

Rapport d'acoustique :

La hauteur d'un son

Sylvain Daudé

Magistère de mathématiques et applications 2^{ème} année

Juin 2000

Responsable : M. Yann Malécot

Introduction

Un son est déterminé par sa hauteur, son timbre, son intensité, sa direction et ses caractéristiques temporelles. Au lieu de présenter sommairement chacun de ces aspects, ce travail développe plus particulièrement la notion de hauteur. Celle-ci a en effet le double avantage d'être descriptible en termes physiques et de présenter des phénomènes perceptifs intéressants.

Je tiens à remercier M. Yann Malécot d'avoir bien voulu encadrer ce projet, et M. Alain Joye de m'avoir permis de le réaliser.

Table des matières

INTRODUCTION.....	2
TABLE DES MATIÈRES	3
1. GÉNÉRALITÉS.....	5
1.1. ONDE SONORE.....	5
1.2. SIGNAL SONORE.....	5
1.3. FONDAMENTAL, PARTIELS ET HARMONIQUES	5
1.4. LE SONAGRAMME : UNE REPRÉSENTATION COMMUNE DU SIGNAL	6
1.5. DESCRIPTION DE L'OREILLE	7
2. PERCEPTION PHYSIOLOGIQUE DE LA HAUTEUR	9
2.1. IDENTIFICATION DES HAUTEURS PAR L'OREILLE	9
2.1.1. Localisation des fréquences sur la cochlée.....	9
2.1.2. Périodicité d'impulsions.....	9
2.2. POSSIBILITÉS ET LIMITES DE L'OREILLE DANS LA PERCEPTION DE LA HAUTEUR	10
2.2.1. Etendue des fréquences audibles	10
2.2.2. Différentiation des hauteurs	<i>Erreur! Signet non défini.</i>
2.2.3. Oreille absolue.....	11
2.3. INTERPRÉTATION DE LA HAUTEUR PAR LE CERVEAU	11
2.3.1. Identification de la hauteur d'un son à partir de ses harmoniques	12
2.3.2. Différenciation du rôle des oreilles selon la tessiture.....	12
3. INTERVALLES ET MODULATIONS DE HAUTEUR.....	13
3.1. SONS CONSONANTS, SONS DISSONANTS	13
3.1.1. Les battements.....	13
3.1.2. Les harmoniques communes	14
3.2. L'EFFET DOPPLER	15
3.3. LE VIBRATO	15
4. PARAMÈTRES INTERVENANT DANS LA PERCEPTION DE LA HAUTEUR	16
4.1. RELATION EXACTE ENTRE HAUTEUR ET FRÉQUENCE.....	16
4.2. HAUTEUR ET HARMONIQUES.....	16
4.3. INFLUENCE DE LA DURÉE SUR LA SENSATION DE HAUTEUR	17
4.4. INFLUENCE DE L'INTENSITÉ SUR LA SENSATION DE HAUTEUR	17

5. HAUTEUR ET PROCÉDÉS ÉLECTRONIQUES	18
5.1. CAPTER UNE HAUTEUR : LE MICROPHONE.....	18
5.2. ENREGISTRER UNE HAUTEUR	18
5.2.1. <i>Le phonographe</i>	18
5.2.2. <i>Le magnétophone</i>	19
5.3. RESTITUER UNE HAUTEUR : LE HAUT-PARLEUR	20
6. HAUTEUR ET INSTRUMENTS DE MUSIQUE.....	22
6.1. INSTRUMENTS À CORDES.....	22
6.2. INSTRUMENTS À VENT.....	23
6.2.1. <i>Instruments « traditionnels »</i>	23
6.2.2. <i>L'appareil phonatoire humain</i>	24
6.3. LES INSTRUMENTS À PERCUSSION	26
6.3.1. <i>Instruments à membrane</i>	26
6.3.2. <i>Instruments à plaques</i>	26
6.3.3. <i>Instruments « en pavés » dont les trois dimensions sont comparables</i>	27
CONCLUSION.....	28
BIBLIOGRAPHIE.....	28

1. Généralités

1.1. Onde sonore

La notion physique fondamentale permettant de décrire un son est l'**onde**. Une onde sonore est une différence de pression qui se propage dans un fluide, de l'air par exemple. Cette propagation s'explique par le fait que l'air a une élasticité et une masse. Par exemple, une membrane en vibration comprime l'air à proximité (car celui-ci a une masse, donc une inertie), qui va se dilater par élasticité, comprimant l'air à proximité et ainsi de suite : la compression se propage. L'onde se déplace à la vitesse du son, qui dépend des propriétés de l'air ambiant (à 20°C sous une atmosphère, elle est d'environ 344 mètres par seconde). Il est à noter que l'onde ne s'accompagne pas d'un mouvement de matière à grande échelle.

L'amplitude de vibration de notre membrane (représentée par exemple par la distance d'un point de la membrane à sa position d'équilibre) détermine l'amplitude du déplacement de chaque particule d'air, c'est à dire l'**amplitude de l'onde**.

Si la membrane vibre périodiquement, l'air environnant se comprime et se dilate à la même fréquence, appelée **fréquence de l'onde**.

Lorsqu'elle nous atteint, cette compression fait vibrer une membrane, le tympan. Cette vibration déclenche un mécanisme qui code les informations de la vibration (amplitude, fréquence et direction) en influx nerveux, qui sont alors interprétés par le cerveau.

1.2. Signal sonore

Le **signal** relatif à une onde sonore en un point donné est le graphique présentant l'amplitude de l'onde en fonction du temps en ce point. Le signe de l'amplitude correspond à la forme de l'onde : compression ou dépression.

1.3. Fondamental, partiels et harmoniques

A part les sons purs générés électroniquement, les signaux sonores n'ont pas une forme sinusoïdale et comportent plusieurs composantes de fréquence. La transformée de Fourier, ou **spectre**, du signal permet d'extraire ces composantes qui apparaissent comme des pics.

Remarque : Les hypothèses que le signal doit vérifier pour pouvoir effectuer cette opération le sont pour des raisons physiques ! Sous ces hypothèses, la transformée de Fourier du signal f à la

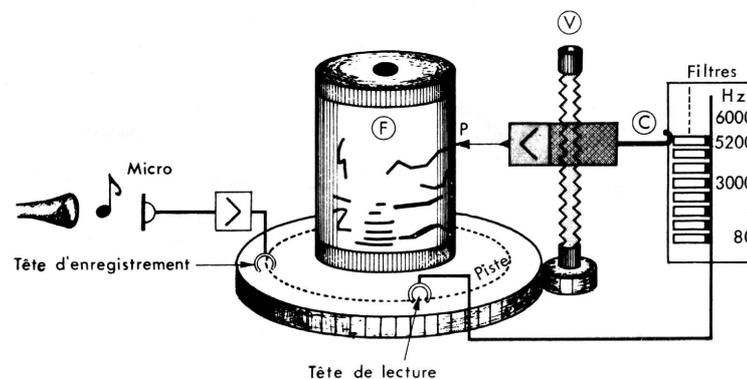
fréquence ζ est donnée par:
$$\widehat{f}(\zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cdot e^{2i\pi t \zeta} dt$$

Si le spectre du signal présente plusieurs pics équidistants multiples d'une fréquence f_0 , cette fréquence est appelée **fondamental**, les autres pics équidistants sont les **harmoniques** relatives à ce fondamental. Les pics « isolés » sont les **partiels** du signal.

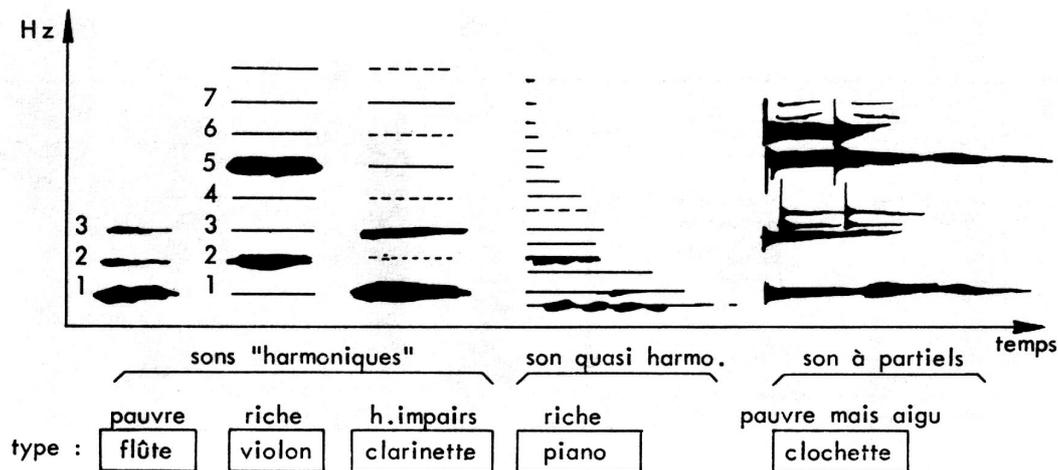
1.4. Le sonagramme : une représentation commode du signal

L'inconvénient de la transformation de Fourier est qu'elle « cache » les informations temporelles du signal. Le sonographe permet d'en obtenir une représentation où apparaissent simultanément le temps et la fréquence.

Son principe est assez simple : le signal est traité par des filtres passe-bande en parallèle ; simultanément, un papier défile. En un instant donné, les filtres dont les fréquences propres correspondent aux composantes du signal laissent passer ces fréquences et des marques s'inscrivent sur le papier. L'importance d'une composante dans le signal en un instant donné est indiquée par l'épaisseur du trait correspondant sur le papier. Le graphique obtenu est appelé **sonagramme**.



Principe du sonographe

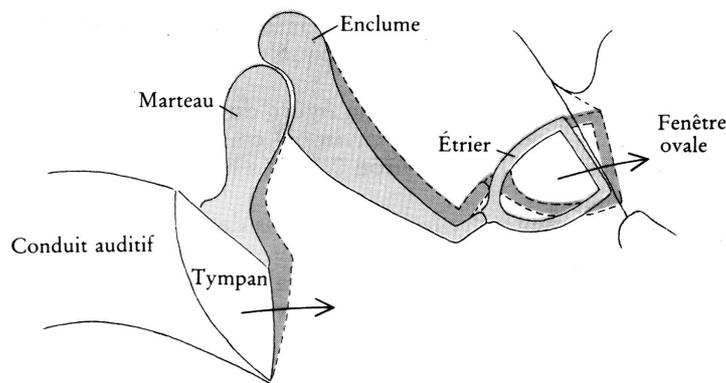


Exemples de sonagrammes

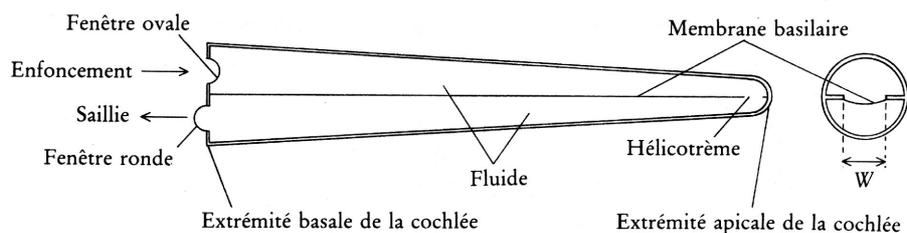
Remarque : ce procédé ne permet pas d'avoir une très bonne précision en fréquence en raison du nombre limité de filtres ; en revanche, la précision en temps est maximale. Les sonagrammes permettent de « visualiser » le son et d'en extraire immédiatement les caractéristiques intéressantes : hauteur, durée, intensité et timbre.

1.5. Description de l'oreille

La partie externe de l'oreille est constituée d'un **pavillon**, qui permet une meilleure localisation du son dans l'espace. Puis un **conduit auditif** amplifie certaines plages de fréquences (c'est un **résonateur**). A l'extrémité de ce conduit se trouve une membrane, le **tympan**, qui lorsqu'il est atteint par une onde sonore, vibre à la même fréquence (la vibration du tympan ne dépend que de ses compressions et dépressions successives). Il entraîne alors dans sa vibration une série d'osselets, **le marteau, l'enclume et l'étrier**, qui modulent l'intensité de l'onde afférente, et font vibrer à leur tour une membrane, la **fenêtre ovale**.



Cette membrane communique son mouvement à un fluide situé dans un tube conique enroulé, la **cochlée**. La cochlée est constituée de deux cavités séparées par une membrane, la **membrane basilaire**. A son extrémité, un trou, l'**hélicotrème**, permet aux deux cavités de communiquer.



Lorsque la fenêtre ovale est enfoncée, le fluide se comprime dans la première cavité, poussant la membrane basilaire « vers le bas ». Comme l'hélicotrème laisse le fluide couler d'une cavité à l'autre, la compression se propage dans la première cavité, et la membrane basilaire se déplace en conséquence.

Ainsi, une vibration de la fenêtre ovale engendre une onde qui se propage le long de la membrane basilaire. En raison du rétrécissement de la cochlée, donc de la diminution de la masse linéique du fluide, la vitesse de propagation du fluide, donc de l'onde, diminue le long de la membrane basilaire, et l'onde « s'arrête » en un certain endroit de la membrane, où son amplitude est maximale. En cet endroit l'énergie de l'onde est absorbée par les cellules ciliées qui la transforment en influx nerveux à envoyer au cerveau.

Nous verrons plus tard quels mécanismes entrent précisément en jeu dans la perception de la hauteur.

2. Perception physiologique de la hauteur

La hauteur perçue d'un son dépend largement de la fréquence de son fondamental : plus celle-ci est élevée, plus le son est aigu. Une description de la perception physiologique des fréquences nous permettra de comprendre quels paramètres modifient la sensation de hauteur. Enfin, nous verrons quelques procédés de lutherie et d'électroacoustique utilisés pour produire ou reproduire une hauteur.

2.1. Identification des hauteurs par l'oreille

Il existe deux mécanismes d'identification des hauteurs par l'oreille : une localisation des fréquences sur la cochlée et une reconnaissance de la périodicité d'impulsions.

2.1.1. Localisation des fréquences sur la cochlée

Considérons, pour simplifier, un son pur qui fait vibrer le tympan, donc les osselets et la fenêtre ovale, selon une seule fréquence. Pour plus de détails, voir le paragraphe *1.5. Description de l'oreille*.

Lorsque cette vibration s'effectue à basse fréquence, la compression du fluide dans la cochlée s'effectue lentement ; l'hélicotreme a donc un débit suffisant pour que l'onde engendrée sur la membrane se propage rapidement (inversement, à haute fréquence elle se propage lentement). Elle s'arrête donc plus près de la fenêtre ovale pour des sons de haute fréquence que pour des sons de basse fréquence. Selon les fibres dont proviennent l'influx, le cerveau détermine alors la fréquence de l'onde.

Lorsque le signal possède plusieurs composantes de fréquence, le même phénomène se produit pour chaque composante, plusieurs groupes de fibres sont excités. D'une certaine façon, l'oreille effectue la transformée de Fourier du signal !

Remarque : L'enveloppe de l'onde sur la membrane basilaire est plus large pour les sons graves, c'est pourquoi ceux-ci sont moins bien localisés par l'oreille.

2.1.2. Périodicité d'impulsions

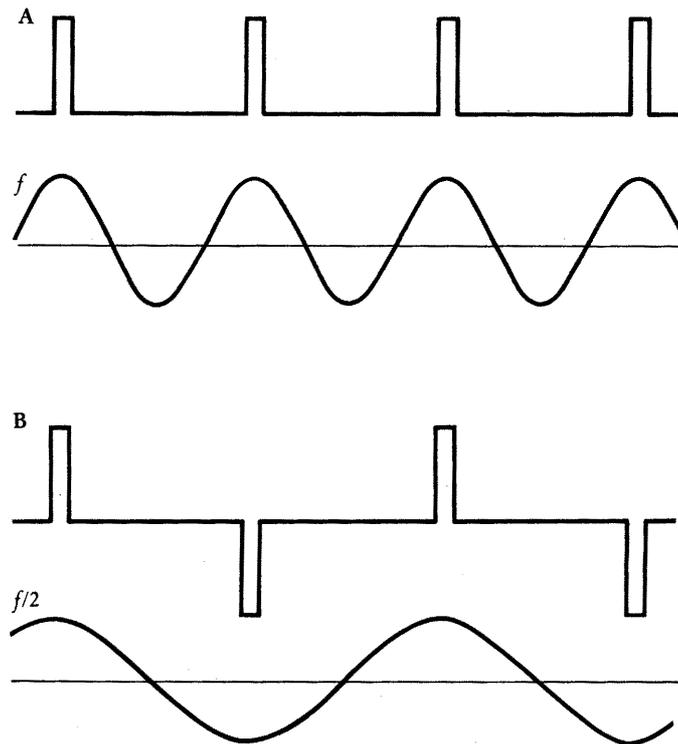
Ce mécanisme intervient surtout pour les sons à basse fréquence.

Soit une série périodique de claquements (impulsions) de basse fréquence. A chaque impulsion, le tympan est comprimé une seule fois. L'oreille peut alors « sentir » la hauteur d'un son selon le nombre de compressions du tympan par seconde.

Dans ce cas, l'oreille ne différencie pas si les impulsions sont des compressions ou des dépressions. Cette constatation permet d'expliquer une illusion auditive. Considérons deux séries de claquements : la première constituée de compressions espacées de 10 ms, la seconde d'une alternance de compressions et de dépressions, espacés également de 10 ms.

Comme il s'agit de deux signaux de basse fréquence, c'est ce mécanisme qui entre en jeu, et les deux sons ont la même hauteur.

En revanche, lorsqu'on double la fréquence de ces deux signaux (les impulsions sont alors séparées de 5 ms), c'est le mécanisme de localisation des fréquences sur la cochlée qui entre en jeu. Le fondamental du premier signal est alors de fréquence 100 Hz, mais celui du second signal est de 50 Hz (car les impulsions sont tour à tour positives et négatives) : le deuxième son sonne une octave plus bas que le premier.



Interprétation des signaux par l'oreille lorsqu'on a doublé la fréquence

2.2. Possibilités et limites de l'oreille dans la perception de la hauteur

2.2.1. Etendue des fréquences audibles

L'oreille peut identifier des sons dont les fréquences varient à peu près entre 20 et 20000 Hertz. Ces bornes varient d'un individu à l'autre, et chez un même individu lorsqu'il vieillit.

2.2.2. Différenciation des hauteurs

Le pouvoir séparateur de l'oreille en fréquence varie :

- selon les individus : certains musiciens arrivent à discerner des intervalles de l'ordre du centième de ton !
- selon la culture d'origine : par exemple, l'habitude de la gamme tempérée (notes du piano) de la musique occidentale ne facilite pas l'écoute de musiques d'Asie et du Moyen-Orient, qui utilisent des intervalles nettement plus fins ;
- selon la tessiture du son : s'il est particulièrement mauvais dans le grave et dans l'aigu (voir les paragraphes *2.1.1 Localisation des fréquences sur la cochlée* et *4.2 Hauteur et harmoniques*), il est bien meilleur dans une zone située entre 150 Hz et 1500 Hz environ (voir le paragraphe *4.1 Relation exacte entre hauteur et fréquence*).

Remarque : le pouvoir séparateur de l'oreille en fréquence ne correspond pas forcément à la finesse de l'ouïe, qui est maximale aux alentours de 3400 Hz

2.2.3. Oreille absolue

Certaines personnes ont la capacité d'identifier une hauteur instantanément, ils ont « l'oreille absolue ». Cette faculté est en général associée à un apprentissage musical précoce, qui s'est accompagné d'une mémorisation fidèle des hauteurs.

Age d'initiation	2-3 ans	3-4 ans	4-6 ans	Après
Pourcentage	50%	30%	15%	Moins de 1%

Pourcentage de personnes ayant l'oreille absolue en fonction de leur âge d'initiation à la musique

2.3. Interprétation de la hauteur par le cerveau

L'importance du cerveau dans l'identification des hauteurs est capitale. Un cas pathologique célèbre est celui du compositeur Gabriel Fauré, pour qui les sons étaient devenus insupportables de fausseté à cause d'une tumeur au cerveau. Cependant, le fonctionnement du cerveau est relativement peu connu, nous nous contenterons donc d'indiquer deux phénomènes où il intervient directement.

2.3.1. Identification de la hauteur d'un son à partir de ses harmoniques

L'écoute d'une radio de poche fait apparaître un phénomène curieux : nous arrivons à identifier les sons graves bien que les haut-parleurs soient trop petits pour reproduire de telles amplitudes. Autrement dit, le cerveau est capable d'identifier la hauteur du son à partir de ses harmoniques.

Deux explications ont été données à ce phénomène :

- L'interprétation de Jean-Philippe Rameau, reprise par Ernst Terhardt : le cerveau « interpole » le fondamental à partir de ses harmoniques
- L'interprétation d'Emile Leipp : la sensation de hauteur ne provient pas des fréquences absolues des harmoniques, mais de leur équidistance.

2.3.2. Différenciation du rôle des oreilles selon la tessiture

Le cerveau différencie les oreilles selon la hauteur des sons. Ce phénomène est mis en évidence par l'« illusion d'octave » (une illustration sonore pourra être trouvée dans [P]). Un son est envoyé à l'oreille droite ; simultanément le même son diminué d'une octave est envoyé à l'oreille gauche, puis on inverse périodiquement la destinations des deux sons. L'oreille droite n'entend que la note aiguë, l'oreille gauche n'entend que la note grave.

3. Intervalles et modulations de hauteur

3.1. Sons consonants, sons dissonants

La consonance et la dissonance de deux sons reflètent la sensation d'harmonie ou de dysharmonie ressentie lorsque ces deux notes sont jouées ensemble. Ce sont des notions subjectives, qui dépendent largement de la culture d'origine. Elles ont toutefois un fondement physique, dont nous pouvons distinguer deux paramètres.

3.1.1. Les battements

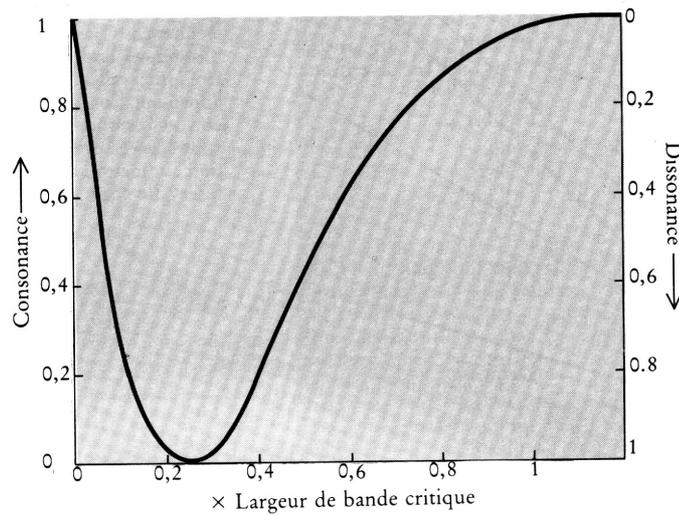
Pour simplifier, considérons deux sons sinusoïdaux purs de pulsations respectives ω_1 et ω_2 et de même amplitude (des amplitudes différentes ne font qu'ajouter des coefficients de pondération, inutiles pour la compréhension du phénomène). Quitte à changer l'origine des temps, on peut de plus supposer les deux signaux en phase.

- Si ω_1 et ω_2 sont très proches, les ondes engendrées par les sons sur la membrane basilaire (voir le paragraphe 1.5 *Description de l'oreille*) s'arrêtent à une distance trop infime pour être détectée par les cellules ciliées : **les sons sont confondus**.
- Si ω_1 et ω_2 s'éloignent légèrement, on entend, en plus d'un son de pulsation voisine de ω_1 et ω_2 , **une ondulation lente**, de pulsation $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$, qui ne nuit pas à l'impression d'harmonie. L'explication de cette ondulation est simple : le signal résultant de la somme des deux sons a pour expression :

$$\sin(\omega_1 \cdot t) + \sin(\omega_2 \cdot t) = -2 \cdot \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \cdot t\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \cdot t\right)$$

ce qui correspond à un son de pulsation proche de ω_1 et ω_2 « porté » par une sinusoïde de pulsation $\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$.

- Si ω_1 et ω_2 continuent à s'éloigner, l'ondulation devient de plus en plus rapide, ce qui produit des **battements** (désagréables si leur amplitude est trop importante) : les sons sont dissonants. Ces battements sont très utiles aux accordeurs pour trouver le juste intervalle.
- Lorsque la différence entre les fréquences dépasse un seuil appelé « largeur de bande critique », les battements disparaissent et **les sons deviennent plus consonants**. La largeur de la bande critique se situe en général entre le ton et la tierce mineure.

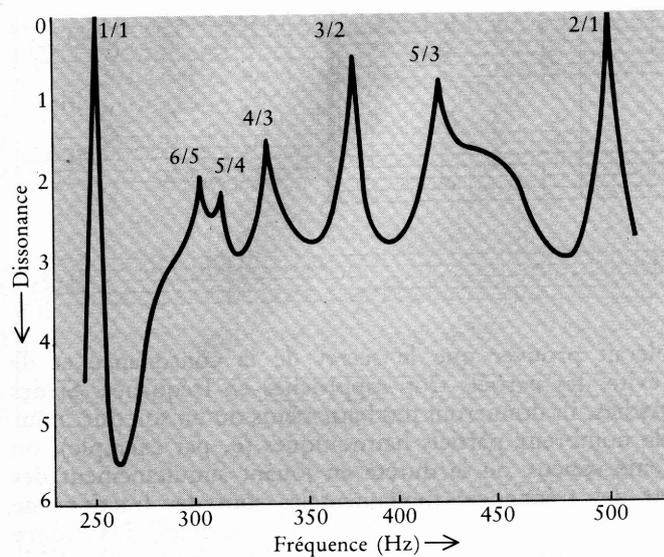


Consonance de deux sons en fonction de leur différence de fréquence (intervalles courts)

3.1.2. Les harmoniques communes

Deux sons éloignés de plus d'une largeur de bande critique paraissent souvent d'autant plus consonants qu'ils ont d'harmoniques communes (en particulier les premières harmoniques).

C'est ainsi le cas de l'intervalle d'octave (doublement de fréquence) : la première harmonique du son le plus grave coïncide avec le fondamental de l'autre son ; dans une quinte (fréquence multipliée par $3/2$), la deuxième harmonique du son le plus grave coïncide avec la première harmonique du son le plus aigu, etc. Ceci explique pourquoi certains sons riches en harmoniques, comme le son du clavecin, sont souvent dissonants.



Dissonance de deux sons en fonction du rapport de leurs fréquences (intervalles longs)

3.2. L'effet Doppler

L'effet Doppler est perceptible lorsque nous croisons un train qui klaxonne : le Klaxon change brusquement de hauteur pendant le croisement. La raison en est purement physique.

Chaque impulsion sonore du Klaxon nous arrive en un temps

$$t = \frac{\text{distance entre la locomotive et nous}}{\text{vitesse du son dans l'air}}$$

Lorsque la locomotive s'approche, ce temps diminue : en une seconde, il nous est arrivé davantage d'impulsions sonores que si la locomotive ne s'était pas approchée. La fréquence des impulsions est plus élevée, autrement dit le Klaxon est plus aigu. A l'inverse, il est plus grave lorsque la locomotive s'éloigne. Il suffit d'avoir une bonne oreille pour connaître la vitesse du train !

3.3. Le vibrato

Le vibrato est une modulation oscillante de la fréquence d'un son. Il est possible d'entendre les oscillations jusqu'à 6 ou 7 par seconde ; si leur fréquence augmente, elles se fondent en une hauteur fixe dans le son, qui paraît plus « riche », plus intense. En augmentant encore la fréquence des oscillations, le son chevrote.

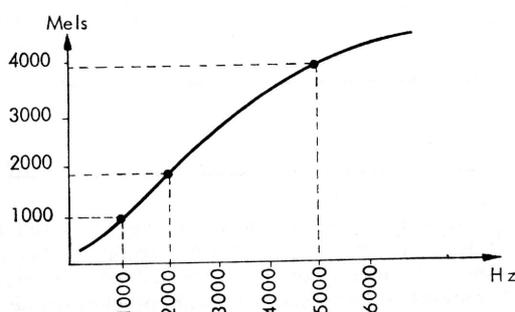
Ce phénomène est lié au temps de récupération des cellules ciliées : les cellules ont le temps de récupérer entre deux modulations lentes : les influx nerveux arrivent « sans perte » au cerveau. A l'inverse, un son fixe ou un vibrato trop rapide fatiguent les cellules ciliées, ce qui crée une impression d'agacement.

4. Paramètres de la perception de la hauteur

4.1. Relation exacte entre hauteur et fréquence

Il serait tentant de penser que l'octave perçue coïncide toujours avec l'octave physique, c'est à dire à un doublement de fréquence : deux notes dont l'une a une fréquence double de l'autre ont de nombreuses harmoniques en commun, donc doivent être consonantes.

Des expériences ont montré que si c'était le cas pour des sons correspondant à un bon pouvoir séparateur de l'oreille (entre 150 et 1500 Hz environ), l'oreille a tendance à « élargir » les octaves vers le grave ou vers l'aigu. Ainsi, on entend l'octave supérieure d'un son pur de 2000 Hz à 4600 Hz, et l'octave inférieure d'un son pur de 100 Hz à 45 Hz.



Le Mel corrige le Hertz en tenant compte de l'élargissement des octaves perçues : un son de 6000 Mels sonne à l'octave d'un son de 3000 Mels. La représentation ci-dessus fait apparaître la différence entre octave perçue et octave physique : on entend l'octave d'un son de 2000 Hz (=1800 Mels) à 3600 Mels=4600 Hz

Toutefois, un son grave ayant des harmoniques dans la zone « sensible » de l'oreille sera moins sujet à ce phénomène. Pour les sons aigus, un autre élément rentre en compte : les harmoniques de tels sons disparaissent de la zone audible des fréquences, la consonance de deux sons aigus est donc plus difficile à discerner.

Les accordeurs de pianos connaissent bien ce phénomène et accordent les pianos avec des intervalles « élargis » dans l'aigu et dans le grave.

4.2. Hauteur et harmoniques

Si la hauteur d'un son est liée à la fréquence de son fondamental, elle dépend aussi de celles de ses harmoniques. Ceci explique comment Jean-Claude Risset a pu créer un son qui monte et descend simultanément (une illustration sonore pourra être trouvée dans [P]).

L'illusion provient de ce que la fréquence du fondamental descend alors que l'intensité des harmoniques aigus augmente, ce qui donne un son plus « brillant » mais plus grave.

La sensation de hauteur semble en fait être un équilibre entre celle qui provient du fondamental et celle qui provient des harmoniques (ou des partiels). Ceci explique pourquoi certains musiciens âgés entendent les sons faux : ils sont moins sensibles aux partiels aigus, et les sons riches en harmoniques leur paraissent trop graves.

4.3. Influence de la durée sur la sensation de hauteur

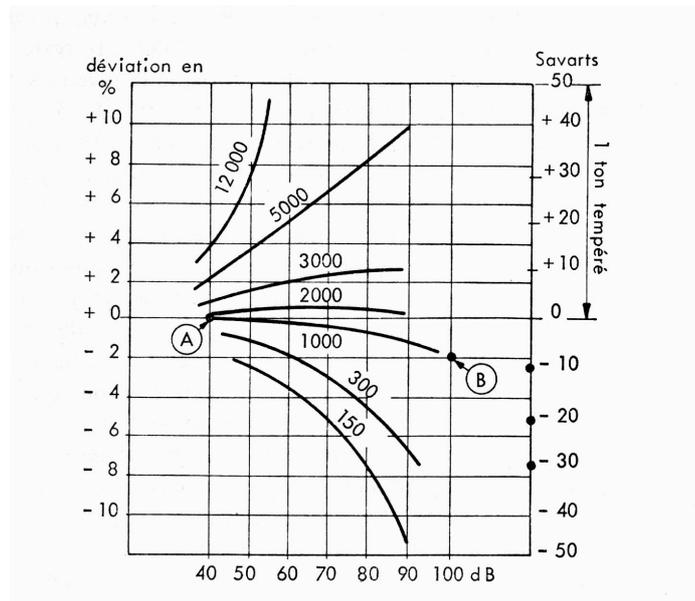
Dans un état de fatigue, les sons nous paraissent souvent trop aigus, trop rapides, ils nous « agressent ». A l'inverse, dans un état d'excitation, ils nous paraissent « mous », sans dynamisme.

Ce phénomène est lié à la différence existant entre temps physique et temps psychologique. En état de fatigue par exemple, une seconde psychologique dure plus longtemps qu'une seconde physique : les sons passent plus rapidement et les fréquences paraissent plus élevées (car nous entendons davantage d'oscillations par seconde).

C'est particulièrement perceptible chez les personnes ayant l'oreille absolue, qui selon leur état nerveux donnent un « la » un peu au dessus ou en dessous du diapason.

4.4. Influence de l'intensité sur la sensation de hauteur

Des expériences montrent que les sons purs aigus paraissent encore plus aigus lorsque leur intensité augmente, tandis que les sons graves paraissent encore plus graves.



Courbes d'égale hauteur perçue en fonction de l'intensité. Les intervalles de déviation et la puissance sonore sont mesurées par deux unités logarithmiques, le Savart (50 Savarts = 1 ton tempéré) et le décibel (dB). La fréquence de référence (en Hz) est indiquée sur les courbes

Ce phénomène est moins net pour des sons graves comportant des harmoniques, car la hauteur du fondamental diminue tandis que celle des harmoniques augmente.

5. Hauteur et procédés électroniques

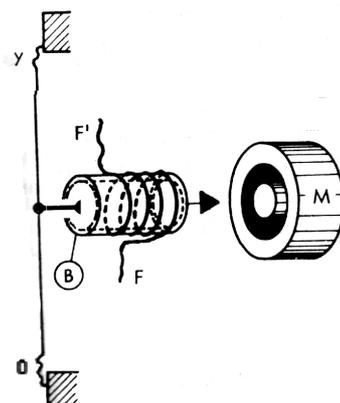
5.1. Capter une hauteur : le microphone

Le principe du microphone est de transformer une énergie acoustique (vibrations de l'air) en énergie électrique, qui pourra alors être amplifiée et reconstituée. Nous décrivons uniquement le fonctionnement du microphone électrodynamique, le plus utilisé actuellement. Pour les autres mécanismes, on pourra se référer à [L].

Le principe est le suivant : l'onde sonore fait vibrer une membrane (dont les bords sont ondulés pour plus de souplesse) selon ses propres composantes de fréquence.

Cette membrane est reliée à un cylindre en carton autour duquel est enroulé un fil électrique très fin (un **solénoïde**).

Celui-ci (B) peut se déplacer d'avant en arrière entre les bornes d'un aimant permanent (M) de forme adaptée, ce qui modifie le champ magnétique entre le solénoïde et l'aimant permanent, et crée dans les spires du solénoïde un courant induit proportionnel à la variation du champ.



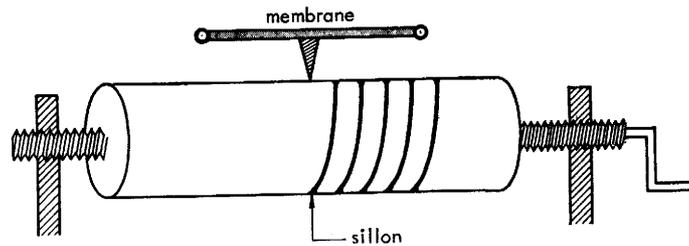
Le microphone électrodynamique

Si le solénoïde est attiré et repoussé de l'aimant permanent un certain nombre de fois par seconde, le courant induit change de signe avec la même fréquence : le mouvement acoustique a été transformé en signal électrique alternatif.

5.2. Enregistrer une hauteur

5.2.1. Le phonographe

Le phonographe est l'ancêtre du disque vinyle et leurs fonctionnements sont similaires. Toutefois, la fabrication d'un disque vinyle fait intervenir de nombreuses étapes (fabrication du père, de la mère, presse, argenture, laque) qui n'aident pas à comprendre son principe (qui est décrit dans [L]).



Principe du phonographe

Le phonographe comporte un rouleau de cire monté sur une vis reliée à une manivelle. Une pointe solidaire d'une membrane est en contact avec le rouleau en rotation.

Pour enregistrer un son, on choisit une pointe de matière dure. Le son fait vibrer la membrane, qui entraîne dans son mouvement la pointe qui grave dans le rouleau un sillon hélicoïdal. Si par exemple le son est pur de fréquence 220 Hz, en une seconde la membrane est comprimée 220 fois et la pointe grave 220 « trous » dans le sillon.

Pour relire ce son, on utilise une pointe plus souple solidaire d'une membrane qui suit toutes les aspérités du sillon. Si par exemple celui-ci comporte 220 trous par seconde de lecture, la membrane est déplacée 220 fois par seconde et produit une onde sonore de 220 Hz, qui peut alors être amplifiée par un cornet.

Les limites du phonographe sont multiples : tout d'abord, la cire s'use vite et n'est pas assez plastique pour permettre de graver de hautes fréquences. Ensuite, la manivelle produit des « pleurages » si elle n'est pas tournée régulièrement.

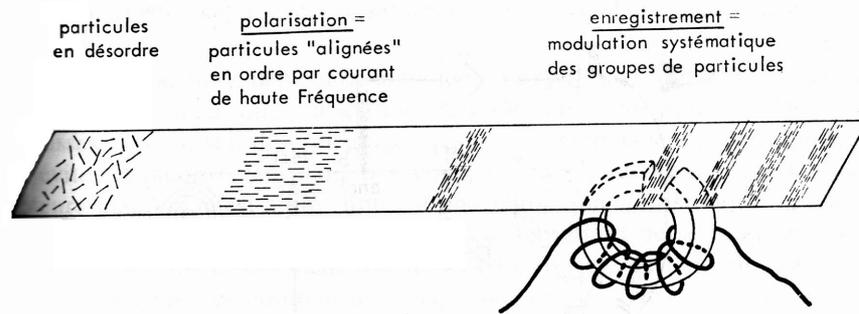
Le phonographe a été progressivement remplacé par le disque vinyle, puis par le disque compact. En parallèle s'est développé le magnétophone, qui selon les mélomanes possède une qualité, une chaleur supérieures à celles du disque compact.

5.2.2. Le magnétophone

Un enduit contenant de fines particules d'oxyde ferrique sont disposées sur une bande de matière plastique, puis polarisées dans le sens de la bande par un électroaimant (solénoïde « arrondi ») parcouru par un courant de haute fréquence. Il est ensuite possible d'enregistrer ou de lire la bande magnétique.

- Enregistrement : Un électroaimant, la tête d'enregistrement, possédant un entrefer très étroit, est disposé de part et d'autre de la bande qui défile. A chaque impulsion électrique, les particules situées entre les entrefers se polarisent perpendiculairement à la bande dans une direction déterminée par l'amplitude et le signe de l'impulsion. Si le courant qui alimente l'électroaimant comporte 220 impulsions par seconde, la bande dénombre 220 traits d'oxyde ferrique par seconde de lecture.

Remarque : le courant induit dans l'électroaimant est exactement du même type que pour le solénoïde du microphone.



Principe du magnétophone

- Lecture : Faisons repasser la bande que nous venons d'enregistrer devant l'électroaimant. En une seconde, le champ de l'entrefer est modifié 220 fois, ce qui crée 220 impulsions de courant induit dans les spires de l'électroaimant. Ce courant peut alors être amplifié et envoyé vers des haut-parleurs.

Nous ne décrivons pas le fonctionnement de l'amplificateur, qui repose sur le principe des transistors (ou des lampes à vide). En revanche, nous pouvons nous demander comment transformer le courant de sortie de impulsions acoustiques : c'est le principe du haut-parleur.

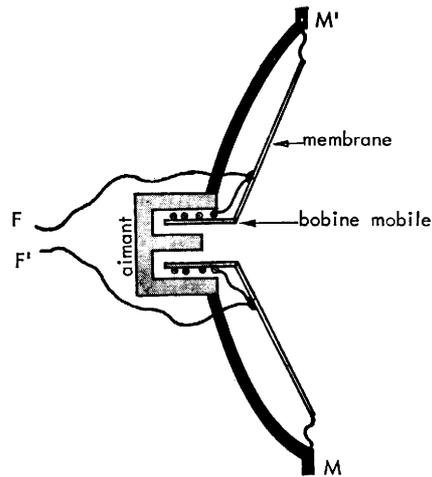
5.3. Restituer une hauteur : le haut-parleur

Un haut-parleur est fondamentalement un microphone qui fonctionne à l'envers. On peut s'en rendre compte en branchant un haut-parleur à la place d'un microphone ou l'inverse : ça fonctionne ! Mal, mais ça fonctionne.

Remarque : le courant induit du microphone et le courant de sortie de l'amplificateur ne sont pas du même ordre de grandeur, cette opération peut donc endommager les appareils et est peu recommandée !

Le courant de sortie de l'amplificateur parcourt les spires d'un électroaimant solidaire à une membrane. Selon le sens du courant, l'électroaimant est attiré ou repoussé vers un aimant permanent, ce qui fait vibrer la membrane. La fréquence des impulsions électriques correspond à celle du son émis.

Des haut-parleurs plus grands sont nécessaires pour restituer plus de basses, en raison des grandes périodes à restituer. De même que pour les microphones, il n'y a pas de haut-parleur universel, chacun répond à des besoins différents.



Coupe de haut-parleur

Les haut-parleurs sont toujours à l'intérieur de caisses de formes variables : les baffles, qui empêchent la production d'interférences au bord de la membrane. En effet, lorsque celle-ci est comprimée, il se produit une dépression derrière elle ; compression et dépression interfèrent alors sur son bord, altérant le son. Les baffles amènent des problèmes spécifiques. En particulier, ils peuvent être des résonateurs pour certaines fréquences ou atténuer le mouvement de la membrane. On adapte alors divers dispositifs, comme des résonateurs couplés ou des trous permettant à l'air de s'échapper rapidement.

6. Hauteur et instruments de musique

6.1. Instruments à cordes

La découverte du lien entre intervalle musical et longueur de corde vibrante est attribuée à Pythagore.

Une corde tendue produit un son lorsqu'on la pince (si la tension est suffisante !) En immobilisant cette corde successivement en son milieu, son tiers, son quart, son cinquième et son sixième, puis en pinçant à chaque fois la partie de la corde la plus longue, Pythagore obtint une suite de sons définissant successivement une octave, une quinte, une quarte, une tierce majeure et une tierce mineure avec le son produit par la corde seule. Cette découverte est à l'origine de la gamme pythagoricienne, basée sur les quintes « pures ».

Plus généralement, la fréquence f émise par la corde dépend de sa longueur selon la loi

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} L \text{ est la longueur de la corde} \\ T \text{ est sa tension} \\ M \text{ est sa masse linéique} \end{array}$$

Remarques :

- cette relation ne tient pas compte de certains paramètres, comme la raideur ou l'inhomogénéité de la corde (particulièrement importante pour les cordes en boyau) ; elle permet toutefois de comprendre le comportement global de la fréquence produite par la corde.
- associée aux observations de Pythagore, elle permet d'établir un parallèle entre le rapport des fréquences de deux sons et l'intervalle qu'ils constituent :

Rapport	1/2	2/3	3/4	4/5	5/6
Intervalle	octave	quinte	quarte	tierce majeure	tierce mineure

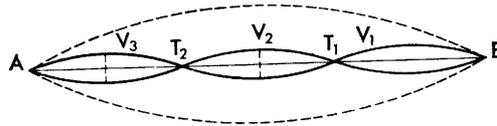
Il est à noter que les intervalles sont de moins en moins consonants à mesure que les fractions correspondantes se « compliquent ». Voir le paragraphe 3.1.2 Les harmoniques communes.

Dans un violon, ces trois paramètres ont une importance. On modifie la tension d'une corde pour accorder l'instrument à vide ; les doigts de la main gauche réduisent la longueur de la corde pour émettre différentes notes. Enfin, les cordes sont de plus en plus épaisses (donc de masse linéique plus élevée) à mesure que l'on descend dans le grave.

La guitare ne permet pas quant à elle de faire varier L continûment ; elle dispose en effet de barettes séparant les demi-tons, qui facilitent la justesse du jeu mais empêchent certains effets de « glissando ».

Les violonistes peuvent produire des notes très élevées grâce aux harmoniques effleurés. Pour les produire, ils posent très légèrement le doigt sur la corde à un endroit très précis

(la moitié, le tiers ou le quart de la corde par exemple). Le point de contact est immobilisé, ce qui empêche la corde de vibrer à vide, mais le doigt n'est pas assez enfoncé pour jouer une note « normale ». La corde se divise en deux, trois fuseaux ou plus - selon le point de contact - qui vibrent indépendamment les uns des autres. Ces différentes façons de vibrer de la corde constituent ses **modes de vibrations**. Les sons obtenus ont une fréquence proche des premiers harmoniques de la corde jouée à vide et ne sont pas sans rappeler certains instruments à vent !



Modes de vibration d'une corde

6.2. Instruments à vent

6.2.1. Instruments « traditionnels »

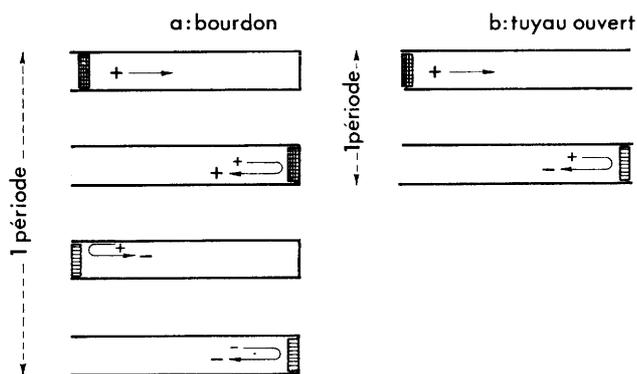
Les instruments à vent possèdent en général un **résonateur tubulaire** relié à un **excitateur** à anche ou à bouche. Leur hauteur peut avoir deux origines (qui peuvent se combiner dans certains instruments comme la trompette) :

- En général, le tuyau impose sa vibration à l'excitateur. De même que pour les cordes, il peut avoir plusieurs modes d'excitation.
- Pour certains instruments à anche rigide, l'anche impose sa vibration propre au tube. C'est le cas de l'appareil phonatoire humain, que nous étudierons dans la section suivante.

Parmi les tuyaux cylindriques, on distingue deux types de tuyaux : les tuyaux ouverts (ouverts aux deux extrémités) et les tuyaux fermés, ou bourdons (fermés à une extrémité, ouverts à l'autre).

Lorsqu'une onde de compression atteint une extrémité ouverte d'un tuyau, elle « sort » du tuyau, créant une onde de dépression dans le tuyau, qui se propage en sens inverse de l'onde de compression. En revanche, lorsqu'elle atteint une extrémité fermée, elle est réfléchiée sans changer de nature.

Pour revenir à son état initial, c'est à dire pour effectuer une période, l'onde parcourt donc quatre fois le tuyau s'il est fermé, deux fois s'il est ouvert.



Période d'une onde : a) dans un tuyau fermé b) dans un tuyau ouvert

Si on note c la vitesse du son et L la longueur du tuyau, la fréquence d'émission est donc $f = \frac{c}{4L}$ pour un tuyau fermé et $f = \frac{c}{2L}$ pour un tuyau ouvert (formules de Bernoulli).

Dans la pratique, à part les bourdons et les flûtes de Pan, les tuyaux d'instruments à vent ne sont ni ouverts ni fermés : l'anche ou le biseau de l'embouchure forment une demi-ouverture. De plus, d'autres paramètres interviennent : la forme exacte du tuyau, le matériau utilisé etc. Ces formules permettent toutefois de comprendre comment modifier la hauteur du son :

- en soufflant plus ou moins fort, c'est à dire en modifiant la vitesse du souffle (pour de petits intervalles de hauteur)
- en changeant la longueur du tuyau : c'est bien sûr le cas du trombone à coulisse, mais aussi de la trompette à pistons et des instruments à trous

En soufflant encore plus fort, il apparaît un phénomène similaire à celui vu ci-dessus pour les instruments à cordes : la colonne d'air présente dans le tube se divise en deux, trois, parfois plus, fuseaux qui vibrent indépendamment les uns des autres ; leur fréquence de vibration est respectivement proche du premier ou du deuxième harmonique du son obtenu normalement. Ainsi, une flûte donnera successivement l'octave et la douzième de la note initiale ; le saxophone dispose d'une clé facilitant le passage à l'octave, la clarinette le passage à la douzième.

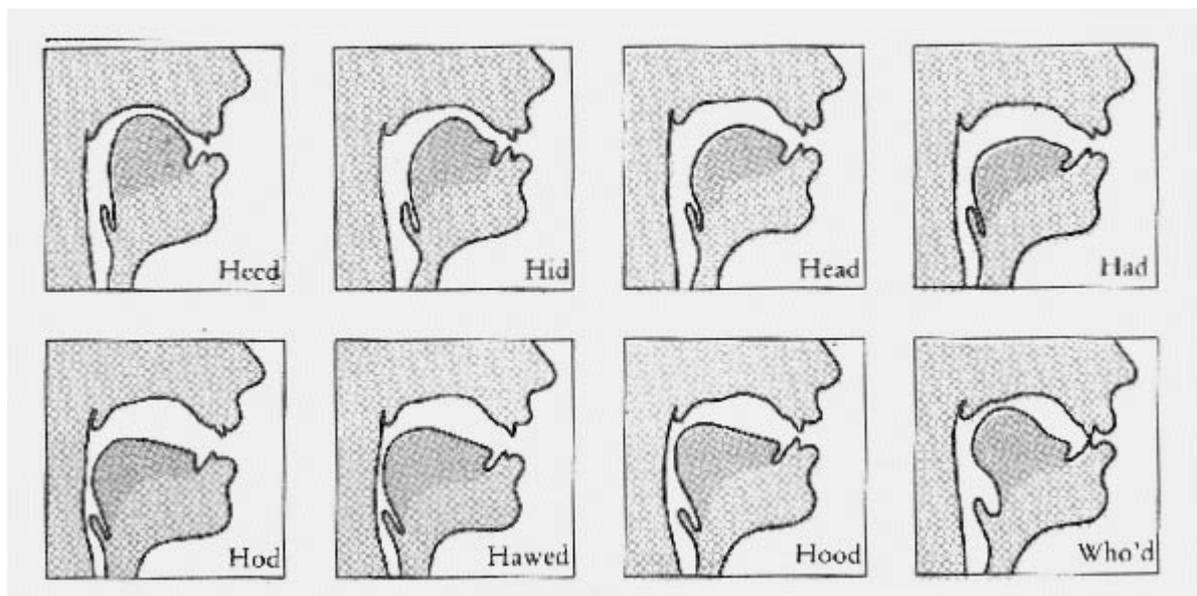
6.2.2. L'appareil phonatoire humain

La complexité de l'appareil phonatoire humain n'a rien à envier aux instruments de musique traditionnels ! Il peut être grossièrement assimilé à un instrument à anches – les cordes vocales – couplé à un résonateur qui s'étend des narines au pharynx.

Lorsqu'elles sont utilisées, les cordes vocales déterminent la hauteur du son ; dans le cas contraire, c'est l'un des rôles du résonateur. Celui-ci est constitué du pharynx, des deux cavités buccales séparées par la langue et de la cavité nasale. Les cavités sont de forme modifiable et communiquent entre elles par des ouvertures réglables.

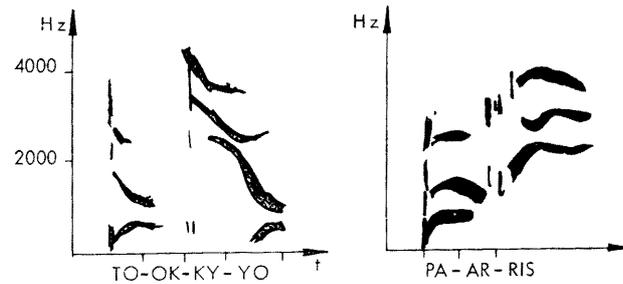
Cette grande souplesse nous permet de prononcer une grande quantité de phonèmes, que l'on peut regrouper en trois catégories :

- les explosions : ce sont les sons comme g-, t-, les -r français ou espagnols : une certaine quantité d'air est mise sous pression puis libérée soudainement.
- les sons filés sans cordes vocales : c'est le cas des ch-, s-, f- et des voyelles chuchotées. Le souffle, bruit blanc qui contient un grand nombre de fréquences, fait entrer les cavités en résonance ; la forme des cavités détermine le son émis. C'est ce mécanisme qui nous permet de distinguer les voyelles à hauteur fixe.
- les sons filés avec cordes vocales : c'est le cas des j-, m-, on- ainsi que des voyelles non chuchotées. La pomme d'Adam, lorsqu'elle se déplace de haut en bas, tend les cordes vocales qui vibrent sous l'action du souffle.



Forme des cavités de l'appareil phonatoire dans la prononciation des différentes voyelles anglaises

Ainsi le sonagramme d'un son parlé est typiquement constitué de courts transitoires, les explosions, et de traits larges ou fins selon que le son est chuchoté ou murmuré. Le trait le plus bas donne la « note » du son.



Sonagrammes de Tokyo et Paris prononcés à voix haute

6.3. Les instruments à percussion

Malgré leur fonction principalement rythmique, certains instruments à percussion ont une hauteur bien définie, qu'il est possible de régler.

6.3.1. Instruments à membrane

Plusieurs paramètres sont réglables :

- la surface de la membrane : plus elle est importante, plus le son est grave
- la tension de la membrane ; pour certaines timbales, ce procédé permet de monter le son d'une quinte
- le matériau : plus il est élastique, plus le son est grave. Les masses situées au centre de la membrane des tablas indiennes permettent d'obtenir un son plus grave
- l'endroit où l'on frappe la membrane ; le bord donne un son plus aigu que le centre
- la force avec laquelle on frappe.

6.3.2. Instruments à plaques

Seule la cloche est intéressante du point de vue de la hauteur, les autres instruments à plaques n'ont pas des hauteurs précises (un choc contient en général toutes les composantes de fréquence).

Les cloches graves sont extrêmement lourdes ; une cloche donnant un ut_2 pèse 23 tonnes. Le paramètre sous-jacent est la masse volumique. Pour émettre des sons de grande amplitude à cette fréquence, de grandes dimensions sont évidemment nécessaires.

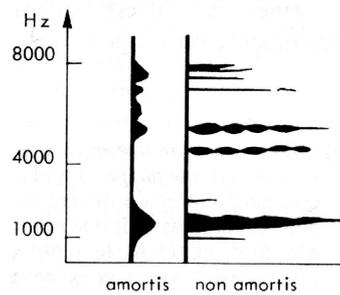
Pour modifier la hauteur du fondamental de la cloche et de ses partiels, on modifie sa forme en enlevant des copeaux de métal ici et là.

6.3.3. Instruments « en pavés » dont les trois dimensions sont comparables

Un tel instrument peut être excités de quatre façons différentes.

La première méthode est de donner un coup sec sur une des trois faces ; plus la surface sur laquelle on frappe est grande, plus le son est grave. Les xylophones par exemple sont constitués de bâtons de longueurs différentes.

La deuxième possibilité est d'en frapper le coin. En fait, ces quatre vibrations sont toujours excitées en même temps, comme le montre le sonagramme ci-dessous.



Conclusion

La hauteur des sons est un phénomène beaucoup plus complexe qu'il n'y paraît de prime abord ! Sa complexité et son intérêt proviennent du fait qu'elle est indissociable de sa perception : non seulement elle met en jeu des mécanismes d'une grande complexité (dans le cerveau entre autres, dont on ne sait pas grand chose), mais elle varie d'un individu à l'autre.

Il en va de même des autres caractéristiques du son et c'est à regret que j'ai décidé de ne pas en parler : chacune d'entre elles aurait mérité un rapport à part !

Bibliographie

[L] LEIPP (Emile) : *Acoustique et musique*, quatrième édition, Masson, 1996.

Un EXCELLENT livre comportant des informations nombreuses et précises sur les sons et leur perception, les instruments de musique et les procédés de lutherie, l'électroacoustique et l'acoustique des salles. Un bémol toutefois : la partie électroacoustique aurait mérité des renseignements plus récents (la première édition date de 1971).

[P] PIERCE (John) : *Le son musical ; musique, acoustique et informatique*, Pour la science, diffusion Belin, 1996.

Un bon livre de vulgarisation abondamment illustré sur les caractéristiques des sons et leur perception. Une partie très intéressante est réservée aux illusions sonores, dont la plupart ont été gravées sur le CD inclus.