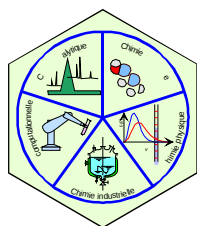




Département
Abteilung



de chimie
Chemie

1.

La voix



Maria Callas

Projet de fin d'année

Professeur(s) : Ecoffey Georges
Etudiants : Farine Elise
Date : 26.05.2019

1. Table des matières

1.	Table des matières	2
2.	Histoire du langage	3
3.	Formation de la voix humaine	3
3.1.	La source d'énergie : l'appareil vocal subglottique.....	4
3.2.	L'oscillateur : le larynx	4
3.3.	Le résonateur : l'appareil vocal supraglottique	6
4.	Le son musical.....	6
4.1.	Phénomène physique :	7
4.1.1.	Les ondes stationnaires.....	7
4.1.2.	Les formants.....	8
4.1.3.	les voyelles et les consonnes	10
4.1.4.	La rétroaction.....	12
4.1.5.	La voix diphonique	13
4.2.	Aspect artistique.....	13
4.2.1.	la respiration.....	13
4.2.2.	le placement de la voix.....	14
4.2.3.	audibilité des chanteurs classiques.....	15
4.2.4.	les registres	15
4.2.5.	la classification tonale des voix	16
4.2.6.	la voix et la phonation	17
4.2.7.	les différentes formes de voix chantées.....	17
5.	L'oreille	19
5.1.	anatomie.....	20
5.2.	les cellules ciliées	21
5.2.1.	les cellules ciliées internes	22
5.2.2.	les cellules ciliées externes.....	22
5.3.	les lésions	23
6.	Gammes et théorie musicale	24
6.1.	Les notes et les rapports.....	25
6.1.1.	Les notes.....	25
6.1.2.	Les rapports	25
6.1.3.	L'octave.....	27
6.1.4.	La quinte.....	27
6.1.5.	La quarte.....	28
6.2.	Fabrication d'une gamme	28
6.3.	Défaut de la gamme naturelle.....	29
6.3.1.	Calcul du rapport entre les fréquences d'un demi-ton.....	29
6.3.2.	Fréquences des notes de la gamme tempérée	29
6.4.	Un peu de vocabulaire.....	30
6.4.1.	Le nom des notes.....	31
6.4.2.	Le nom des accords.....	31
6.5.	Bilan	32
7.	Conclusion.....	33
8.	Bibliographie.....	33

2. Histoire du langage

D'après de nombreux scientifiques, le langage n'est pas une invention de l'Homme, il serait inné chez l'enfant. Le langage serait la réponse à une stimulation.

Il existe deux sortes de langage : le primitif (sans ordre des mots et sans grammaire) et le syntaxique, celui que nous utilisons. Pour illustrer cette différence, les enfants sauvages, isolés des humains durant les premières années de leur vie, ont un langage qui ne dépasse pas celui d'un enfant de deux ans. Seulement, il ne pourra plus évoluer. Le passage entre le langage primitif et syntaxique a lieu grâce à un événement génétique encore inconnu et s'effectue dans les toutes premières années de la vie.

Nous constatons alors que la physiologie de l'homme a beaucoup évolué par rapport aux animaux. C'est cette différence qui nous permet de parler.

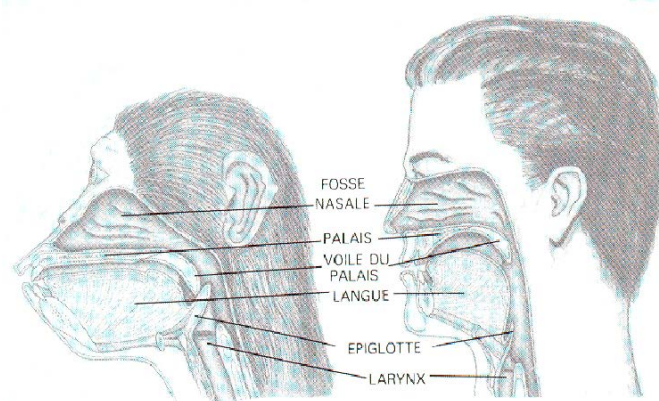


Figure 1:anatomie homme-animal

La différence majeure se situe au niveau de la distance entre l'épiglotte et le voile du palais. Chez l'animal, cette distance est nulle, ce qui forme une cloison étanche. Par contre, chez l'homme, elle est de 8 cm environ. Ceci explique que nous sommes incapables de respirer et de boire en même temps. En effet, lors de la respiration, l'épiglotte est soulevée pour permettre à l'air de passer dans les poumons. Ainsi, si on boit en même temps, le liquide traverse le larynx et c'est très douloureux, donc instinctivement impossible.

L'augmentation du risque d'étouffement est compensée par l'amélioration des sons du langage.

3. Formation de la voix humaine

L'appareil vocal est un instrument qui se compose d'une source d'énergie (les poumons), d'un oscillateur (les cordes vocales) et d'un résonateur (le larynx, le pharynx et la bouche).

3.1. La source d'énergie : l'appareil vocal subglottique

Le rôle principal des poumons est de produire un excès de pression et de créer ainsi un flux d'air. L'air passe par la glotte située à la base du larynx, entre les cordes vocales.

En fait, les poumons ne sont pas les seuls organes intervenant dans la formation du flux d'air. Les muscles de la cage thoracique, de l'abdomen, du dos et de la poitrine participent également dans la puissance de la voix. Les muscles peuvent augmenter la pression abdominale, et repousser le diaphragme vers le haut ou abaisser les côtes et le sternum, de sorte que les dimensions de la cage thoracique diminuent.

Lors de la phonation, le débit aérien est de l'ordre de 3 à 7 l/min, à une vitesse de 1 m/s.

3.2. L'oscillateur : le larynx

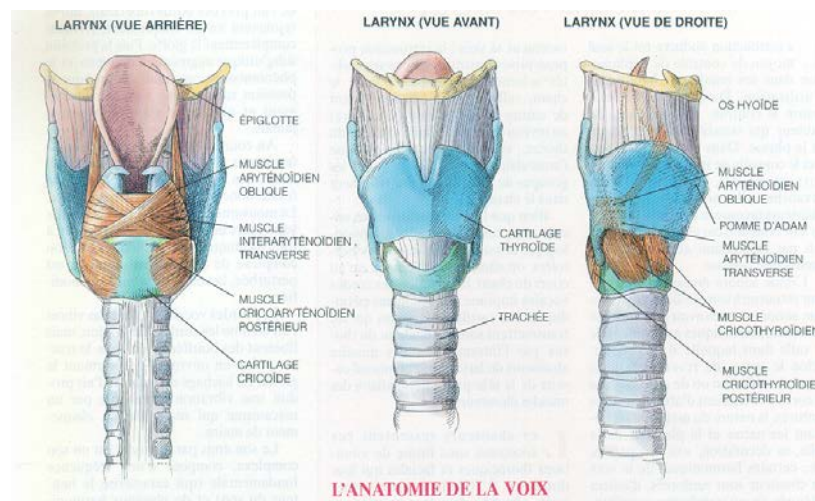


Figure 2: anatomie du larynx

Le larynx comprend plusieurs éléments : un squelette cartilagineux, des muscles et une muqueuse.

Squelette cartilagineux : composé de cartilage thyroïde, cartilage cricoïde et deux cartilages aryténoïdes qui sont les composants principaux du squelette laryngé.

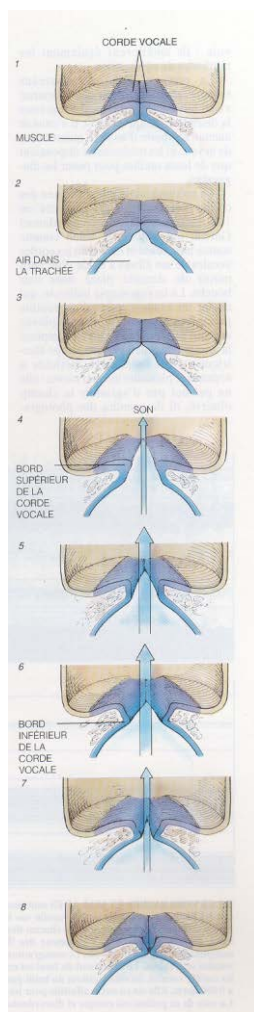
Muscles : composés de muscles extrinsèques, qui relient les différents cartilages aux structures anatomiques environnantes et de muscles intrinsèques qui les relient entre eux. Une paire de muscles intrinsèques s'étend des cartilages aryténoïdes jusqu'à l'intérieur du cartilage thyroïde. Ces muscles thyro-aryténoidiens constituent le corps des **cordes vocales**. Ces dernières sont longues de

18 à 24 mm chez l'homme, de 12 à 18 mm chez la femme.

Les muscles intrinsèques peuvent modifier la position relative des cartilages, ce qui change aussi la forme, la position et la tension des cordes vocales qui y sont attachées.

Si la glotte est fermée et que les poumons envoient un flux d'air, la forte pression qui règne au-dessous du niveau de la glotte force les cordes vocales à se séparer ; l'air passant entre les cordes vocales engendre une force de Bernoulli (une diminution de pression due à la vitesse de l'écoulement) qui, grâce aux propriétés mécaniques des cordes, les ferme presque instantanément. La pression augmente alors à nouveau, séparant les cordes vocales et ainsi de suite.

Ce cycle ouverture-fermeture des cordes vocales envoie un train de bouffées d'air dans le conduit vocal. La fréquence de vibration dépend de la pression de l'air dans les poumons et des propriétés mécaniques des cordes qui sont commandées par de nombreux muscles laryngés. En général, plus la pression de l'air dans les poumons est forte, plus les cordes vocales sont amincies et tendues et plus haute est la fréquence de vibration de ces cordes.



A l'attaque du son, les deux cordes vocales sont en contact, et la glotte est fermée. Lorsque les poumons expulsent l'air qu'ils contiennent, la pression sous la glotte augmente, écarte progressivement les cordes vocales en les poussant de bas en haut, vainquant les forces élastiques qui s'opposent à leur ouverture, et finit par ouvrir la glotte, à travers laquelle l'air s'engouffre. Comme nous l'avons vu, en raison de l'effet Bernoulli, le flux aérien réduit la pression de l'air au bord des cordes vocales, ce qui tend à les refermer. Simultanément, la pression de l'air sous la glotte diminue dès que celle-ci s'ouvre pour laisser passer l'air. Ainsi, la partie inférieure des cordes vocales se ferme presque immédiatement, tandis que les bords supérieurs sont encore séparés.

Figure 3 : cycle ouverture-fermeture des cordes vocales

3.3. Le résonateur : l'appareil vocal supraglottique

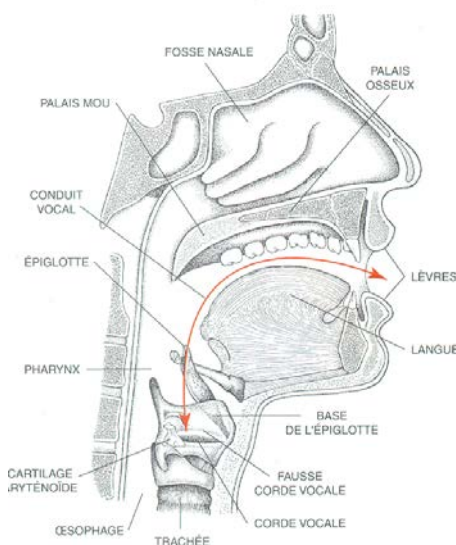


Figure 4: coupe transversale de l'appareil vocal supraglottique

Lorsque les cordes vocales vibrent, elles ne libèrent que des bouffées d'air ce qui, dans l'ensemble, apparaît comme un bourdonnement. Mais celui-ci résonne tout au long du conduit vocal (ou tractus vocal) supraglottique situé entre les cordes vocales et les lèvres.

Ce conduit comprend les cavités pharyngales, buccales et nasales. Le son y est non seulement modifié, mais aussi amplifié (cf.4.1.1.)

Enfin, le système nerveux contribue à la production de la voix, parce que l'idée des sons naît dans le cortex cérébral. Donc, pour émettre un son, il faut tout d'abord le vouloir !

4. Le son musical

Nous allons maintenant nous attarder sur la qualité de la voix émise par un chanteur. Nous analyserons tout d'abord le phénomène physique de l'émission d'un son, puis le caractère artistique du chant.

4.1. Phénomène physique :

Le son émis par le larynx est un son complexe, composé d'une fréquence fondamentale (qui caractérise la hauteur d'un son) et de plusieurs harmoniques ou partiels, de fréquences supérieures.

La fréquence est mesurée en hertz et correspond au nombre de cycles d'ouverture et de fermeture de la glotte en seconde.

4.1.1. Les ondes stationnaires

Lorsqu'une onde se propage dans un milieu limité, elle est réfléchiée aux limites de ce milieu (écho). L'onde réfléchiée interfère avec l'onde incidente. C'est le cas avec les instruments à cordes et à vent.

Si les dimensions du milieu dans lequel se propage l'onde correspondent à un certain multiple de la longueur d'onde, il y a apparition d'ondes stationnaires. Cette onde particulière est composée de nœuds de vibration (endroits où l'onde réfléchiée interfère de manière destructive avec l'onde incidente) et de ventres de vibration ou antinœuds (endroits où les deux ondes interfèrent de manière constructive). On explique aussi les termes de nœuds et d'antinœuds d'une autre manière : les endroits où les molécules parcourent la plus grande distance pour maintenir la pression constante (nœuds) et les endroits où la pression subit ses plus grandes fluctuations, donc dans lesquels les molécules sont les plus immobiles (antinœuds).

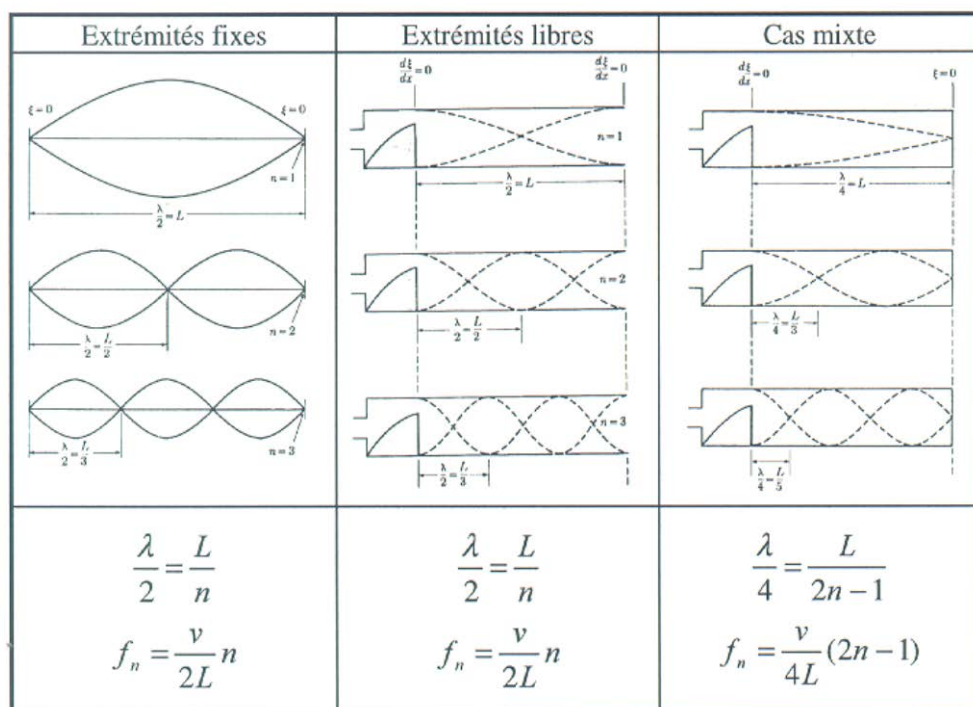


Figure 5 : spectre d'ondes stationnaires (proportionnalité entre la longueur d'onde λ et la longueur du milieu L)

La première fréquence du spectre ($n=1$) est appelée la fondamentale, les suivantes sont appelées les harmoniques.

Les ondes stationnaires du conduit vocal sont baptisées des formants.

4.1.2. Les formants

Bien que les cordes vocales produisent de nombreux sons, c'est le conduit vocal qui transforme les sons bruts en langage et en musique.

Etant donné que le conduit vocal est un résonateur, il est capable de produire différentes fréquences de résonance appelées **formants** (ondes stationnaires). Les sons sortants des cordes vocales dont la fréquence est égale à une des fréquences de résonance du conduit sont émis avec une intensité plus forte ; plus l'écart de fréquence entre un son et une résonance est grand, plus l'émission du son est faible. Le conduit vocal a quatre ou cinq fréquences de résonance importantes (formants). Des fréquences de formants spécifiques apparaissent sous forme de pics dans le spectre des sons émis et cette combinaison de pics de forte intensité caractérise les divers sons de la voix. Les fréquences des formants sont fixées par la forme du conduit vocal. Les quatre premiers formants seraient proches de 500, 1500, 2500 et 3500 hertz.

Chaque formant est associé à une onde stationnaire, c'est-à-dire à une répartition géométrique fixe de variation de pression. Ainsi, le formant le plus grave correspond à un quart de longueur d'onde, c'est-à-dire qu'un quart de la longueur d'onde s'ajuste dans le conduit vocal. De la même façon, le second, troisième et quatrième formants correspondent respectivement à $3/4$, $5/4$ et $7/4$ de longueur d'onde.

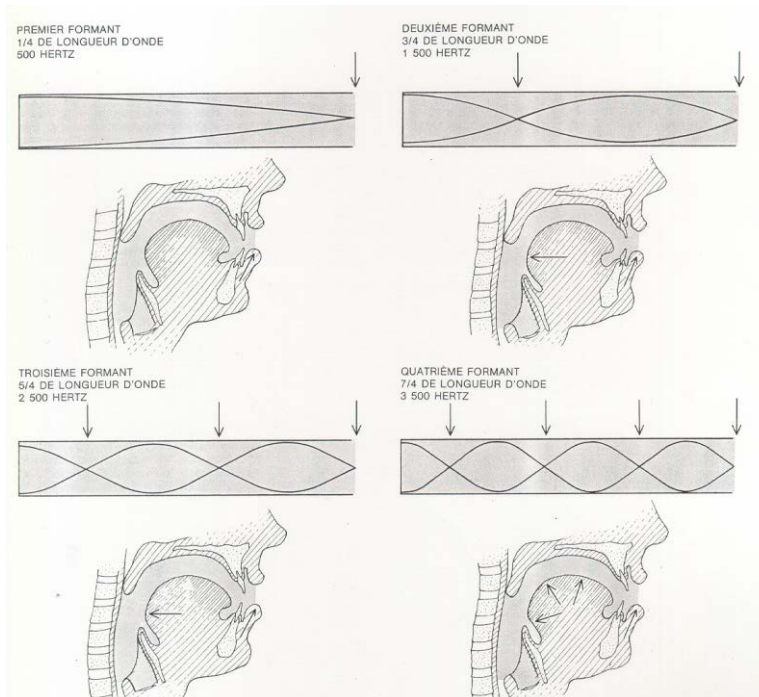


Figure 6 : les quatre des formants

Les déplacements de la langue ou des lèvres augmentent ou diminuent les fréquences de résonance. La fréquence du premier formant est inversement proportionnelle à la hauteur de la langue, donc proportionnelle à l'ouverture de la mâchoire. Celle du second formant est proportionnelle à l'avancement de la langue et celle du troisième formant dépend de la pointe de la langue.

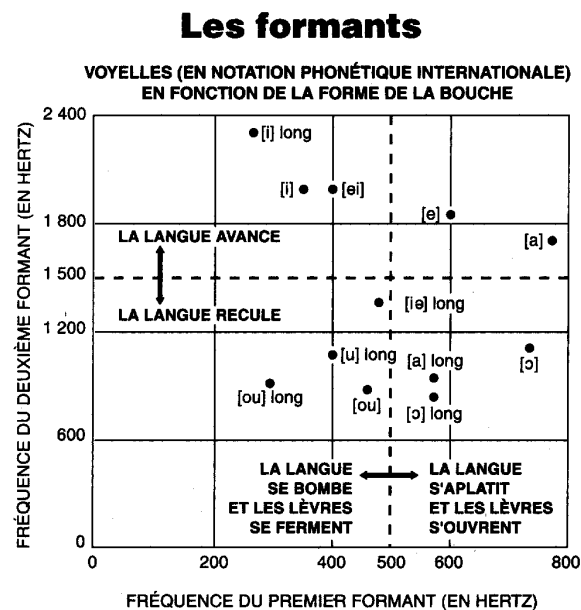


Figure 7 : dépendance entre le placement de la langue et le les formants

Le conduit vocal peut produire un nombre théorique infini de formants, mais les combinaisons des deux ou trois premiers suffisent à expliquer la majeure partie des différences entre les sons des voyelles.

Un formant particulier : le formant-chant

On pourrait penser que pour chanter plus fort, il suffit de renforcer la pression du souffle, donc d'envoyer un flux d'air d'intensité supérieure dans le conduit vocal. Malheureusement, ce phénomène aboutit à une phonation forcée, où l'amplitude de la fréquence fondamentale de la voix reste basse en dépit d'efforts physiques considérables.

Lorsque l'on compare les spectres de l'amplitude en fonction de la fréquence entre la voix parlée et la voix chantée d'un professionnel, on constate l'apparition, dans le deuxième cas, d'un pic entre 2500 et 3000 hertz.

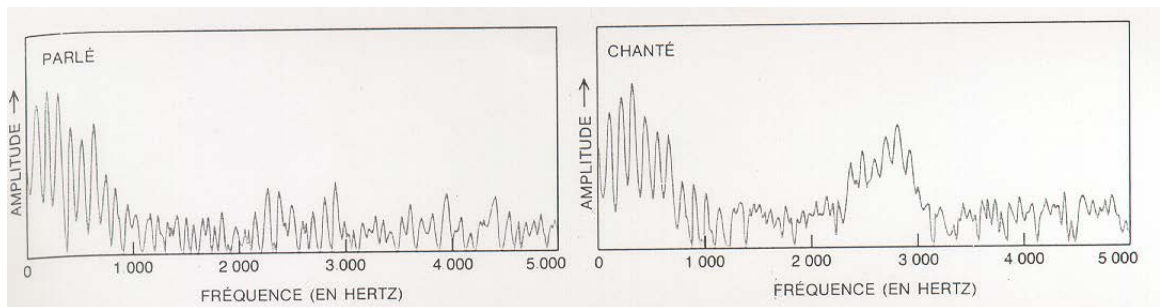


Figure 8 : comparaison entre le spectre d'une voix parlée (gauche) et celui d'un chanteur

Ce pic est appelé formant-chant. Il est produit par les chanteurs pour se faire entendre malgré l'orchestre. Pour le créer, il faut abaisser le larynx car cela dilate le fond du pharynx. La dilatation de la partie la plus basse du pharynx équivaut à une extension de la longueur du conduit vocal et permet ainsi la formation d'une fréquence de résonance entre 2500 et 3000 hertz plus intense que les autres.

Le formant-chant résonne à une fréquence optimale : assez haute pour se situer dans la zone de déclin d'énergie du son de l'orchestre, mais pas trop haute pour sortir de la tessiture maîtrisée par l'interprète. Comme ce formant est produit uniquement par des effets de résonance, il ne demande aucun effort vocal supplémentaire au chanteur.

Mais, en contrepartie, les voyelles s'éloignent considérablement du langage parlé habituel. (cf. 4.2.3)

4.1.3. les voyelles et les consonnes

Les voyelles :

En plus de sa fonction de résonateur, le conduit vocal, grâce à cette qualité qui lui est propre, joue un rôle fondamental dans la formation de la parole. La source sonore peut être glottique et le son laryngien donnera alors naissance aux voyelles qui se distingueront l'une de l'autre par la distribution de leurs harmoniques. Les voyelles sont formées par l'amplification, due au phénomène de résonance, de fréquences fixes du son laryngé. Elles sont *antérieures* ou *postérieures* selon la position de la langue et de la mandibule (mâchoire inférieure), *nasales* ou *orales* en fonction de la position du voile et *labiales* ou non *labiales* selon la forme des lèvres (labiale si les lèvres sont arrondies).

	antérieures		postérieures	
voyelles				
	non labiales	labiales	non labiales	labiales
orales	[i] (riz)	[y] (rue)		[o] (eau)
	[e] (fée)	[ə] (le)		[ɔ] (porte)
	[ɛ] (laid)	[ɸ] (feu)		[ɑ] (pâte)
	[a] (patte)	[œ] (feuille)		
nasales	[ɛ̃] (fin)	[œ̃] (un)		[ɔ̃] (rond)
				[ɑ̃] (tante)

Les consonnes :

La formation des consonnes dépend essentiellement de la position de la langue, du voile, des lèvres et de l'ouverture de la bouche déterminée par les mouvements de la mandibule réglant le degré d'ouverture entre les dents. Toutes les consonnes résultent d'un rétrécissement marqué du conduit vocal, essentiellement de la bouche en des endroits différents, selon la consonne articulée. A l'inverse des voyelles, les sons consonantiques sont ou contiennent des bruits caractérisés par :

le point d'articulation (langue contre lèvres, dents, palais ou voile)

le degré d'ouverture des dents

On distingue :

• *les consonnes orales :*

occlusives ou explosives : formées par un blocage puis une libération brutale de la colonne d'air dans la cavité buccale

	bilabiales	apico-dentales	vélaires
sonores	[b]	[d]	[g]
sourdes	[p]	[t]	[k]

constrictives ou fricatives : formées par le rétrécissement ou le frottement d'air de caractère prolongé et continu à travers le pharynx et la cavité buccale.

	médianes				latérales
	labio dentales	apico-dentales	palatales	vélaires	
sonores	[v] (va)	[z] (zoo)	[ʒ] (jour)	[w] (bois)	[l] (la)
sourdes	[f] (fa)	[s] (son)	[ʃ] (chat)	[r] (rat)	

- *les consonnes nasales* : où le voile abaissé permet le passage d'air par les fosses nasales.

bilabiales	apico-dentales	palatales
[m] (ma)	[n] (nom)	[ɲ] (agneau)

4.1.4. La rétroaction

La rétroaction, dans ce domaine, est le phénomène de pouvoir entendre ce que l'on dit ou chante.

Les nerfs assurent un de ces phénomènes : la rétroaction auditive.

Transmise de l'oreille au tronc cérébral, puis au cortex, elle permet au chanteur d'ajuster le son produit pour le rendre conforme au son désiré. De la même manière, la rétroaction auditive assure, dans la parole, le contrôle des variations de hauteur qui constituent l'intonation de la phrase. Malheureusement, elle ne fournit pas aux chanteurs un moyen de contrôle fiable de leur émission car elle s'effectue à la fois par conduction aérienne et par conduction osseuse. Ainsi, l'onde sonore émise par le chanteur retourne à son oreille par conduction aérienne après avoir été modifiée par les caractéristiques acoustiques de la salle dans laquelle il se produit. Certaines harmoniques du chanteur sont renforcés, d'autres atténués, ce qui transforme complètement le timbre de la voix aérienne.

Par conduction osseuse, on appelle l'onde sonore la voix solidienne. Les vibrations produites par l'appareil phonatoire au cours du chant sont transmises au nerf auditif, au niveau de l'oreille. Le timbre de la voix solidienne, très riche en fréquences graves, restitue au sujet sa propre voix comme si elle avait été filtrée en passe-bas.

Les muscles jouent également un rôle : la rétroaction proprioceptive

La rétroaction proprioceptive d'origine musculaire est un mécanisme encore mal connu ou plutôt difficilement explicable. Les chanteurs développent ce phénomène de manière à pallier la rétroaction auditive, inefficace dans les salles où l'acoustique est mauvaise.

4.1.5. La voix diphonique

C'est le phénomène de pouvoir chanter deux sons à la fois.

Ce chant diphonique est la spécialité des chanteurs Touvas, République située entre la Russie et la Mongolie. Ce peuple stipule que la spiritualité des montagnes et des rivières se manifeste à la fois par leur forme et par leur situation physique, mais aussi par les sons qu'elles émettent naturellement ou en réponse aux sollicitations humaines.

Le premier son est la fondamentale grave, soutenue, semblable au son du bourdon d'une cornemuse. Le second est une série d'harmoniques à une ou plusieurs octaves d'intervalle.

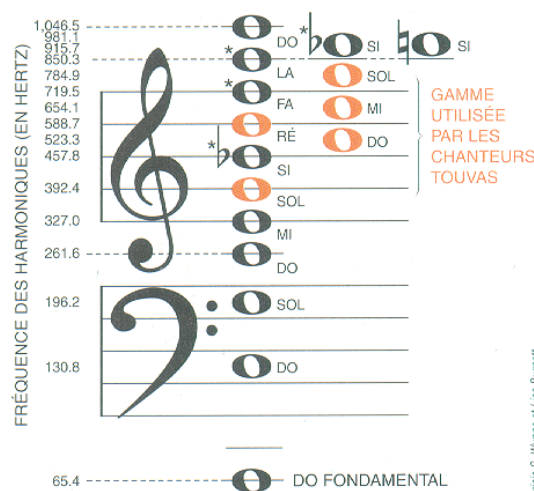


Figure 9 : le fondamental et ses harmoniques

On constate qu'il n'est pas possible de chanter une note avec n'importe quelle autre note. Il existe une suite mathématique entre la fondamentale et les harmoniques (cf.6.1.1).

4.2. Aspect artistique

4.2.1. la respiration

Pour un chanteur classique, la partie de son corps qui est fondamentale est le ventre, lieu du départ du son. Plus précisément, c'est le diaphragme, muscle respiratoire principal, qui doit être maîtrisé afin d'émettre le meilleur son possible. Celui-ci est unique et se situe sous les poumons. Il ferme la cage thoracique à sa partie inférieure et ne laisse le passage qu'à l'œsophage, aux nerfs et aux vaisseaux.

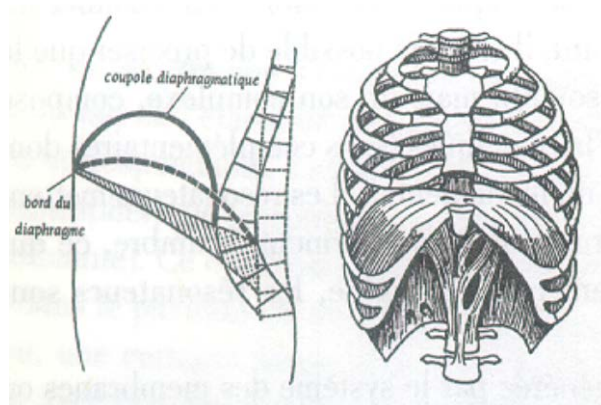


Figure 10 : le diaphragme

Le chanteur, en expirant, abaisse le diaphragme au maximum de manière à rallonger la colonne de son (distance entre le bas du ventre et le palais). En effet, plus celle-ci est longue et plus le son peu résonné. Ainsi, on augmente les possibilités vocales du chanteur.

4.2.2. le placement de la voix

Le "but" du chanteur classique, lorsqu'il émet un son, est de l'amener au niveau du palais mou, situé à l'arrière du palais dur, au fond de la bouche. En visant ce point, le son résonne au maximum dans le corps, ce qui a pour effet l'émission d'un son clair et juste. Pour réaliser ce phénomène, le chanteur entame un bâillement, ce qui permet au palais mou de se soulever, puis émet le son désiré. En réalisant cet exercice, nous constatons que le son résonne dans tout le corps est en plus amplifié.

Pour un chanteur pop, la zone atteinte se situe au niveau du nez. Ainsi, le son est plus faible et peut être légèrement faux car il résonne beaucoup moins dans le corps, donc est plus difficile à ajuster. Les voix bulgares, quant à elle, chantent en visant la gorge, ce qui donne à ces voix un timbre différent.

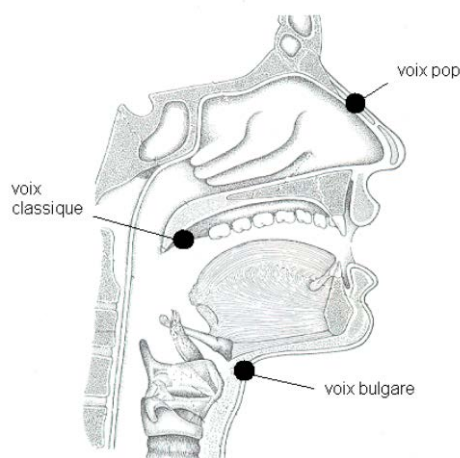


Figure 11 : zones visées par quelques types de voix

Le placement du corps tout entier participe également de manière très active dans la résonance du son dans le corps. On parle d'ailleurs de la colonne du son. Pour que celle-ci soit la plus longue possible, ce qui permettrait au son de résonner encore plus, la tête, par exemple, doit être placée dans le prolongement de la colonne vertébrale, ni trop en avant, ni trop en arrière. Son angle d'inclinaison fait aussi varier la résonance.

4.2.3. audibilité des chanteurs classiques

Lorsque l'on écoute un opéra, il est très difficile de comprendre les paroles.

Un chanteur, pour se faire entendre par-dessus l'orchestre, doit utiliser son formant chant (cf. 4.1.2).

Ainsi, si le chanteur doit émettre un "a" en fa, ça ne lui posera pas de problème car la fréquence du formant "a" est de 700 Herz et le fa est de 698 Herz. Ainsi, leur proximité permet d'obtenir une augmentation de l'intensité du son. Par contre, si on lui demande une autre voyelle, il peut y avoir une grande différence de fréquence. Le chanteur pourrait pousser sa voix, ce qui provoquerait des efforts physiques qui ne sont pas possibles s'il veut tenir tout au long d'un concert. Pour résoudre ce problème, il faut élever la fréquence du premier formant de manière à se rapprocher du son du fondamental (fa). Pour y arriver, il faut modifier la longueur du conduit vocal avec la bouche principalement. En l'ouvrant plus, on diminue le conduit vocal et on augmente par conséquent la fréquence. Par cette méthode, les voyelles sont légèrement modifiées. Par exemple, un "a" devient un "u".

4.2.4. les registres

Il s'agit de sons produits par l'activité de certains groupes musculaires dominant momentanément dans un processus coordonné. Il existe en principe deux registres fondamentaux correspondant à deux modes d'émission très différents du fonctionnement laryngé. Un troisième registre intermédiaire se situe entre les deux fondamentaux. On parle d'un registre mixte, celui que le chanteur cherche à dominer puis à étendre.

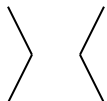
- **le registre de poitrine** : appelé aussi mécanisme lourd, est celui utilisé habituellement chez l'homme pour la voix parlée. Son timbre est riche en harmoniques et l'intensité tend à augmenter au fur et à mesure que la voix monte. Il se situe à la partie inférieure du registre mixte. Les vibrations à l'émission vocale sont perçues dans la poitrine.
- **le registre de tête** : appelé mécanisme léger. Par extension, ce registre couvre la voix de fausset et, chez l'homme, le son émis est soufflé et pauvre en harmoniques aiguës. Le registre de tête est alors habituellement utilisé par la femme et l'enfant. Ce registre peut être travaillé et le son produit à grande tension musculaire peut devenir fort et puissant, dans un sexe comme dans l'autre. Les vibrations sont mieux ressenties dans la tête, d'où le nom donné à ce registre.

- **le registre mixte** : la voix est émise avec souplesse, aisance et confort. La voix mixte mélange à des degrés divers les caractéristiques des mécanismes fondamentaux du registre de poitrine et du registre de tête. Le son chanté perd un peu de son brillant, mais gagne en douceur et en rondeur. Les vibrations sont ressenties aussi bien au niveau thoracique qu'au niveau de la tête.

4.2.5. la classification tonale des voix

Tessiture	Notes	Fréquences Hz	Longueur cordes vocales
HOMMES			
basse	do1 - mi3	65-325	24 mm
baryton	la1 - sol3	100-387	22 mm
ténor	do2 - do4	129-517	20 mm
FEMMES			
contralto	sol2 - sol4	193-775	18 mm
alto	la2 - la4	217-870	16 mm
soprano	do3 - do5	258-1034	14 mm

Une étude tente de prouver qu'il existe un rapport entre la forme du corps et la tessiture du chanteur. En effet, un chanteur possédant une cage thoracique très grande aura des facilités à chanter les voix graves. Le corps de Maria Callas, quant à elle, avait la forme d'un sablier :



Ceci expliquerait sa facilité à chanter du tragique, donc une tessiture sombre et grave. Les mezzo-sopranos ont un corps et un coup long, alors que les ténors et les sopranos lyriques ont un coup plutôt large. Mais ceci n'est que des généralités, il existe un bon nombre d'exceptions !

4.2.6. la voix et la phonation

La voix est formée de sons, et un son en physique acoustique est défini par quatre paramètres :

- La hauteur
Elle est fonction du sexe, donc de facteurs hormonaux. Elle est partiellement produite par le rythme des ouvertures et fermetures laryngées. Le son aigu correspond dans le temps aux vibrations rapides, les sons graves aux vibrations lentes. Plus les cordes vocales sont tendues, plus la hauteur de la voix est élevée.
- L'intensité
Elle exprime en décibels la puissance vocale. Elle dépend de la pression sous-glottique et varie entre 20 et 60 décibels selon les individus, le sexe et le milieu socioculturel.
- Le timbre
Il est la caractéristique qui permet de différencier une voix d'une autre. Il dépend des qualités du son laryngé modifié par les résonateurs formés par le pharynx, la bouche et les fosses nasales.
- La durée de vocalisation
Appelée aussi tenue d'une note, elle permet d'apprécier, conjointement, l'intégrité de la soufflerie et le tonus glottique. Elle devrait pouvoir dépasser 20 secondes chez un adulte normal, émettant une voyelle sur une hauteur moyenne d'intonation.

4.2.7. les différentes formes de voix chantées

La voix chantée chez l'enfant :

L'enfant chante comme il parle. La plupart du temps, il chante en voix de tête avec un timbre léger. L'enfant ne possède pas de vibrato, ce qui confère à sa voix ce caractère particulier de fraîcheur et de pureté.

La voix de castrat :

C'est probablement par milliers que les jeunes gens furent castrés durant le XVIII^e siècle. L'intervention chirurgicale avait lieu entre l'âge de 7 et 8 ans. On empêchait ainsi le développement physiologique du larynx, à la puberté, sous l'effet des hormones sexuelles. Après des années de travail, ils obtenaient un statut social très privilégié, ce qui explique probablement pourquoi tant de familles faisaient opérer leurs fils. La tessiture des castrats recouvrait celle des femmes et son timbre était particulier, sorte de palier entre celui du jeune garçon et de l'homme adulte avec l'étendue d'une voix de femme. La voix dans les notes aiguës ne nécessitait pas le

mécanisme de passage en voix de fausset. Par conséquent, les aigus demeuraient très purs. Les possibilités dans les graves restaient importantes, ce qui n'était pas le cas chez les sopranos féminins.

La voix du chanteur de variétés :

La plupart du temps, il s'agit de voix spontanées, intuitives, impulsionnelles, tantôt caressantes, veloutées, envoûtantes, tantôt aiguës, perçantes, déchirantes, tantôt cris, chuchotements ou râles...

Ces voix sont travaillées, certes, pour exploiter ce qui plaît au public. Il est rare toutefois que le chanteur de variétés se soumette à une technique vocale dite classique. Sa voix obéit à d'autres critères esthétiques. Il travaille le passage brusque de la voix de poitrine à la voix de tête et utilise surtout le changement de timbre pour obtenir des effets personnalisés. Ses changements de hauteur tonale se font généralement par l'utilisation excessive de la musculature intrinsèque et extrinsèque laryngée, sans chercher un appui sur le souffle.

La voix du chanteur lyrique :

C'est la voix travaillée, veloutée, claire et précise, la voix qui a traversé les techniques pédagogiques du chant.

La voix de haute-contre :

Cette voix caractéristique désigne une tessiture au-dessus de la voix du ténor, c'est-à-dire du contre. La voix, quoique très haute, située entre celle d'un ténor et celle d'un alto est susceptible d'acquérir puissance, rondeur et couleur.

Le yodl :

Consiste dans le passage brutal de la voix de poitrine à la voix de fausset, à une très grande vitesse. Ce type d'émission caractérise certains chants populaires suisses, tyroliens, sibériens, où le passage se fait même vers la voix du sifflet. Pour faciliter le changement de voix, le yodleur utilise de fréquents et importants sauts mélodiques, souvent plus d'une octave, très impressionnants, car effectués à l'aide d'une voix puissante.

Le sifflet :

D'une part, c'est le registre utilisé par les sopranos pour émettre les notes les plus aiguës. D'autre part, certains individus entraînés sont susceptibles de siffler une mélodie, modulant avec agilité et une grande étendue tonale toutes sortes de compositions musicales.

La voix chantée du troisième âge :

Phénomène parfaitement physiologique : la voix vieillit. Le caractère déclinant dépend de plusieurs facteurs dont les plus importants sont liés à la posture qui s'altère, au tronc qui se voûte, aux organes de la cavité abdominale qui s'affaissent. La musculature laryngée, elle aussi, s'atrophie progressivement.

Sur le plan acoustique, on note:

- un élargissement du vibrato qui devient plus ample.
Ce passage progressif à un tremblement de la voix est la conséquence du manque de fermeture de la glotte. Le flux d'air expiré continue à s'échapper au lieu d'être stoppé périodiquement.
- une fréquence fondamentale qui s'abaisse chez la femme et remonte chez l'homme, ce qui rend le pianissimo difficile à produire et une perte progressive du registre de poitrine.
- un timbre qui est caractérisé par un souffle dans les registres graves, par une diminution des harmoniques aiguës, par une justesse du son de plus en plus difficile à produire, puis à maintenir.

Il convient de noter toutefois que le vieillissement biologique de l'homme crée des phénomènes qui ne sont pas les mêmes chez tous les individus. Un homme âgé peut avoir un appareil phono-articulatoire anatomiquement et fonctionnellement encore jeune, alors qu'un homme jeune peut déjà posséder un appareil ayant toutes les caractéristiques de celui de l'homme âgé.

La voix et le chant choral :

La voix de chacun se doit de se perdre dans l'harmonie collective. On cherche le plus possible à obtenir un son fondu, rond, dans lequel les timbres individuels sont effacés. Le bon chanteur de chœur doit contrôler, maîtriser son émission vocale pour que la qualité de sa voix soit la meilleure possible, tout en se mélangeant aux autres voix. Le bon chœur est celui qui n'émet qu'un son par registre et non celui dans lequel chacun s'évertue à se distinguer de la masse. Le chef tente de lier rythme respiratoire à la rythmique musicale. Un son non soutenu devient forcément faux. A ce titre, les chœurs formés occasionnellement par de grands solistes, pour honorer telle ou telle circonstance, démontrent sans nul doute qu'un ensemble de voix belles individuellement peut former un son désagréable, discordant, tant à cause de vibratos qui ne se mêlent pas qu'à cause de timbres trop individualisés.

5. L'oreille

On ne peut parler de la voix sans évoquer la "phase finale" de son parcours, soit sa perception.

L'oreille est l'organe périphérique de l'audition. En l'absence de toute affection ou lésion du système auditif dans ses composantes perceptives, l'organisme reçoit, intègre et gère toutes les énergies qui lui parviennent, construisant une sorte de représentation

mentale de l'environnement sonore, à la fois en termes acoustiques (niveau et spectre du signal) qu'en termes spatiaux (détermination du lieu d'émission).

5.1. anatomie

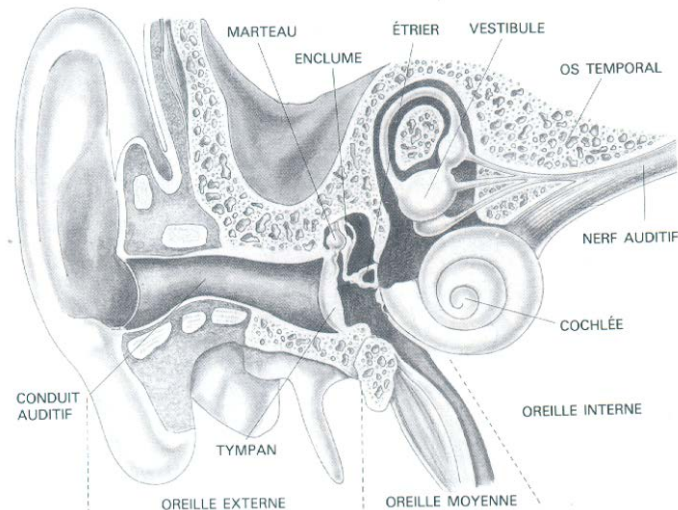


Figure 11 : anatomie de l'oreille

L'oreille comporte trois parties :

- l'oreille externe : elle comprend le pavillon et le conduit auditif
le pavillon capte et concentre les ondes sonores, tout en amortissant la brutalité du passage de l'air libre à l'air enclos du conduit auditif. Ensuite, le son pénètre dans le conduit auditif qui renforce, par résonance, les fréquences de l'ordre de 3000 hertz. Long de deux à trois centimètres, ce conduit aboutit à la membrane du tympan.
- l'oreille moyenne : elle est constituée de la chaîne tympano-ossiculaire, comprenant le tympan et trois osselets, le marteau, l'enclume et l'étrier.

Cette chaîne transmet non seulement les vibrations à l'oreille interne par un mécanisme de levier, mais adapte aussi les caractéristiques acoustiques du milieu aérien à celles des liquides de l'oreille interne. Cette "impédance acoustique" évite les réflexions de l'onde lors du passage de l'air dans un liquide, et la perte d'énergie

correspondante. Cette phase de la transmission des sons est mécanique.

De plus, l'oreille moyenne communique avec le pharynx par la trompe d'Eustache.

- l'oreille interne : elle comprend le vestibule et la cochlée.

Le vestibule contient les organes de l'équilibre alors que la cochlée est l'appareil auditif par excellence. C'est un tube osseux d'environ 35 mm de long enroulé en spirale et rempli d'un liquide, la périlymphe. Le canal central est limité par la membrane basilaire sur laquelle repose l'organe sensoriel récepteur, l'organe de Corti. Ce canal est rempli d'endolymphe, un liquide dont les mouvements font vibrer les cils des cellules auditives. De plus, il contient les cellules sensorielles ciliées. (cf. 5.2)

5.2. les cellules ciliées

L'organe de Corti, la partie neurosensorielle de la cochlée, comprend deux types de cellules ciliées adaptées à la réception des mouvements liquidiens de l'endolymphe : les cellules ciliées internes et les cellules ciliées externes.

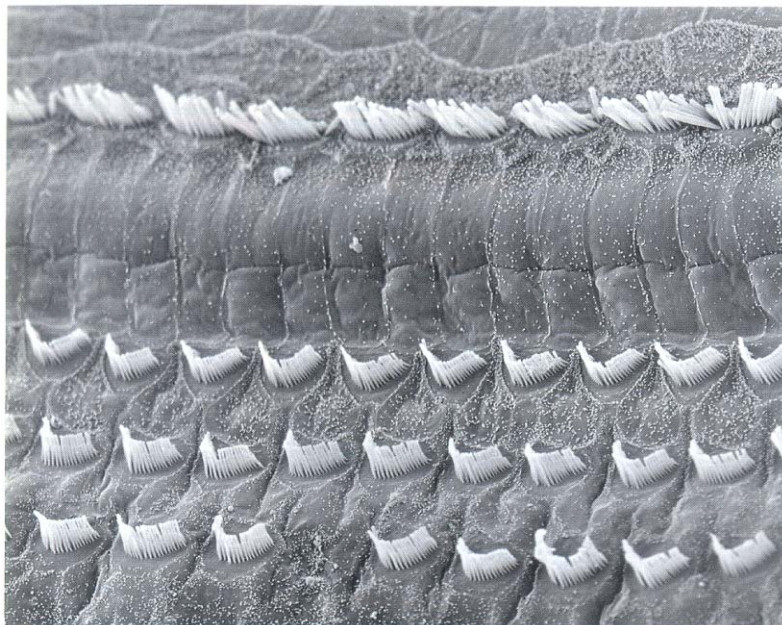


Figure 12 : les cellules ciliées internes sont en arrière plan (sur une ligne) et les externes sont devant (sur trois lignes)

5.2.1. les cellules ciliées internes

Les stéréocils, agités par les mouvements liquidiens, transforment une vibration acoustique en une décharge nerveuse par l'intermédiaire de canaux ioniques.

Les canaux cationiques laissent passer les ions potassium K^+ très concentrés dans l'endolymphe. Ces ions migrent dans les cils et donc dans les cellules ciliées. Ils assurent le transport physiologique des charges électriques qui sont responsables de la dépolarisation, donc de l'excitation, des cellules ciliées internes. Lorsque ces dernières sont dépolarisées, elles libèrent un neurotransmetteur qui déclenche la transmission d'un message vers le cerveau.

Les cils de chaque rangée sont attachés par des liens apicaux (au sommet). Le sommet de chaque cil court est relié au cil plus long situé juste derrière lui. Cet arrangement solidarise l'ensemble de la touffe ciliaire d'une même cellule. Lorsque les cils les plus longs sont repoussés vers l'extérieur par les mouvements de l'endolymphe, ils tirent sur les cils voisins, qui eux-mêmes attirent les plus courts. Ces étirements permettent d'ouvrir les canaux ioniques, lieux de migration des ions potassium.

5.2.2. les cellules ciliées externes

Le rôle des cellules ciliées externes est d'amplifier l'intensité sonore et de réaliser un filtrage ou une sélection de la fréquence.

Contrairement aux cellules ciliées internes qui sont disposées sur une rangée unique, les cellules ciliées externes se répartissent sur trois rangées, le long de la spire cochléaire.

Comme pour les cellules ciliées internes, tout étirement ouvre les canaux ioniques apicaux des stéréocils, mais, après une excitation sonore modérée, les cellules ciliées externes sont incapables de déclencher une neurotransmission, et d'envoyer un message auditif au cerveau. Ces cellules ne sont pas des percepteurs sensoriels typiques. En fait, les cellules ciliées externes se contractent en deux types :

Les contractions rapides capables de suivre la fréquence de stimulation et les contractions lentes. Les mécanismes rapides ont des conséquences physiologiques importantes puisqu'ils sont responsables des "mécanismes actifs" susceptibles, lorsque la stimulation est faible, d'amplifier la vibration et de réaliser un filtrage ou une sélection de la fréquence. Les hautes fréquences sont captées dans la base de la cochlée et les basses fréquences au sommet.

Les cellules ciliées externes excitées se contractent en phase avec la fréquence stimulante. Cette amplification sélective est maximale pour les fréquences aiguës et elle diminue vers les basses fréquences. Les contractions lentes des cellules ciliées externes ne participent vraisemblablement ni à l'amplification, ni au filtrage, mais elles sont sans doute à l'origine d'autres mécanismes extrinsèques tels que l'adaptation, la détection du signal dans le bruit ou encore l'écoute binaurale (audition par les deux oreilles).

5.3. les lésions

Au-delà de 90 décibels, des risques de lésions existent et augmentent à mesure que l'intensité sonore croît ou que la durée d'exposition au bruit augmente. Dans une discothèque, par exemple, le son peut dépasser 100 décibels. Les lésions engendrées se font au niveau des cellules ciliées externes qui subissent une dégénérescence. Une détérioration ou un dysfonctionnement passager se traduit par la perte des mécanismes actifs de préamplification et de filtrage. Tout se passe comme si les cellules ciliées externes étaient court-circuitées. Ceci génère une lésion irréversible.

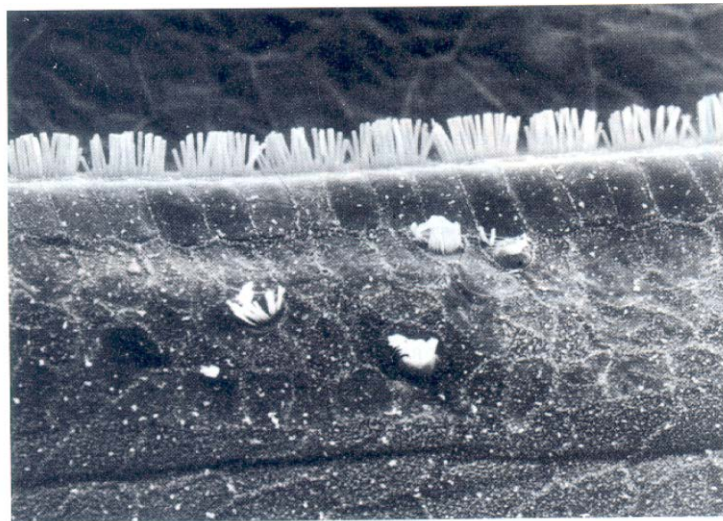


Figure 13 : cellules ciliées externes endommagées (au premier plan) et les cellules ciliées internes saines (arrière plan)

Il faudra donc au malade un son beaucoup plus intense pour aboutir à une vibration de la cloison cochléaire. De plus, deux sons rapprochés excitent à peu près les mêmes cellules ciliées internes : la discrimination des fréquences n'est plus correcte car le codage est trop sommaire.

Nous pouvons résumer la situation en comparant la transmission d'un message en présence d'une oreille saine et d'une oreille malade avec le diagramme suivant :

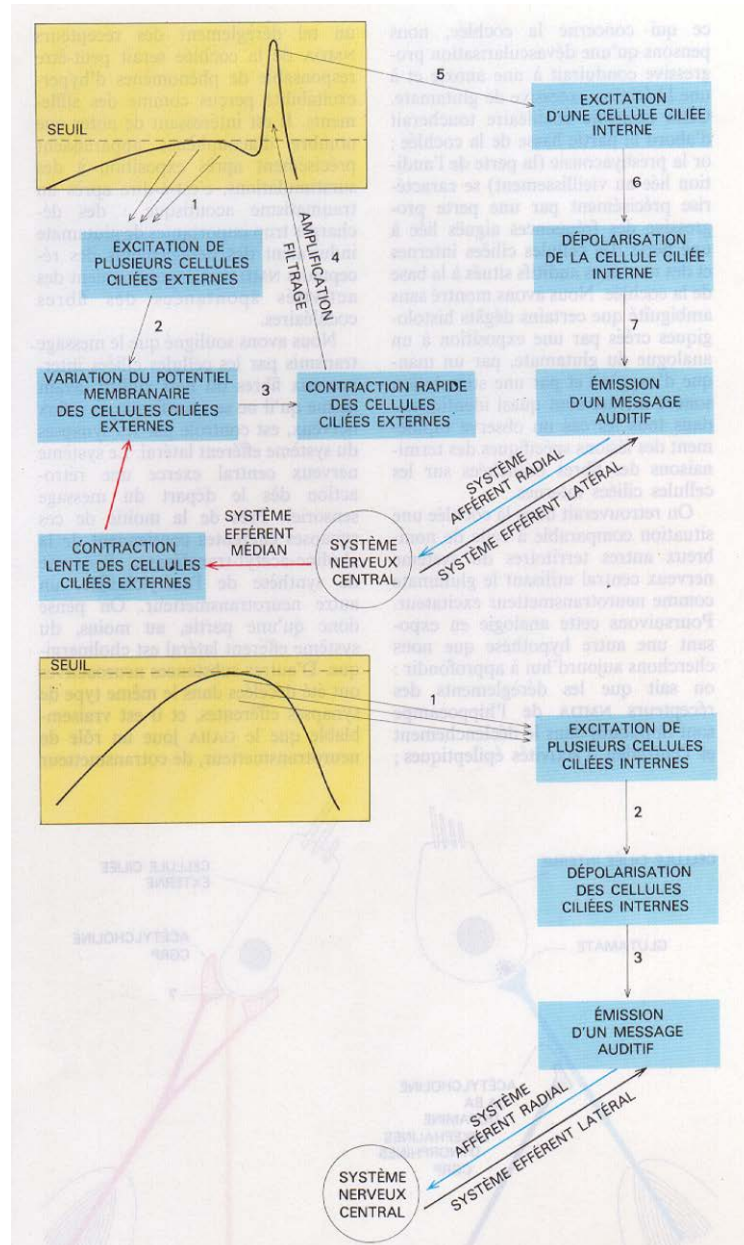


Figure 14 : comparaison entre la transmission d'un son dans une oreille saine (en haut) et une oreille malade (en bas)

6. Gammes et théorie musicale

Ce chapitre explique en détail l'élaboration des notes et des gammes que nous utilisons actuellement en musique. D'où vient leur nom et comment sont-elles formées ? Comme il est normal de rendre à César ce qui appartient à César, quasiment la totalité

de ce texte provient des sites Internet <http://www.etiop.free.fr/gammes.html> et <http://www.ac-nantes.fr/peda/disc/scphy/dochtml/gammes.html>

6.1. Les notes et les rapports

6.1.1. Les notes

Une note, c'est un son marqué sur une partition. Pour ce faire, il faut obligatoirement tenir compte de la hauteur du son (un Si, un Do...), et de sa durée (une croche, une blanche...). Mais son intensité est souvent oubliée (on suppose une valeur par défaut), et le timbre plus encore. Dans ce texte, on ne s'intéresse qu'à la hauteur de la note. Cette hauteur correspond à une fréquence de vibration, exprimée en Hertz. Par exemple, à 440 Hz, on a une note que généralement on appelle un La.

Cependant, un son ne correspond jamais totalement à une note, à cause du timbre. C'est à dire que dans un son, on a une fréquence principale, qui donne la hauteur, et plein d'autres fréquences, qui entourent la fréquence principale, lui donnant une couleur particulière. Dans un son musical (par exemple dans une voix qui chante, par opposition à une voix qui parle), ces fréquences secondaires s'organisent principalement autour des harmoniques de la fréquence de base. Si une note possède une vibration qui vaut n , les harmoniques sont les vibrations $2n$, $3n$, $4n$, $5n$, etc. Généralement, plus on s'éloigne de la fréquence principale, plus les harmoniques sont faibles et peu discernables. C'est à dire que dans la fréquence n , on entendra fortement la fréquence $2n$, assez fortement la fréquence $3n$, mais quasiment plus la fréquence $9n$. La présence de ces harmoniques est l'une des données scientifiques les plus fondamentales qui soient à la base des théories musicales, quant aux rapports liant des notes émises successivement ou simultanément.

Cependant, toute généralité possède d'infinies contradictions. Il y a des sons musicaux, dans lesquels la fréquence "entendue" n'est pas la fréquence de base (parce que celle-ci est trop basse par exemple pour être perçue par l'oreille), d'autres où des harmoniques de rang élevé seront plus forts que des harmoniques de rang plus proche, d'autres encore où le son sera fortement composé de vibrations inharmoniques... Les sons d'orgue (où l'utilisation des jeux permet de manipuler fortement les composantes du timbre) ou celui des cloches (qui par leur constitution favorisent souvent les inharmoniques musicaux) offrent de nombreux contre-exemples. Mais en général, donc, le postulat reste vrai.

6.1.2. Les rapports

Quand on joue plusieurs notes successivement ou plus encore quand on les joue simultanément, l'oreille est sensible aux rapports qui existent entre ces notes. Et quand on dit "rapports", on pense aux deux sens du terme ! C'est à dire au sens général (l'oreille repère simplement qu'une note est plus haute ou plus basse que l'autre), mais aussi au sens mathématique ! Quand le rapport mathématique des deux notes est

simple, l'oreille le sent. Et plus ce rapport est simple, plus l'oreille trouve que les deux notes sont liées l'une à l'autre. Par exemple, si après une note de 1000 Hz, on n'en joue une de 500 Hz, l'oreille repère que ces deux notes sont très fortement liées l'une à l'autre. Et de fait, le rapport qui les lie vaut $1000/500 = 2/1$, qui est une expression très simple. Si, après la note de 500 Hz, j'en joue une de 600 Hz, les deux notes seront liées par un rapport de $600/500 = 6/5$, qui est un rapport beaucoup plus compliqué, trop compliqué pour que l'oreille le repère.

Comment l'oreille effectue-t-elle ce calcul ? En fait, elle ne calcule pas, elle reconnaît ! Elle reconnaît dans les harmoniques de la 2^{ème} note un certain nombre d'harmoniques déjà présents dans ceux de la 1^{ère} note. Plus les deux notes ont d'harmoniques communs, plus les deux notes semblent liées. Or, plus le rapport mathématique liant les deux notes est simple, plus le nombre d'harmoniques communs est élevé. Par exemple, tous les harmoniques de 1000 Hz (à savoir 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz, etc.) sont des harmoniques de 500 Hz. Par contre, entre 500 Hz et 600 Hz, le premier harmonique commun est 3000 Hz, assez éloigné et donc assez peu discernable. Du coup, les notes sembleront peu liées.

Une autre façon de voir les choses, c'est en étudiant les résonances. Prenons deux cordes, l'une de longueur fixe F, et une autre de longueur variable V, tendue l'une à côté de l'autre. On fait vibrer la corde de longueur F. Celle-ci émet alors une fréquence dont la valeur est inversement proportionnelle à F. Si on fait varier la longueur V de la corde voisine, celle-ci va, pour certaines valeurs repérables de V, se mettre elle aussi à vibrer, par sympathie avec la corde F. On se rend compte que ce phénomène se produit lorsque V est en "rapport simple" avec F. Par exemple, lorsque V vaut F/2 ou F/3. Car alors, la fréquence émise par F correspond à une des harmoniques de la fréquence qu'aurait émise V, et V réagit à cette harmonique.

Donc, plus le rapport est simple, plus les notes sont liées. A ce titre, les rapports les plus simples ont reçu des noms. Ces noms se verront justifiés beaucoup plus tard dans cette étude, après la structuration de la gamme.

rapport	exemple	nom
2/1	Do - Do	Octave
3/2	Do - Sol	Quinte
4/3	Do - Fa	Quarte
5/4	Do - Mi	Tierce majeure
6/5	Do - Mib	Tierce mineure

Ces accords suffiront dans un premier temps. On voit déjà que le rapport 6/5 que l'on décrit ci-dessus comme peu riche en harmoniques communs, donc assez peu discernable, est en fait un rapport de tierce mineure, donc quelque chose d'assez courant dans notre langage musical ! Ce qui prouve que ce phénomène d'harmoniques n'explique pas tout, loin de là. Rapidement, d'autres règles apparaîtront, par le biais de

la structuration progressive du langage musical et de son implantation dans la culture générale de ceux qui composent et de ceux qui écoutent.

6.1.3. L'octave

Il est difficile d'imaginer un rapport plus simple que celui-là : $2/1$. Quand n_2 est à l'octave de n_1 , tous les harmoniques de n_2 , et n_2 lui-même, sont des harmoniques de n_1 . D'une certaine façon, n_2 disparaît dans n_1 . C'est un phénomène extrêmement repérable, et que toutes les cultures de notre petite planète ont observé et intégré à leurs langages musicaux. Quand un homme et une femme chantent ensemble, ils vont généralement chanter à une ou plusieurs octaves de distance, sans le chercher, et sans même souvent en prendre conscience, tant cela leur semblera naturel.

Prenons une note repère, par exemple la note de fréquence 1000 Hz (ça simplifiera les calculs). En utilisant les octaves, on a aussitôt une échelle qui apparaît dans tout le spectre des fréquences : 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, apparaissent comme des reflets de la note de départ.

On peut noter aussi que, dans le monde des fréquences, la distance se mesure par une division, et non par une soustraction. Par exemple, il y a la même distance entre 50 et 100 Hz, qu'entre 2000 et 4000 Hz : la distance d'une octave.

Une fois fixés, ces repères successifs à la distance d'une octave les uns des autres, il suffit de se concentrer sur ce qui se passe à l'intérieur d'une octave, puis de répercuter ces informations dans les autres octaves. Les phénomènes sont à ce point identifiables, que deux notes à l'octave l'une de l'autre porteront le même nom. La note à l'octave d'un Do s'appellera aussi un Do. Pour les différencier, on leur donne un numéro : la note à l'octave du Do1 se notera Do2.

6.1.4. La quinte

Par la simple reconnaissance de l'octave, le monde des fréquences commence à se structurer : il se trouve divisé en une série d'octaves. Il faudrait maintenant structurer cette octave. Pour cela, il suffit d'introduire un autre rapport : la quinte. L'octave était obtenue en doublant la note de base, la quinte est obtenue en la triplant. Mais comme cette note triple est au-dessus de l'octave, on prend sa note reflet, en la divisant par 2. Donc, pour obtenir la quinte d'une note, on la multiplie par $3/2$.

La quinte permet d'avoir déjà une sorte de gamme : une gamme ditonique, c'est à dire composée de deux notes, la note de base, et sa quinte. Pour simplifier la notation, on prend comme note de départ un Do, auquel on affecte la valeur 1. Les autres notes se verront dotées des noms qu'elles ont actuellement, et qu'elles n'avaient certainement pas à l'époque où ces gammes sont nées. Mais ça simplifie l'écriture. Donc, notre gamme ditonique s'écrira : Do=1 - Sol= $3/2$. On peut répercuter cette gamme sur l'ensemble du spectre fréquentiel, par le jeu des octaves. Ce qui donne Do1=1 Sol1= $3/2$ Do2=2 Sol2=3 Do3=4 Sol3=6 etc.

Cette gamme ditonique est assez élémentaire mais c'est un début !

6.1.5. La quarte

Dans cette gamme ditonique, nous connaissons presque tous les rapports mis en jeu : entre un Do1 et Do2 supérieur, nous avons une octave. Entre Do1 et Sol1, nous avons un rapport de quinte. Mais entre Sol1 et Do2, quel rapport avons-nous ? $\text{Do2}/\text{Sol1} = 2 / (3/2) = 4/3$. C'est un rapport de quarte. Ce rapport apparaît comme le complémentaire de l'accord de quinte (complémentaire par rapport à l'octave : octave - quinte = quarte). Donc, quand on utilise l'octave et la quinte, la quarte aussitôt s'introduit, sans avoir été invitée. On peut donc dire que notre gamme ditonique est formée de deux rapports : l'octave, et la quinte/quarte.

6.2. Fabrication d'une gamme

Pour la suite de la construction de la gamme, le principe reste le même. On part du Sol, on monte d'une quinte et on obtient le Ré : $\text{Ré2} = \text{Sol1} * 3/2 = 3/2 * 3/2 = 9/4$

Puis, on part du Ré, on prend la quinte supérieure et on parvient au La et ainsi de suite. De cette manière, nous obtenons une gamme complète, jusqu'au Do de l'octave supérieur.

Une autre méthode est possible en utilisant la quinte et les fréquences associées à chaque note :

Dans la gamme naturelle, la note Do2 est associée à la fréquence de 132 Hz, soit 264 Hz pour le Do3.

A partir de la tonique Do, on peut construire 2 quintes :

Do3 - Sol3 : d'où $\text{Sol3} = 3/2 \text{ Do3} = 396 \text{ Hz}$

Fa3 - Do4 : d'où $\text{Fa3} = 2/3 \text{ Do4} = 352 \text{ Hz}$ (sous-dominante)

A partir de la dominante Sol, on peut construire 1 nouvelle quinte :

Sol3 - Ré4 : d'où $\text{Ré4} = 3/2 \text{ Sol3} = 594 \text{ Hz}$ (seconde)

A partir de la médiane Mi, on peut construire 2 autres quintes :

Mi3 - Si3 : d'où $\text{Si3} = 3/2 \text{ Mi3} = 495 \text{ Hz}$ (note sensible)

La3 - Mi4 : d'où $\text{La3} = 2/3 \text{ Mi4} = 440 \text{ Hz}$ (sus-dominante)

Les fréquences des 7 notes de la gamme diatonique naturelle en Do Majeur sont ainsi calculées, en considérant des rapports idéaux de fréquences entre les différentes notes. On obtient le tableau ci-dessous :

Do2	Ré2	Mi2	Fa2	Sol2	La2	Si2	Do3	Ré3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Si3	Do4	Ré4	Mi4	Fa4	Sol4	La4	Si4
132	148,5	165	176	198	220	247,5	264	297	330	352	396	440	495	528	594	660	704	792	880	990

Gamme naturelle

6.3. Défaut de la gamme naturelle

Avec les notes de la gamme en Do, on ne peut construire que 6 quintes, l'intervalle Si₃ - Fa₄ ne comportant que 6 demi-tons au lieu de 7 pour une quinte. Les notes formant ces intervalles doivent avoir des fréquences ayant un rapport idéal de 3/2.

Quinte Do₃ - Sol₃ : $\text{Sol}_3/\text{Do}_3 = 396/264 = 1,5 = 3/2$

Quinte Fa₃ - Do₄ : $\text{Do}_4/\text{Fa}_3 = 528/352 = 1,5 = 3/2$

Quinte Sol₃ - Ré₄ : $\text{Ré}_4/\text{Sol}_3 = 594/396 = 1,5 = 3/2$

Quinte Mi₃ - Si₃ : $\text{Si}_3/\text{Mi}_3 = 495/330 = 1,5 = 3/2$

Quinte La₃ - Mi₄ : $\text{Mi}_4/\text{La}_3 = 660/440 = 1,5 = 3/2$

Ces résultats ne sont pas surprenants, car ils résultent de la construction de la gamme. Si les 5 premières quintes ont bien un rapport idéal de fréquences, la dernière est légèrement dissonante, comme le montre le calcul ci-dessous.

Quinte Ré₃ - La₃ : $\text{La}_3/\text{Ré}_3 = 440/297 = 1,48$

La solution à ce problème est de tempérer la gamme, afin que le rapport de fréquences entre demi-tons soit constant. On construit ainsi une gamme appelée gamme chromatique car elle est constituée de 12 demi-tons.

6.3.1. Calcul du rapport entre les fréquences d'un demi-ton

Tempérer une gamme revient donc à modifier légèrement la fréquence des notes afin d'avoir un rapport constant entre demi-tons. Ainsi les rapports de fréquences suivants doivent être tous égaux :

Erreur! Argument de commutateur inconnu.

Chacun de ces rapports est égal à une constante a , que l'on calcule en effectuant la multiplication de ces 12 rapports. On obtient ainsi :

Erreur! Argument de commutateur inconnu.

La valeur de la constante a est la racine 12^{ème} de 2, afin de conserver un rapport idéal de fréquences de 2 pour une octave.

$$a = 1,059\,463$$

6.3.2. Fréquences des notes de la gamme tempérée

Le La est la seule note à conserver sa fréquence dans ce nouveau système, ainsi La3 = 440 Hz dans les deux gammes. Cette fréquence va servir de base de calcul pour toutes les autres notes.

Fréquence du Si3 : $\text{Si3/La3\#} \times \text{La3\#/La3} = \text{Si3/La3} = a^2$

Deux notes séparées d'un ton auront ainsi un rapport de fréquences de a^2 .

$$\text{Si3} = a^2 \times \text{La3} = (1,0595)^2 \times 440 = 493,9 \text{ Hz}$$

Fréquence du Do4 : $\text{Do4/Si3} \times \text{Si3/La3} = \text{Do4/La3} = a^3$

Deux notes séparées de 3 demi-tons auront ainsi un rapport de fréquences de a^3 .

$$\text{Do4} = a^3 \times \text{La3} = (1,0595)^3 \times 440 = 523,3 \text{ Hz}$$

Pour les fréquences des autres notes, il suffit de remarquer que deux notes séparées de n demi-tons ont un rapport de fréquences de a^n .

Fréquence du Ré4 : $\text{Ré4/La3} = a^5$ (5 demi-tons)

$$\text{Ré4} = a^5 \times \text{La3} = (1,0595)^5 \times 440 = 587,3 \text{ Hz}$$

Fréquence du Mi4 : $\text{Mi4/La3} = a^7$ (7 demi-tons)

$$\text{Mi4} = a^7 \times \text{La3} = (1,0595)^7 \times 440 = 659,3 \text{ Hz}$$

Fréquence du Fa4 : $\text{Fa4/La3} = a^8$ (8 demi-tons)

$$\text{Fa4} = a^8 \times \text{La3} = (1,0595)^8 \times 440 = 698,5 \text{ Hz}$$

Fréquence du Sol4 : $\text{Sol4/La3} = a^{10}$ (10 demi-tons)

$$\text{Sol4} = a^{10} \times \text{La3} = (1,0595)^{10} \times 440 = 784,0 \text{ Hz}$$

Les fréquences des autres notes se calculent, soit en utilisant la relation entre le nombre de demi-tons et l'exposant n, soit le rapport entre deux notes formant une octave.

On obtient les résultats ci-dessous :

Do2	Ré2	Mi2	Fa2	Sol2	La2	Si2	Do3	Ré3	Mi3	Fa3	Sol3	La3	Si3	Do4	Ré4	Mi4	Fa4	Sol4	La4	Si4
130,8	146,8	164,8	174,6	196,0	220,0	246,9	261,6	293,7	329,6	349,2	392,0	440,0	493,9	523,3	587,3	659,3	698,5	784,0	880,0	987,8

Gamme tempérée

6.4. Un peu de vocabulaire

6.4.1. Le nom des notes

Depuis le début, on a appelé les notes par leur nom usuel : Do, Ré etc. Mais d'où viennent ces noms ? En fait, d'un chant grégorien, qui possédait une caractéristique intéressante : chaque vers commençait sur une note plus haute que le vers précédent. Et du coup, la première syllabe de chaque vers a servi à désigner la note sur laquelle cette syllabe était prononcée.

Voici ce chant, avec les mélodies à coté:

Ut queant laxis	do re fa re fa re
Resonare fibris	re re do re mi mi
Mira gestorum	mifasol mi re fado re
Famuli tuorum	fa sol la solla re re
Solve polluti	sollasol mi fa sol re
Labii reatum	la sol la fa solla la
Sancte Johannes	solfa re do mi re

Le Si est en fait venu plus tard, au XVII^{ème} siècle, et vient des initiales SJ du dernier vers (jusque-là, les musiciens se contentaient de six noms de notes, dans un système complexe dit d'hexacordes, permettant par enchaînements successifs de décrire les gammes heptatoniques, mais ce système aboutissait à des ambiguïtés qui finirent par devenir gênantes). C'est aussi vers cette époque que Ut est devenu Do, parce que Ut était une syllabe trop difficile à chanter (le choix vient sans doute du nom du chanteur Signore Doni, qui serait à l'origine de cette modification).

6.4.2. Le nom des accords

Quinte, quarte, tierce ou même octave, d'où viennent ces noms ? Il suffit de numérotter les notes d'une gamme heptatonique 1:Do=1000 2:Ré=1125 3:Mi=1265 4:Fa=1333 5:Sol=1500 6:La=1687 7:Si=1898 8:Do2=2000.

Rapport à appliquer	Note obtenue	Nom de l'accord
$1000 * 2/1 = 2000$	Do2 = note 8	Octave

$1000 * 3/2 = 1500$	Sol = note 5	Quinte
$1000 * 4/3 = 1333$	Fa = note 4	Quarte
$1000 * 5/4 = 1250$	Mi = note 3	Tierce (majeure)
$1000 * 6/5 = 1200$	Mi = note 3	Tierce (mineure)

On tombe deux fois sur la tierce ! On appelle "tierce majeure" le rapport qui permet d'obtenir la note la plus élevée des deux, et "tierce mineure" le rapport qui permet d'obtenir la note la moins élevée.

6.5. Bilan

Pendant plusieurs siècles, la musique s'est concentrée sur le problème des hauteurs de notes. Ces hauteurs, peu à peu, ont été fixées au sein d'une gamme, qui a subi de nombreuses évolutions au fur et à mesure des besoins des compositeurs. Cette gamme a fini par se stabiliser, dans la gamme tempérée, aujourd'hui très largement plébiscitée. Certains musiciens baroques utilisent les gammes inventées au moyen-âge, parce que ce sont celles utilisées par les auteurs qu'ils aiment jouer, et certains compositeurs s'amusent avec des quarts de ton, voire des huitièmes de ton, histoire de se croire à l'avant-garde. Mais dans l'ensemble, tout le monde utilise la gamme tempérée.

Comment utiliser cette gamme ? Une manière s'est elle aussi peu à peu imposée : le système tonal. Ce système s'est lentement d'abord, puis de plus en plus vite, enrichi, compliqué, permettant de construire des œuvres de longue durée puissamment structurées. Au bout d'un moment, le système est arrivé à une certaine limite, et certains compositeurs ont tenté de trouver d'autres systèmes pour fabriquer de la musique.

Contrairement à ce que pensent certains esprits obtus, on pense que ces tentatives ont été fructueuses, et qu'aujourd'hui il est possible de fabriquer des systèmes musicaux très divers, et de produire des œuvres intéressantes, parfois même très belles et émouvantes, à partir de règles qui n'ont rien à voir, ni de près ni de loin, avec celles du système tonal. Chacun peut donc inventer son système, produire un matériel musical inédit, et générer des œuvres à partir de ce matériel qui soient parfaitement personnelles.

Ce qui fait que la question n'est plus vraiment là. Et les compositeurs d'aujourd'hui se posent d'autres questions, qui touchent aux autres paramètres des sons. Le rythme, par exemple, la manière dont nous le ressentons, et la manière dont il est utilisé, a été profondément bouleversé lors de ce siècle, sans doute par l'apport de civilisations extra-européennes (Afrique, Inde...) qui avaient des conceptions du rythme beaucoup plus complexes et riches que les nôtres.

Mais c'est surtout le timbre qui aujourd'hui ouvre des perspectives passionnantes à la musique. La lutherie électronique n'en est qu'à ses débuts, et elle promet de fantastiques possibilités musicales inédites. C'est un domaine qui engage les

compositeurs, les musiciens et aussi des chercheurs et des informaticiens, peut-être plus tard d'autres corps de métier. Depuis peu, la technique de traitement en temps réel est à peu près au point : le son d'un instrumentiste est capté par un micro, traité en temps réel par un système informatique, et réinjecté par des haut-parleurs dans la salle de concert. Cela permet de réintroduire dans ses sons électroniques la subtilité du jeu de l'interprète, à charge pour le programme de réagir aux subtiles différences du son de départ. Une autre possibilité pourrait être de créer des instruments nouveaux, bardés de capteurs MIDI améliorés (Musical Instruments Digital Interface, norme utilisée par les synthés, les boîtes à rythme et autres séquenceurs pour se transmettre des informations musicales sous forme numérique), afin de créer vraiment des instruments par exemple intermédiaires entre un violon et une flûte, où le flux d'air émis par la bouche serait par exemple modulé par un archet, et non par un système de trous comme dans une flûte normale.

Bref, il reste encore bien des choses à inventer en musique, et bien des chef-d'œuvres à écrire. Les siècles passent, et l'histoire continue.

7. Conclusion

Le texte ci-dessus résume bien la situation...cependant, j'aimerais y apporter une petite touche personnelle. Ce travail de fin d'année m'a permis de m'évader de l'atmosphère scientifique rigoureux et précis imposé dans nos études. Pouvoir relier le monde systématique (la physique des ondes, l'anatomie humaine...) au domaine artistique qu'est le chant est une chance et permet à chacun de faire des liens fondamentaux avec le reste de l'existence... encore faut-il savoir les priorités de chacun ! La musique, dont le chant en particulier, fait partie intégrante de ma vie. J'apprécie et j'estime beaucoup le chant car c'est pour moi un art noble par excellence car aucun support externe à notre corps n'est nécessaire. Je compare cet art au marathonien, qui, par la seule force de son corps, arrive à se surpasser et à se faire plaisir.....car le plaisir est une notion fondamentale peut-être parfois oubliée...

8. Bibliographie

Pour la Science N°164, L'histoire du langage, **juin 1991**, 36

Pour la Science N°265, Le chant des Touvas, **novembre 1999**, 50

Pour la Science N°184, La voix humaine, **février 1993**, 36

Pour la Science N°154, Le traitement du son dans l'oreille interne, **août 1990**, 20

D^r M.-L. Dutoit-Marco, *Tout savoir sur la voix*, **1996**

<http://www.etiop.free.fr/gammes.html>

<http://www.ac-nantes.fr/peda/disc/scphy/dochtml/gammes.html>

Fribourg, le 23 novembre 2001

Elise Farine