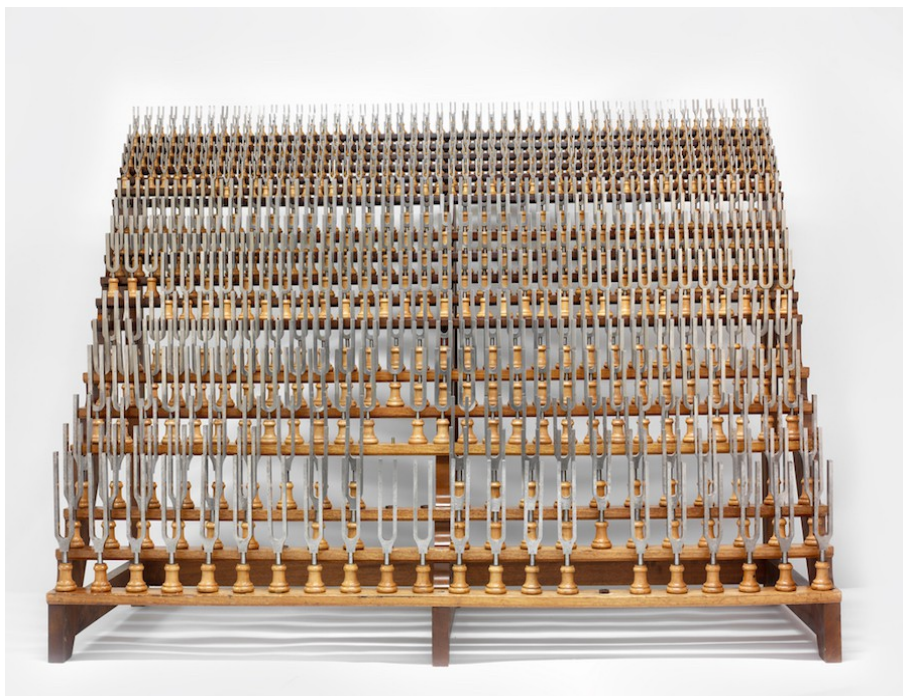
Le physicien allemand **Ernst Chladni** (1756 - 1827) mit en évidence les vibrations de plaques métalliques lorsqu'elles sont excitées par un archet et émettent un son. Il les saupoudrait de sable qui se rassemble en lignes dessinant des figures. Elles donnent des indications précieuses sur les caractéristiques des vibrations sonores (*voir de nombreux détails dans l'article [Les sons créateurs de formes](#)*). Chladni étudia aussi la vibration des cloches et rédigea un traité d'acoustique.

À la même époque, le physicien français **Félix Savart** (1791 - 1841) inventa un *sonomètre* et une roue appelée la *roue de Savart*, constituée d'un disque métallique muni sur sa circonférence de dents régulièrement espacées. Lorsqu'on place une lame souple contre les dents, le frottement produit un son qui s'élève d'autant plus qu'on tourne le disque plus vite (*sa fréquence est proportionnelle au nombre de dents et à la vitesse de rotation du disque qui peut être mesurée à l'aide d'un chronomètre*).



Figure acoustique
Photos © A. Lauterwasser, Images sonores d'eau

En 1834, le fabricant allemand de tissus en soie **Johann Heinrich Scheibler** (1777 - 1837), féru d'acoustique et de physique, musicien talentueux, inventa un appareil avec lequel il pouvait mesurer la fréquence d'une note musicale. Nommé **tonomètre**, il était fait d'une série de diapasons-fourches accordés selon une progression de 4 cycles par seconde. On évaluait la fréquence d'un son par comparaison avec le diapason du tonomètre le plus proche. C'est une méthode très précise.

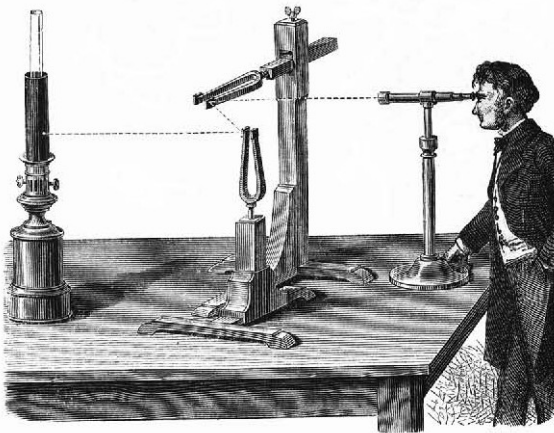


Le grand tonomètre de Koenig, 661 diapasons, 1876
Smithsonian Institution, National Museum of American History

Pour évaluer le nombre de vibrations d'un son quelconque avec le tonomètre, on choisit le diapason qui s'en approche le plus. Si le son à mesurer est légèrement différent de celui de ce diapason, il se produit des battements (le volume sonore croît et décroît régulièrement). On compte le nombre des battements par seconde et chacun de ceux-ci représentant 2 vibrations simples par seconde, on découvre aisément le nombre cherché.

Scheibler construisit plusieurs tonomètres dans sa vie. La version la plus élaborée comprenait 56 diapasons, couvrant une octave de LA 220 à LA 440 à 4 Hz d'intervalle. En 1876, le fabricant parisien d'instruments acoustiques **Rudolph Koenig** fabriqua un tonomètre de 65 diapasons protégés par une cage de verre, qu'il présenta à l'exposition de Londres en 1862 et qui fit sensation. Puis, il en fit un autre couvrant l'étendue de la voix humaine avec 670 diapasons de 16 à 4096 Hz, présenté en 1876 à l'exposition de Philadelphie.

Rendre visibles les vibrations



Méthode optique de Lissajous

*D'après A. Guillemin, Le Son, Paris, Hachette, 1875
Merci à Giusy Pisano, Une archéologie du cinéma sonore, édition en ligne, CNRS Éditions, 2004*

À cette époque, des procédés sont mis en œuvre pour rendre visibles les mouvements vibratoires des corps sonores.

En **1827**, le physicien anglais **Charles Wheatstone** (1802 - 1875), étudia les vibrations d'une tige métallique, en fixant une perle de verre argentée à son extrémité. Un faisceau lumineux est réfléchi par cette perle et focalisé avec une lentille sur un écran. Il y dessine des courbes de formes diverses. Wheatstone nomma son dispositif un *kaléidophone*.

C'est avec un procédé de ce type que le physicien français **Jules Antoine Lissajous** (1822 - 1880) mit au point en **1885** une méthode optique de comparaison des vibrations sonores de deux diapasons, placés en équerre, l'un vertical, l'autre horizontal. Ils réfléchissent un faisceau de lumière qui décrit une courbe sur un écran. Cette courbe révèle si les diapasons sont accordés ou décalés en fréquence.

Graver les vibrations

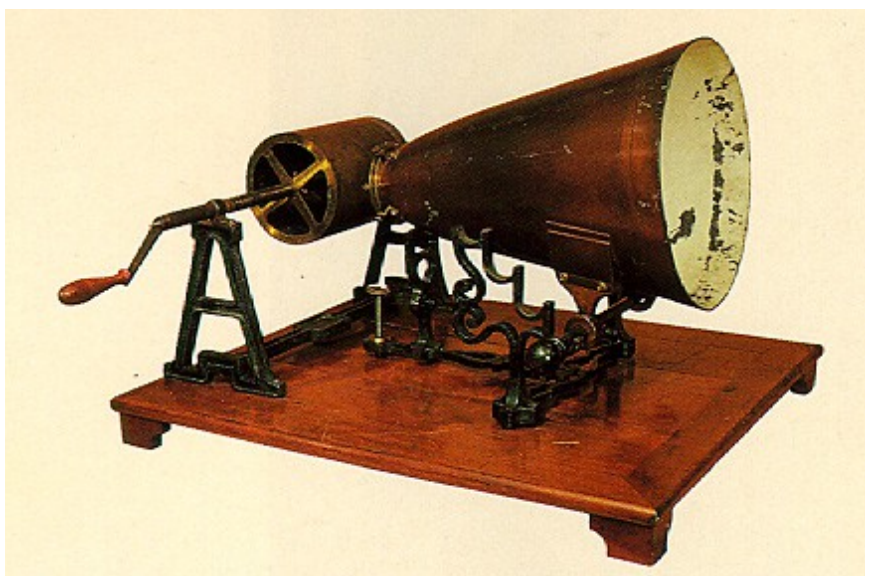
Un autre procédé permettant de rendre visibles les vibrations d'un objet sonore consiste à les graver sur un support matériel. Il fut inventé et perfectionné au long de plusieurs années. L'objet sonore (un diapason ou une membrane vibrante) est relié à un stylet qui marque une ligne sur une surface plate ou cylindrique en déplacement uniforme.

Dans les premiers appareils, la surface graphique est faite d'un papier enduit de noir de fumée, et le stylet trace une ligne blanche sur cette surface. Pour déplacer la surface au fur et à mesure de l'inscription de la ligne, on applique ce papier sur un cylindre qu'on fait tourner avec une manivelle.

En **1807**, le physicien britannique **Thomas Young** (1773 - 1829), le même qui est célèbre pour avoir étudié les interférences d'un faisceau lumineux traversant deux fentes parallèles (*voir article Matière et rayonnements*), imprime de cette façon la trace des vibrations d'un diapason sur un cylindre tournant.

Le principe de ce cylindre est repris et modifié en **1857** par le typographe français **Édouard-Léon Scott de Martinville** dans son invention: le *phonautographe*. Cette fois, ce sont des voix humaines ou des bruits qui sont recueillis et amplifiés par un cornet acoustique, au fond duquel se trouve une membrane. Le stylet suit les mouvements de la membrane à laquelle il est relié par un fil. Il inscrit la courbe sur un cylindre de verre enduit de fumée et entraîné par une manivelle.

Le phonautographe ne permet pas encore de reproduire le son enregistré. Il permet de voir les vibrations en produisant une image sous forme de tracé, même pour des vibrations rapides. Il est l'ancêtre des appareils d'enregistrement et de reproduction du son, de la parole et de la musique: le phonographe à cylindre (avec **Charles Cros**, puis **Thomas Edison** en 1877) et le gramophone à disque (avec l'allemand **Emile Berliner** en 1887). L'apparition du phonographe va reléguer le phonautographe aux oubliettes et Scott revendiqua en vain la priorité de sa découverte d'enregistrement graphique des vibrations sonores. Il meurt dans la misère en 1879.



Le phonautographe de Scott de Martinville produit par Rudolph Koenig en 1859

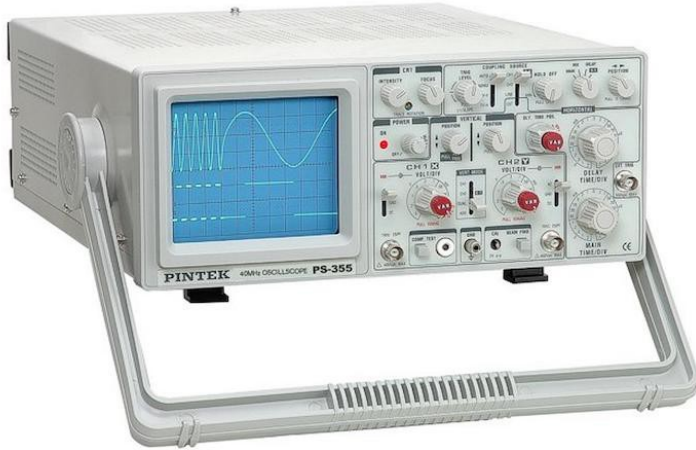
Merci à USCB cylinder audio archives (Courtesy of the Smithsonian Institution)

Source: Giusy Pisano, Une archéologie du cinéma sonore. CNRS Éditions, 2004 (édition en ligne visitée en 2021)

L'affichage électrique des vibrations sonores

Une autre recherche active au 19^e siècle tire partie de la science de l'électricité. Elle concerne l'invention de dispositifs pour communiquer à distance. L'invention du télégraphe en 1839 par Charles Wheatstone, a été suivie de celles du téléphone et du microphone (1877). Grâce à eux, on peut transformer le son en signal électrique.

Le **microphone** a été mis au point par **David Edward Hughes** en Angleterre, comme partie du téléphone, puis en **1877** indépendamment par **Emile Berliner** et **Thomas Edison**. Une plaque mince conductrice vibre au rythme du son reçu. Un électroaimant placé contre transforme ces mouvements vibratoires en courant électrique. Le courant est amplifié et on peut s'en servir à différents usages.



Oscilloscope analogique

dans un oscilloscope, on voit sur l'écran le tracé de ces oscillations et on l'enregistre. Avec cet appareil, on peut analyser toute vibration sonore avec précision: fréquence fondamentale, harmoniques, intensité, dynamique (évolution dans le temps), etc. L'ère électronique a commencé.

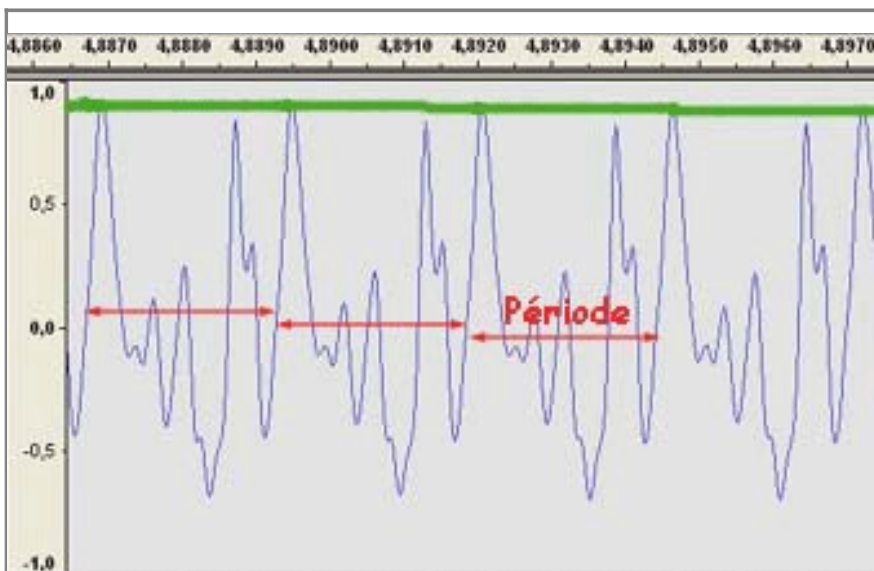
Pour **l'enregistrement**, le courant amplifié est conduit à un stylet qui grave la piste sur un disque en métal ou en cire (disque-maitre). Dans le **téléphone**, le signal électrique est conduit à l'autre bout de la ligne à une deuxième plaque vibrante qui tient le rôle inverse en transformant le courant électrique en son. Plus tard, on pourra diffuser le son par l'intermédiaire d'un **haut-parleur**, appareil inventé en 1925.

Puis apparaissent l'oscillographe et l'oscilloscope, qui permettent d'afficher le signal électrique. **L'oscillographe** a été inventé en 1893 par le physicien français **André Eugène Blondel** (1863 - 1938) et perfectionné par d'autres. Il sera détrôné par **l'oscilloscope cathodique**, inventé en **1897** par le physicien allemand **Ferdinand Braun** (1850-1918), en adaptant un tube à rayons cathodiques de **Crooke** (voir article Matière et rayonnement).

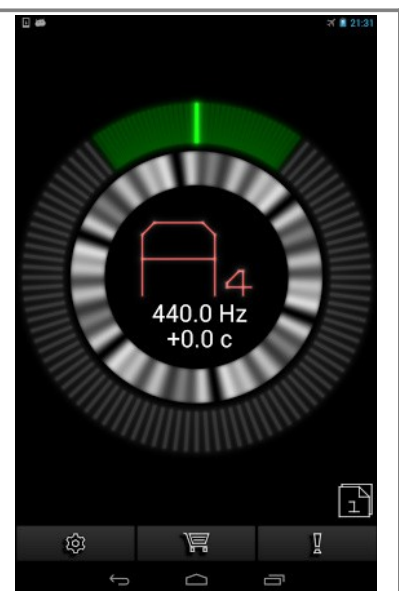
Si on envoie les oscillations électriques du microphone

Popularisation de la mesure des fréquences sonores

L'électronique a ensuite envahi nos habitations et nos villes. Les appareils sonores se sont multipliés et perfectionnés.



Courbe de variation de la pression d'une onde sonore. Elle montre sa répétition périodique, ici d'environ 2/1000^e de seconde, soit une fréquence proche de 500 Hz. Plus précisément, c'est un LA3 de 440 Hz. Réalisé avec le logiciel Audacity



Écran d'un téléphone portable avec l'application "PitchLab Instrument tuner" affichant la fréquence d'un son et la note correspondante

Les notions d'ondes sonores, de fréquences et d'harmoniques ont progressivement fait partie de notre culture

populaire. La nature vibratoire des sons est enseignée dans les écoles ainsi que l'indication de leurs fréquences. La popularisation très récente et rapide de l'usage des ordinateurs personnels puis des smartphones a accéléré cette évolution.

Votre **téléphone portable** peut facilement vous donner la fréquence de base d'un son et vous afficher le même type de graphique que l'ordinateur, grâce à certaines "applis", souvent gratuites.

Annexe

Du mouvement, de la tension, de la force de la pesanteur, & des autres propriétés des cordes Harmoniques, & des autres corps

Extrait de *L'Harmonie Universelle, Livre Troisième*
par Marin Mersenne,

Proposition I

La raison du nombre des retours de toutes sortes de cordes est inverse de leur longueur

(p.157) Soit la corde précédente AB attachée aux deux chevalets du Monocorde aux deux points A & B; & la corde AF attachée aux points A & F, je dis que la corde AB étant tirée au point G ne retournera qu'une fois au point F, pendant que la corde AF tirée au point I, retournera deux fois au point H, comme montre l'expérience; de sorte que AF reviendra toujours deux fois pendant que AB ne reviendra que une fois: par conséquent le nombre des retours d'AF est double de ceux d'AB, comme la corde AB est double de la corde AF: d'où il s'ensuit que le nombre des mouvements ou des retours d'une corde s'augmente en même raison que la longueur se diminue, & conséquemment que la raison desdits retours est inverse de la raison des longueurs de la corde.

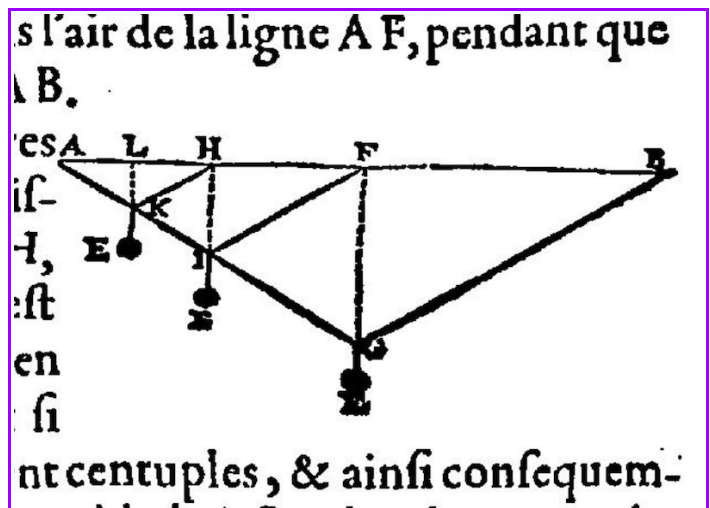
Proposition V

Expliquer la manière de nombrer très-aisément tous les tours et retours de chaque corde de Luth, de Viole, d'Épinette, etc. et déterminer où finit la subtilité de l'œil et de l'oreille

(p. 169) Je suppose donc que l'on veuille savoir le nombre des retours de la corde d'une Épinette, ou d'un Luth, lorsqu'elle est à l'unisson du ton de Chappelle, que l'on prend sur un tuyau de 4 pieds ouvert, ou de 2 pieds bouché faisant le *G re sol*, sous lequel les voix les plus creuses ou les plus basses de France peuvent seulement descendre d'une Quinte pour arriver jusques au *C sol ut* [...]

Je dis premièrement que la corde qui fait ledit ton de *G re sol* [...] bat 168 fois l'air, c'est à dire qu'elle passe 168 fois par son centre, ou par la ligne de direction dans le temps d'une seconde

minute, ou qu'elle revient 84 fois vers celui qui la pousse, ou qui la tire. En second lieu qu'une corde longue de dix-sept pieds & demi suffit pour en faire l'expérience,



d'autant qu'elle ne tremble pas trop vite, et qu'elle donne loisir de conter les retours, comme l'on peut voir avec une corde de Luth, ou de Viole de la grosseur de celle dont on fait les montans des Raquette (que l'on fait de douze intestins de mouton) laquelle revient seulement deux fois dans le temps d'une seconde, lorsqu'elle est tendue avec une demi-livre, quatre fois étant tendue de deux livres, & huit fois étant tendue de huit livres: or si l'on fait sonner une partie de la corde qui n'ayt que 10 pouces, quand elle est bandée avec quatre livres, elle monte à l'unisson du ton de Chappelle, & quand elle est bandée de huit livres, estant longue de vingt pouces elle monte au mesme ton, & finalement quand elle n'est tendue que par la force d'une demi-livre, elle fait le mesme ton en prenant seulement la longueur de 5 pouces.

(p.170) de là vient que [l'oreille] n'entend point les huict retours que fait la corde de dix-sept pieds & demi de long dans une seconde, & qu'il faut qu'une corde batte pour le moins vingt fois l'air dans une seconde pour se faire entendre, & qu'elle ne le batte que quarante-deux fois pour faire voir son mouvement à l'œil, sans neantmoins qu'il puisse conter les retours, jusques à ce qu'elle n'en face plus que dix.

En savoir plus

Sites internet en français

- [L'élaboration de la notion de vibration sonore: Galilée dans les Discorsi](#), François Baskevitch, Revue d'histoire des sciences 2007, 2, 60, 387-418
- [Une archéologie du cinéma sonore](#), Giusy Pisano, livre en ligne, CNRS Editions/OpenEdition
- [Histoire de l'enregistrement sonore](#)
- [Histoire du Gramophone](#)
- [L'histoire des microphones](#)
- Encyclopédie Wikipédia: [Acoustique](#); [Phonographe](#)

Sites internet en anglais

- [Édouard-Léon Scott de Martinville](#), sur le site First Sounds
- Wikipedia: [History of sound recording](#); [Phonautograph](#)

Dossier Musique et Sons dans le site www.spirit-science.fr

- [Le phénomène sonore: Nature et perception](#): Qu'est-ce que le son? Est-ce un phénomène physique? Non, c'est un phénomène de perception par le cerveau provoqué par une source physique. Dans cet article, nous découvrons cet enchainement de phénomènes: nature vibratoire du son, comment il est émis, comment il se propage; par quel mécanisme il est capté, entendu et perçu par le cerveau.
- [La hauteur des notes de musique doit-elle être normalisée par un diapason, LA 440, LA 432 ou autre?](#) Les aléas historiques de la fréquence du LA.
 1. Depuis 1953, une norme internationale recommande d'accorder les instruments de musique à la fréquence de 440 hertz pour le LA. C'est une volonté récente, car dans le passé, on ne s'intéressait qu'aux intervalles entre les notes et on ne savait pas mesurer leur fréquence.
 2. Fixer un diapason à 1 Hz près a un sens purement technique car musicalement, les notes émises par les instruments sont fluctuantes et varient avec la température et le souffle. Lorsque vous entonnez une chanson, vous ne vous souciez pas du diapason. La nécessité d'un diapason commun est apparue pour des motifs pratiques et commerciaux, afin de faciliter la musique professionnelle d'ensemble et la fabrication des instruments.
 3. Au moins jusqu'au 18^e siècle, le diapason des instruments variait d'un endroit à l'autre, d'une époque à l'autre et d'un instrument à l'autre. Puis des tentatives de normalisation ont été effectuées, mais le choix des valeurs retenues a suscité des controverses, qui ne se sont pas éteintes avec la normalisation internationale de 1953.
 4. Le choix d'un diapason plus haut ou plus bas peut affecter le rendu sonore et la performance vocale des chanteurs lorsqu'il s'agit d'interpréter des œuvres écrites dans le passé. L'essentiel est l'impact émotionnel et

physique de la musique sur l'auditeur. Il résulte de paramètres complexes qui dépassent de loin la question du diapason.

- **Les sons créateurs de formes. Les sons ont-ils participé à la formation de l'univers?** Lorsqu'une plaque sur laquelle on a déposé du sable ou un liquide est soumise à une vibration ou à un son, le sable ou le liquide s'arrangent en d'extraordinaires figures géométriques. Ces figures sont segmentées en cellules symétriques d'autant plus fines et complexes que la fréquence vibratoire est élevée. Des gouttes d'eau isolées pulsent et s'organisent en polyèdres. Par ce procédé, le son est transcrit en formes. La voix humaine produit de merveilleuses figures et l'on peut suivre les formes d'une musique. Beaucoup de ces figures acoustiques sont analogues à des formes que l'on trouve dans les végétaux et les animaux, et aussi dans les planètes et les crop-circles. Se pourrait-il que le monde et la nature aient été créés par des sons, comme le rapportent les mythes de nombreuses traditions?

Texte conforme à la **nouvelle orthographe française** (1990)

© Copyright 2017 - Alain Boudet
www.spirit-science.fr - France

Tous les documents présents sur ce site sont protégés par les lois sur les droits d'auteur.

[Les publications de ce site sont identifiées par le numéro international ISSN 2430-5626](#)

Cet article est l'aboutissement d'études, d'investigations, de compréhensions, de synthèse, de réflexions, de clarifications et de reformulation en langage simple, qui ont demandé une somme importante de travail.

Si vous deviez en tirer parti devant un public de lecteurs ou de spectateurs ou pour quoi que ce soit, merci de le citer.