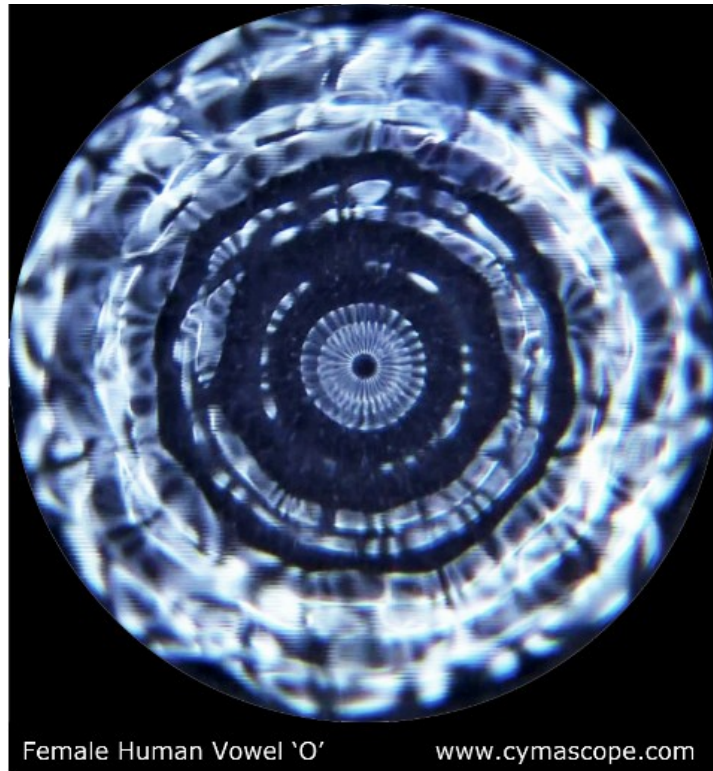


# MUSIQUE ET SONS

## Exploration des rouages de l'expression musicale

*Les éléments harmoniques et géométriques  
qui touchent notre âme et notre corps*



**Résonances corporelles**

**Modes et gammes**

**Sons créateurs de géométrie**

**Évolution historique de l'expression musicale**

**Caractéristiques physiques des sons**

**Controverses sur les diapasons**

**Alain Boudet**

Dr en Sciences Physiques

[www.spirit-science.fr](http://www.spirit-science.fr)





# Pourquoi la musique nous touche-t-elle ?

Dans ce recueil, j'ai rassemblé les articles que j'ai écrits à propos de la musique et de la voix. Chacun d'eux apporte une facette de compréhension des éléments qui composent ces musiques.

La musique n'est pas seulement un loisir. C'est aussi une nourriture essentielle. La musique qu'on écoute et les chants que nous émettons. Le son nous affecte directement, émotionnellement, mais aussi énergétiquement dans nos corps.

Certains chapitres sont plus spécialisés que d'autres. Mais ils sont cependant abordables avec un peu de temps et de réflexion. Je les ai ordonnés selon une logique d'approche naturelle. C'est une démarche inverse de celle de beaucoup d'auteurs.

En effet, ils commencent souvent par exposer les principes théoriques voire mathématiques de base, que ce soit la théorie de la gamme ; ou la nature et les caractéristiques physiques du son.

Or une approche plus naturelle est de commencer à aborder la musique en l'écoutant pour en profiter, sans connaître les théories. Ou encore de chanter spontanément sans se soucier des théories, ni même si la voix est juste.

Nous allons donc découvrir en premier comment la musique et le chant résonnent en nous, non seulement dans notre âme, mais aussi dans notre corps (chapitre 1). L'éducation musicale Willems se base sur l'idée que la musique a un impact sur tous les plans de développement d'un individu (chapitre 2).

Puis nous nous questionnerons sur les éléments constitutifs de la musique qui interviennent dans ces effets. Nous commencerons par les modes et les gammes, puisque nous chantons naturellement avec des notes appartenant à des gammes (chapitre 3).

Ensuite, nous parcourrons l'histoire musicale pour comprendre comment ces gammes et la musique ont évolué dans la musique occidentale (chapitre 4).

Nous nous pencherons sur la nature des notes elles-mêmes, en examinant les caractéristiques physiques des sons (chapitre 5) et la façon dont nous les percevons (chapitre 6).

Nous tirerons parti de cette connaissance pour explorer l'effet des sons sur la matière et comment dans certaines circonstances, ils produisent des figures géométriques. Bien plus, nous découvrirons que les sons sont à la base de la création des mondes, liés à des géométries (chapitre 7).

Les compositeurs et fabricants d'instrument se sont posé de tout temps le problème de fixer la valeur des intervalles entre des différentes notes, par exemple pour accorder un piano. C'est une discussion un peu plus technique, mais les choix ont des répercussions sur l'harmonie qui s'en dégage et sur ses effets sur l'âme et le corps (chapitre 8).

Une controverse existe entre compositeurs sur la hauteur de la note de référence (en général le LA). Nous en comprendrons la teneur, les raisons, mais aussi parfois l'absurdité, en tenant compte d'une part de l'histoire musicale, d'autre part des éléments physiques du son et de la façon dont nous vivons la musique (chapitre 9).

Enfin, puisque ces débats s'appuient sur les valeurs des fréquences sonores, il sera utile de comprendre comment sont mesurées ces fréquences et historiquement depuis quand (chapitre 10).

28 juillet 2021

# Résumé

## 1. Résonances corporelles des sons

Les sons de notre environnement ne stimulent pas seulement les tympans de nos oreilles, ils mettent en vibration certaines parties de notre corps. Toutes les parties de notre corps sont susceptibles d'être mobilisées en fonction de la hauteur et du timbre de ces sons. Apprendre à ressentir et prendre conscience de ces résonances, et plus particulièrement celles provoquées par notre propre voix chantée, est une porte essentielle pour développer d'autres dimensions subtiles de notre être.

## 2. L'éducation musicale

L'éducation musicale doit collaborer au plein épanouissement des facultés humaines. Il ne s'agit pas de faire l'éducation musicale d'un enfant ou d'un adulte dans le but de lui fournir une occupation, un divertissement, mais pour développer en lui des éléments de vie qui sont prêts à être utilisés: la musique est l'expression de la vie.

## 3. Constitution des gammes et des modes

La gamme est un condensé de mélodie qu'on peut appréhender sans connaître le solfège, par l'approche sensorielle. La notion de mode est tout aussi naturelle. Un mode, c'est ce qui reste fixe lorsqu'on change la hauteur de la mélodie. C'est une façon de diviser l'octave en échelons intermédiaires. La gamme, c'est ce qui change dans un mode lorsqu'on change la hauteur de la mélodie. Cette distinction est apparue récemment dans l'histoire musicale, en même temps que l'idée de hauteur absolue.

Ceux qui, conditionnés par le gavage scolaire, s'imaginent que l'univers musical repose en tout et pour tout sur les modes majeur et mineur, devront réviser leur point de vue et reculer les frontières de leur esprit. La construction des modes devient un jeu surprenant et amusant. De la manière d'arranger des intervalles à l'intérieur d'une octave. Découverte de nombreux types de modes produits par des cultures créatives de notre vaste monde. Modes pentatoniques et heptatoniques. Gammes occidentales, tziganes, indiennes, contemporaines, chinoises, arabes, etc. avec illustrations sonores.

## 4. Évolution de l'expression musicale occidentale du Moyen-Âge à nos jours. Polyphonie et tonalité, émergence et transformations

Du plaint-chant à la polyphonie, de la monodie à l'harmonie, du modal au tonal puis à l'atonal, les formes de l'expression musicale n'ont pas cessé de s'inventer et de se réinventer tout au long de l'histoire. Dans cette évolution, c'est l'âme humaine qui s'explore sous toutes ses facettes. Quelle que soit l'époque, certaines musiques nous nourrissent, d'autres nous causent des préjugés.

## 5. Caractéristiques physiques des sons

Par l'expérience sensorielle, à travers des exemples familiers et grâce à des fichiers sonores, nous découvrons les qualités physiques et musicales des sons: leur force ; leur hauteur et comment elle se traduit en notes pour le musicien ; et le timbre. Par des illustrations visuelles et sonores, j'explique en détails les notions d'harmoniques, ce qui nous permet de comprendre comment fonctionne le chant diphonique. L'expression vocale peut profiter de ces prises de conscience et je propose quelques exercices vocaux d'applications.

## 6. Physique et perception du son

Qu'est-ce que le son? Est-ce un phénomène physique? Non, c'est un phénomène de perception par le cerveau provoqué par une source physique. Nous découvrons cet enchaînement de phénomènes: nature vibratoire du son, comment il est émis, comment il se propage; par quel mécanisme il est capté, entendu et perçu par le cerveau.

## **7. Les sons créateurs de formes.** Les sons ont-ils participé à la formation de l'univers?

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

## **8. Ton, tempérament et intonation juste**

Pourquoi les interrogations sur la définition du ton et des intervalles constitutifs des gammes ont-elles préoccupé tant de compositeurs et de musicologues depuis l'antiquité grecque? Le ton, la tierce, la quinte, l'octave sont-ils des données absolues? Non, bien au contraire. Au cours du temps, et cela au moins depuis l'antiquité grecque, les intervalles ont été déterminés sur des bases mathématiques et techniques, en faisant appel à la science des nombres, tout en cherchant à s'adapter aux instruments existants. La gamme tempérée a succédé à d'autres gammes, telles que la gamme pythagoricienne, la gamme de Zarlino, et divers systèmes de tempéraments. Elle est une convention passagère, correspondant à la mentalité d'une époque. L'essentiel réside dans l'effet sonore qui résulte de la gamme, et dans la façon dont elle résonne et agit sur le corps et sur l'âme. Des recherches récentes tentent de trouver une intonation qui soit juste pour le corps et pour l'Être. Mais est-ce possible de façon définitive et universelle?

## **9. La hauteur des notes de musique doit-elle être normalisée par un diapason (LA 440, LA 432 ou autre)?** Les aléas historiques de la fréquence du LA

Depuis 1953, une norme internationale recommande d'accorder les instruments de musique à la fréquence de 440 hertz pour le LA. C'est une volonté récente, car dans le passé, on ne s'intéressait qu'aux intervalles entre les notes et on ne savait pas mesurer leur fréquence.

Fixer un diapason à 1 Hz près a un sens purement technique car musicalement, les notes émises par les instruments sont fluctuantes et varient avec la température et le souffle. Lorsque vous entonnez une chanson, vous ne vous souciez pas du diapason. La nécessité d'un diapason commun est apparue pour des motifs pratiques et commerciaux, afin de faciliter la musique professionnelle d'ensemble et la fabrication des instruments.

Au moins jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, le diapason des instruments variait d'un endroit à l'autre, d'une époque à l'autre et d'un instrument à l'autre. Puis des tentatives de normalisation ont été effectuées, mais le choix des valeurs retenues a suscité des controverses, qui ne se sont pas éteintes avec la normalisation internationale de 1953.

Le choix d'un diapason plus haut ou plus bas peut affecter le rendu sonore et la performance vocale des chanteurs lorsqu'il s'agit d'interpréter des œuvres écrites dans le passé. L'essentiel est l'impact émotionnel et physique de la musique sur l'auditeur. Il résulte de paramètres complexes qui dépassent de loin la question du diapason.

## **10. Histoire de la notion de fréquence sonore.** Apparition du concept et développement des procédés de mesure

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

Texte conforme à la [nouvelle orthographe française](#) (1990)

# Table des matières

<b>Pourquoi la musique nous touche-t-elle ?</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>4</b>
<b>Chapitre 1 - Résonances corporelles des sons</b> .....	<b>11</b>
La sensation de résonance dans le corps.....	11
Les résonances sonores s'étagent sur toute la hauteur du corps.....	12
Les voyelles et les chakras.....	14
Résonances vocales corporelles et imaginaire.....	15
La voix, instrument de bien-être et d'harmonie.....	15
<b>Chapitre 2 - L'éducation musicale vivante selon Edgar Willems</b> .....	<b>17</b>
La radio a tué le chant.....	17
Des éléments qui forment un tout.....	18
Comme la langue maternelle.....	18
Des exercices basés sur la vie.....	18
L'audition et le rythme.....	19
Savoir captiver.....	19
Avec les plus grands.....	20
<b>Chapitre 3 - Gammes et modes musicaux</b> .....	<b>21</b>
<b>I. Nature et constitution, une approche sensorielle</b> .....	<b>21</b>
Une approche de la notion de gamme.....	22
Hauteur relative, hauteur absolue.....	23
Qu'est-ce qu'un mode?.....	23
Qu'est-ce qu'une gamme?.....	24
Les degrés d'un mode.....	24
Historique de la notion de hauteur absolue.....	25
<b>II- Défilé de modes. Panoplie de modes musicaux en usage dans notre vaste monde</b> .....	<b>26</b>
Mode majeur et mode mineur.....	27
Modes médiévaux liturgiques.....	28
Modes tziganes. Intervalles d'un ton et demi.....	30
Panorama des modes.....	31
Modes arabes, les maqâmât. Intervalles de 3/4 de ton.....	31
Modes indiens, thaat et ragas.....	33
Les modes pentatoniques occidentaux chinois et indiens.....	34
Modes contemporains.....	36
Musique populaire et musique d'érudits.....	38
<b>Chapitre 4 - Évolution de l'expression musicale occidentale du Moyen-Âge à nos jours</b> <b>Polyphonie et tonalité, émergence et transformations</b> .....	<b>39</b>
Une histoire des esprits et des sensibilités.....	39
Chant à une seule voix (monodie), 5 <sup>e</sup> - 12 <sup>e</sup> siècles.....	40
Musiques traditionnelles et ethniques.....	41
Musique à plusieurs voix, 9 <sup>e</sup> - 16 <sup>e</sup> siècles.....	42
Monodie accompagnée, 17 <sup>e</sup> - 18 <sup>e</sup> siècles.....	44
Chromatisme et modulation, 19 <sup>e</sup> siècle.....	45

Musiques moderne et contemporaine, 20 <sup>e</sup> siècle.....	46
Tendances de la musique actuelle.....	49
La musique, expression caractéristique d'une époque.....	51
La musique, expression d'un choix d'être.....	51

## **Chapitre 5 - Une approche sensorielle et expérimentale du son : hauteur, intensité, timbre..... 52**

<b>I. Sons graves et sons aigus : hauteur et fréquence.....</b>	<b>53</b>
Écoutons les voix humaines.....	53
Ondulations.....	53
Fréquence du son.....	54
Reproduire un son.....	54
Diapason: la définition du LA.....	55
Sauts de hauteur sonore et intervalles.....	55
Octaves.....	56
7 petites notes de musiques.....	57
Mesure des intervalles, cents et savarts.....	58
Perception de l'oreille.....	58
Amplitudes vocales et instrumentales.....	59
<b>II. Sons forts et sons faibles : intensité et nuances.....</b>	<b>60</b>
Puissance et volume.....	60
L'oreille et les décibels.....	60
Nuances.....	61
La perception du volume varie selon le contexte.....	61
<b>III. Couleurs sonores : timbre et harmoniques.....</b>	<b>61</b>
Harmoniques.....	62
Résonances.....	62
Sonagrammes.....	63
Sons partiels et bruits.....	63
Le timbre ne se réduit pas à une quantité physique.....	64
Superpositions de sons. Les accords.....	64
Le timbre de la voix. Travail vocal.....	65
Les voyelles.....	65
Chant harmonique ou diphonique.....	65

## **Chapitre 6 - Physique et perception du Son..... 67**

Les sons sont produits par des objets vibrants.....	67
Propagation physique du son.....	69
Perception et conscience.....	70
Son, rayonnements et matière.....	72
Analyse physique de l'onde sonore.....	72

## **Chapitre 7 - Les sons créateurs de formes : Ont-ils participé à la formation de l'univers?..... 76**

Les formes résonnantes des plaques vibrantes.....	77
Les découvreurs des formes sonores.....	78
Formes de résonance d'une corde en vibration.....	79
Les figures acoustiques de Chladni.....	80
La voix humaine et le tonoscope.....	83
Formes résonnantes d'une guitare.....	83

Formes vibratoires dans l'air.....	84
Rivières de sable.....	85
Formes mouvantes des liquides visqueux.....	86
Films d'eau.....	87
Gouttes d'eau.....	88
Tourbillons polygonaux dans un liquide en rotation.....	89
Rupture de symétrie.....	90
Réseau cellulaire d'un liquide chauffé.....	90
Davantage de structures sonores.....	91
Les formes des organismes dans la nature.....	91
Les diagrammes sonores des crop circles.....	93
Structures géométriques des planètes.....	94
Le monde a été créé par le son.....	95
La substance primordiale et la géométrie sacrée.....	97

## **Chapitre 8 - Ton, tempéraments et intonation juste Science des nombres et sensibilité humaine..... 98**

Qui décide de la hauteur des notes de la gamme?.....	99
<b>La gamme tempérée, une division mathématique.....</b>	<b>99</b>
Comment diviser l'octave en douze demi-tons égaux?.....	100
La gamme tempérée, un modèle passager parmi d'autres.....	101
<b>La gamme selon Zarlino - intervalles naturels.....</b>	<b>102</b>
Harmoniques naturelles de DO.....	103
La gamme à 5 notes (ou gamme pentatonique).....	104
Cents, fréquences et longueurs de corde.....	104
Deux accords parfaits majeurs naturels.....	105
La symétrie de la quarte et de la quinte.....	105
La gamme naturelle complète.....	106
<b>La gamme d'après Pythagore : science des nombres et du cosmos.....</b>	<b>106</b>
Pythagore, sage initié de la Grèce antique.....	106
Pythagore et les nombres.....	107
De la Grèce antique au Moyen-Âge et à la musique arabe contemporaine.....	108
Le cycle des quintes.....	108
<b>Comparaison des 3 gammes majeures et de leurs intervalles.....</b>	<b>109</b>
Les tons et demi-tons variables et le comma syntonique.....	112
Quintes et quartes.....	112
Tierces.....	113
<b>Les demi-tons de la gamme chromatique et le comma pythagoricien.....</b>	<b>114</b>
Gamme tempérée: tous égaux.....	114
Gamme pythagoricienne: 2 demi-tons inégaux.....	114
Gamme de Zarlino: 3 demi-tons inégaux.....	115
<b>Les tempéraments : un compromis entre sonorité vivante et lutherie.....</b>	<b>116</b>
La gamme et la sensibilité humaine.....	116
Recherche de perfection musicale.....	116
Les changements de tonalités et leurs contraintes instrumentales.....	117
Tempérament égal et tempéraments inégaux.....	118
Précisions sur la justesse des intervalles.....	120
Le tempérament égal à quintes justes.....	122



Les tempéraments optimisés récents.....	123
L'intonation juste - Recherche de la meilleure harmonie.....	124
L'oreille exercée est sensible aux variations subtiles des intervalles.....	124
Le choix d'un univers sonore.....	125
Résonances corporelles et harmonisation.....	126
<b>Chapitre 9 - Les aléas historiques de la fréquence du LA.....</b>	<b>128</b>
Les différents sens du mot <i>diapason</i> .....	129
La mesure des intervalles par les longueurs de corde.....	130
La mesure des fréquences sonores.....	132
La plasticité des notes instrumentales.....	133
La pression du souffle.....	133
La température ambiante.....	135
Quel est l'intérêt de fixer un diapason?.....	135
Je chante seul.....	135
Le chanteur au Moyen-Âge.....	136
La solmisation.....	136
La notation moyenâgeuse n'indique que des intervalles.....	137
Je chante en groupe.....	137
Je chante en étant accompagné par un instrument.....	138
Transposition.....	138
Les ensembles de musiciens.....	138
Accordage instrumental à la Renaissance et à l'époque baroque.....	139
La transposition entre instruments.....	140
Le besoin pratique de consensus.....	140
L'accordage des instruments anciens.....	141
Les méthodes de relevé des diapasons anciens.....	141
Un ton pour l'église, un autre pour l'orchestre, un autre pour l'opéra.....	142
Variations entre instruments.....	143
Évolution selon les époques.....	144
Plus haut?.....	146
Vers un diapason international unique.....	146
Tentatives de normalisation.....	147
Réactions en Europe.....	148
Les diapasons dits "scientifiques": DO 256 et LA 432.....	149
1939, le LA 440.....	151
Les applications approximatives de la norme.....	151
Choix d'un diapason: plus haut ou plus bas?.....	151
Préserver la voix des chanteurs.....	152
Le rendu sonore des instruments.....	152
Diapason et standardisation industrielle.....	153
Produire à l'échelle mondiale.....	153
L'établissement de normes industrielles.....	154
Dans la création, tout est rapport.....	154
Mouvements dans l'espace.....	154
La mesure des longueurs.....	155
La Terre, la seconde et le hertz.....	156
La géométrie de la nature et du cosmos.....	157

Pour une musique vivante.....	158
Le sentiment de l'auditeur.....	158
L'intonation et les rapports entre notes.....	158
L'effet des fréquences sur l'âme et le corps.....	158
Pensées et intentions.....	159
<b>Chapitre 10 - Histoire de la notion de fréquence sonore. Apparition du concept et développement des procédés de mesure.....</b>	<b>160</b>
Fréquence de vibration d'un son.....	160
Objets sonores vibrants.....	160
Sensation de hauteur.....	161
Compter le nombre de vibrations.....	161
Recherches en acoustique.....	162
Rendre visibles les vibrations.....	163
Graver les vibrations.....	163
L'affichage électrique des vibrations sonores.....	164
Popularisation de la mesure des fréquences sonores.....	165
<b>Annexes.....</b>	<b>167</b>
L'art subjectif et l'art objectif selon G.I. Gurdjieff.....	167
Accords des gammes majeures et mineures.....	168
Affirmation de la tonalité.....	168
Accords complexes: Vers la polytonalité.....	171
Physique des ondes sonores et de leur géométrie.....	171
Résonance.....	171
Ondes voyageuses.....	172
Ondes stationnaires.....	173
Les formes créent des sons Instruments photosoniques de Jacques Dudon.....	174
Hexacordes et solmisation au Moyen-Âge.....	175
Du mouvement, de la tension, de la force de la pesanteur, & des autres propriétés des cordes Harmoniques, & des autres corps.....	177
Proposition I La raison du nombre des retours de toutes sortes de cordes est inverse de leur longueur.....	177
Proposition V Expliquer la manière de nombrer très-aisément tous les tours et retours de chaque corde de Luth, de Viole, d'Épinette, etc. et déterminer où finit la subtilité de l'œil et de l'oreille.....	177
<b>En savoir plus.....</b>	<b>179</b>
Résonances des sons dans le corps.....	179
L'éducation musicale.....	179
Gammes et modes.....	179
Évolution de l'expression musicale.....	180
Physique et perception du son.....	180
Caractéristiques sensorielles du son.....	181
Les sons créateurs de formes.....	181
Tempéraments et intonation juste.....	182
Les aléas du diapason.....	183
Histoire des fréquences.....	184

# Chapitre 1

## Résonances corporelles des sons

**Résumé:** Les sons de notre environnement ne stimulent pas seulement les tympans de nos oreilles, ils mettent en vibration certaines parties de notre corps. Toutes les parties de notre corps sont susceptibles d'être mobilisées en fonction de la hauteur et du timbre de ces sons. Apprendre à ressentir et prendre conscience de ces résonances, et plus particulièrement celles provoquées par notre propre voix chantée, est une porte essentielle pour développer d'autres dimensions subtiles de notre être.

Les vibrations sonores, qu'elles soient musique ou bruit, résonnent dans notre corps. Avec un peu d'attention, nous pouvons ressentir ces résonances comme un léger mouvement vibratoire. Certes les tympans des oreilles entrent en vibration sous l'impact des sons, mais ils ne sont pas les seuls. La peau et les tissus sont également mobilisés par les vibrations sonores. Cette résonance est plus ou moins importante en fonction des caractéristiques du son: son volume, sa hauteur, son timbre (voir le chapitre 5 sur les caractéristiques physiques des sons). La sensation de résonance que nous éprouvons est encore plus forte lorsque nous émettons nous-même le son avec notre propre voix, car en plus de la propagation par l'air, la voix est transmise dans le corps à travers les os et les liquides et peut atteindre plus facilement nos tissus et organes.

### La sensation de résonance dans le corps

Si l'expérience des résonances sonores dans le corps est familière à certains, beaucoup n'ont pas eu l'occasion d'y porter attention, car notre enseignement axé sur les connaissances mentales ou quelquefois le savoir-faire accorde rarement une place aux sensations. Aussi, afin de vraiment comprendre ce que signifie ces mots **résonance sonore corporelle**, je vous invite à en faire l'expérience dès maintenant avec votre voix.

*Émettez le son mmmm, le même que vous prononcez lorsque vous vous délectez. Et quand vous avez trouvé ce son, chantez-le sur une note tenue, n'importe laquelle. Quand vous l'avez bien en bouche, posez une main sur votre poitrine et une autre sur votre front, et sentez ce qui se passe. Maintenant, tout en conservant les mains à la même place, chantez le son aaaa et sentez ce qui se passe. Si vous avez senti quelque chose, changez la position des mains pour rechercher s'il y a des différences. Si vous n'avez rien senti, faites de même et modifiez la hauteur et le volume du son.*

Vous avez certainement constaté que le corps vibre de façon différente selon le son émis.

### Le phénomène de résonance

Le phénomène de résonance est bien connu et largement étudié en physique. Les sons sont provoqués par la vibration physique de l'air ou de toute matière gazeuse, liquide ou solide (voir chapitre 6, *Physique du son*). Un objet peut se mettre à résonner, à vibrer, s'il est touché par un son qui est en accord avec lui. Par exemple, vous êtes en voiture et vous augmentez doucement votre vitesse. À un certain moment, un objet dans la boîte à gants ou une pièce de carrosserie se met en vibration et émet un zzzzz. Si vous augmentez la vitesse, le phénomène cesse. La vibration a lieu lorsque la vitesse de rotation du moteur est en accord avec la fréquence de vibration de l'objet ou de la pièce. De même, une vitre se met à vibrer dans votre pièce au passage d'un avion.

Dans le chapitre 5 à propos du timbre, je donne un exemple de résonance des cordes d'un piano. On fait sonner une corde et d'autres cordes se mettent à vibrer, justement celles qui sont en accord avec celle qu'on a jouée. Elles sont en accord si leurs fréquences sont en rapport simple, c'est-à-dire si elles ont des harmoniques communes.

Ce qui est vrai pour des cordes de piano est également vrai pour les tissus corporels. Les tissus et organes se mettent à vibrer très finement lorsqu'ils sont touchés par les sons dont la fréquence est en accord avec eux. Le cerveau aussi peut être stimulé par le son et même endommagé par certaines fréquences qui résonnent avec la boîte crânienne. Des armes ont été fabriquées sur ce principe.

### Le son dans la peau et les os

Si vous avez l'occasion de vous immerger dans l'eau, oreilles comprises, et que vous écoutez de la musique diffusée par des hauts-parleurs placés dans l'eau (comme le propose F. Louche), **vous percevrez très clairement cette musique, même en vous bouchant les oreilles**. Nous la percevons avec tout le corps. Mieux, selon les sons émis (musique, voix parlée), on a l'impression que le son vient soit du bas du corps, soit du haut, quelquefois le cœur, d'autres fois le coccyx, etc.

Le son vient toucher nos organes et nos tissus par d'autres voies que le tympan. **Certaines parties du corps résonnent plus que d'autres selon les caractéristiques du son.**

Nous allons affiner nos perceptions et déterminer ces caractéristiques. Nous allons les trouver dans leurs qualités de hauteur et de timbre.

### Les résonances sonores s'étagent sur toute la hauteur du corps

*Vous allez chanter un éééé et faire varier sa hauteur, tout en posant vos mains sur la poitrine, le ventre, les reins ou la tête. Chantez des sons graves, des sons aigus et des sons moyens. Que constatez-vous?*

Les notes graves résonnent dans la bas du corps, les notes aiguës résonnent dans la tête, les notes moyennes dans la poitrine. On peut s'amuser à balayer lentement le corps avec le son comme on le ferait avec un projecteur lumineux en produisant un son continu depuis le plus grave jusqu'au plus aigu.

Vous pouvez également chanter une gamme en montant à partir du DO (ou du SI ou LA si vous vous sentez plus à l'aise), et sentir où ça résonne en vous. Le DO résonne souvent dans le ventre et vous sentirez les vibrations monter en vous au fur et à mesure que vous égrainez les notes jusqu'au DO (ou SI ou LA) à l'octave. **Par la gamme vous couvrez une étendue importante des résonances de votre corps, du ventre jusqu'à la tête.**

### Les 7 notes et les 7 chakras

Même si la localisation d'une note ne se manifeste pas avec précision, le phénomène de correspondance entre le corps et les notes est suffisamment remarquable pour qu'on puisse s'interroger sur le mécanisme qui le produit. Est-ce un effet semblable à la résonance physique? Nous avons vu plus haut que des objets pouvaient entrer en résonance lorsqu'ils sont touchés par un son. Et j'ajoute: ou chaque fois qu'ils sont mis en vibration de façon mécanique. C'est ainsi qu'une cloche sonne lorsqu'on la frappe d'une façon particulière et une corde de violon sonne lorsqu'on la frotte d'une façon particulière. Le son émis par la corde dépend de sa longueur, mais aussi de sa matière. De même les petites cloches émettent des sons aigus tandis que les grosses cloches émettent des sons graves. Ils sont d'autant plus graves que la matière est dense.

Aussi demandons-nous si notre corps ne recèle pas des structures musculaires ou osseuses équivalentes à de petites cloches légères dans le haut et de grosses cloches compactes dans le bas. À ma connaissance, rien de cela n'existe. Bien au contraire, alors que les muscles et os ont à peu près la même consistance dans le haut et le bas du corps, chacun ressent les résonances s'étagées en gros de la même façon, qu'il soit lourd, dense et grand, ou petit, léger, aérien, homme ou femme. Cela n'est donc pas uniquement un phénomène physique. Or le corps est sous-tendu par un emboîtement de corps subtils et un réseau de chakras. Ce sont les **chakras** qui semblent

correspondre à ces structures résonnantes. Les chakras sont des structures énergétiques associées à des régions de notre corps qui régulent les principales fonctions du corps (*voir mon article Les corps énergétiques et les chakras*). Il faut également prendre en compte que chakras et corps subtils sont reliés à l'environnement et à l'univers et ne sont pas des structures isolées, et que de plus tout cela est influencé et modulé par notre mental (*voir plus loin l'influence de l'imaginaire*).

L'étagement des résonances dans le corps en fonction des hauteurs de notes se retrouve logiquement dans les chakras. **La gamme de 7 notes se déploie sur les 7 chakras, du DO au niveau du chakra racine au SI au chakra de la couronne.** La tradition indienne en a fait une méditation connue sous le nom de *Sapta Swara* qui veut dire [méditation des] 7 notes. Toutefois, ces notes ne sont pas fixées en hauteur absolue. Le LA défini par une fréquence, par exemple 440 hertz ou une autre valeur, est une notion moderne. Autrement dit on peut sentir que la note convenable du bas n'est pas obligatoirement un DO moderne. C'est pourquoi dans le tableau ci-dessous, j'adopte la notation indienne SA, RI, etc. qui est relative (*voir chapitre 5 sur la hauteur des sons*). De même, la gamme n'est pas obligatoirement la gamme majeure occidentale. Les notes peuvent appartenir à un autre mode, c'est-à-dire comporter des dièses et des bémols (*voir chapitre 3 à propos des modes*).

### Marie-Louise Aucher et la Psychophonie



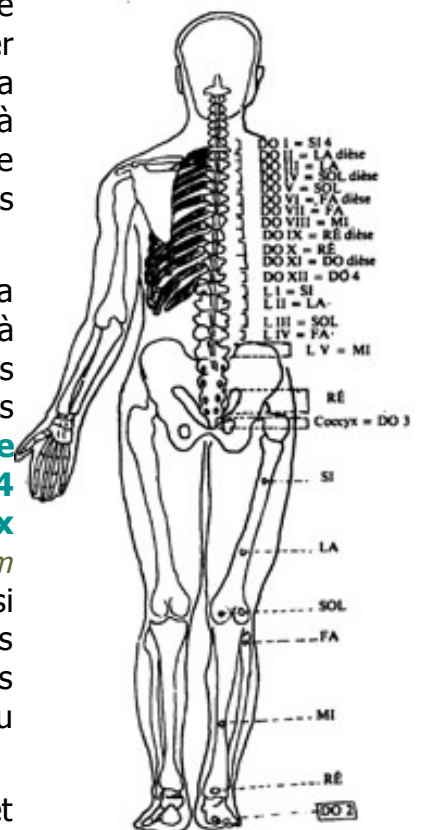
*Marie-Louise Aucher dans sa salle d'enseignement à Sancerre en 1988*

Cantatrice et professeur de pose de voix, **Marie-Louise Aucher** chantait dans une église dans les années 1960, accompagnée aux orgues, quand elle s'aperçut que chaque note de forte intensité résonnait à un niveau particulier de son corps. Approfondissant sa découverte, elle en vint peu à peu à construire le schéma de la figure ci-contre qui donne la correspondance entre les notes et l'étendue verticale du corps.

On constate que la localisation de la résonance sonore monte au fur et à mesure que les notes deviennent plus aiguës. Ces localisations sont identiques pour tous, hommes et femmes. **L'échelle sonore du corps humain s'étend sur 4 octaves, du DO2 qui résonne aux**

**pieds, au DO6, qui résonne au sommet de la tête** (*pour le nom des notes, voir le chapitre 5 sur la hauteur des sons*). On peut aussi percevoir 3 autres octaves au-dessus de la tête correspondant à nos dimensions spirituelles. M.L. Aucher découvre que ces localisations correspondent exactement aux points d'acuponcture du vaisseau gouverneur, ce qui est absolument remarquable.

Expérimentant plus loin, M.L. Aucher constate que tout son intense, et pas seulement celui des orgues a le pouvoir de produire des résonances dans le corps, et particulièrement la voix humaine. En gros, l'étendue de la voix masculine produit des résonances allant des pieds aux épaules, tandis que les femmes émettent les notes allant du sacrum au haut de la tête. C'est à partir de ces observations que M.L. Aucher a développé sa méthodologie d'harmonisation physique et psychique par la voix, la **psychophonie**.



*Résonances sonores dans le corps selon Marie-Louise Aucher (schémas extraits de "En Corps chanté")*

## Résonances multiples

Ces résultats ne sont-ils pas contradictoires avec l'expérience décrite plus haut, à savoir une gamme étagée du ventre à la tête? J'ai envie de vous dire: faites-en l'expérience et concluez. Peut-être êtes-vous bien éduqués à penser qu'il n'y a qu'une seule réponse juste et que l'une exclue l'autre? Et bien non, il peut y avoir plusieurs réalités superposées et les deux phénomènes coexistent. Car la résonance est un phénomène complexe. Un son ne résonne pas à un seul endroit du corps. Il peut avoir une résonance principale et des résonances secondaires, ou des régions entières de résonances. Un son peut lui-même comporter plusieurs sons partiels, en particulier des harmoniques qui créent des résonances multiples. En réalité, chez les chanteurs expérimentés (pas forcément professionnels), donc lorsqu'on a acquis une bonne conscience de la place des appuis de la voix dans le corps, le son résonne partout et semble émaner du corps entier. Tout le corps vibre à la manière d'un gong ou d'un tambour.

## Les voyelles et les chakras

*Voici une autre expérience. Je vous propose de chanter éééé comme précédemment, sur une note fixe dans votre registre moyen, autrement dit proche de votre voix normale. Maintenez ce son. Puis doucement, vous changez la voyelle et vous la maintenez sur la même note que la précédente. Vous passez successivement par les sons é, a, o, ou, u, i, è, mm. Constatez où cela résonne dans votre corps.*

### Les localisations des vibrations dans le corps changent avec les voyelles prononcées.

Tout en gardant à l'esprit le phénomène des résonances multiples, on remarque que les voyelles aaaa, oooo, éééé résonnent plus dans le grave ou le bas médium, tandis que les voyelles telles que èèèè et iiii résonnent dans le haut du corps. Or la différence de son entre les voyelles réside dans leur timbre, autrement dit leur composition en harmoniques (*voir chapitre 5 sur le timbre et les harmoniques*). On peut dire que **les résonances sonores corporelles varient en fonction de la composition en harmoniques**.

Ces phénomènes sont d'ailleurs connus depuis longtemps. Par exemple, T. Michaël rapporte les correspondances entre les sons et les chakras selon la tradition indienne dans un texte ancien de **Minanatha** du 7<sup>e</sup> siècle de notre ère. Ces correspondances ne sont pas uniques et peuvent varier légèrement d'un texte à l'autre. Dans un autre texte de **Purnananda** au 16<sup>e</sup> siècle, on trouve des correspondances avec des syllabes autres que des voyelles: LAM, VAM, etc. qui diffèrent par le son avec lequel on attaque le A.

Chakra	Racine	Hara	Plexus solaire	Coeur	Gorge	Conscience	Couronne
Emplacement approximatif	Organes génitaux	Nombriil	Plexus solaire	Cœur	Gorge	Entre les sourcils	Sommet de la tête
Les 7 notes	<b>SA</b>	<b>RI</b>	<b>GA</b>	<b>MA</b>	<b>PA</b>	<b>DHA</b>	<b>NI</b>
selon Minanatha			<b>A</b>	<b>OU</b>		<b>MM</b>	
selon M.L. Labonté		<b>O</b>		<b>A</b>	<b>È</b>	<b>I</b>	<b>MM</b>
selon R. Prasad	<b>A</b>		<b>O</b>	<b>É</b>		<b>I</b>	
selon Purnananda	LAM	VAM	RAM	YAM	HAM	OM	Silence

M.L. Aucher a su en redécouvrir certains aspects et les redonner à notre civilisation qui les avait abandonnés. D'autres expérimentateurs et enseignants en France et ailleurs ont apporté leur collaboration à cette recherche (**M.L. Labonté, R. Prasad**, etc. - voir le tableau).

## Résonances vocales corporelles et imaginaire

*Chantez un aaaa à une hauteur déterminée, moyenne. Puis, en le chantant, imaginez que vous envoyez ce son dans la poitrine, et sentez avec vos mains. Puis la même chose avec l'intention d'envoyer le son dans la tête. Puis dans le ventre.*

Les résonances changent de localisation dans le corps même en conservant la même hauteur et la même voyelle. Cela indique entre autre qu'il faut se garder d'avoir à l'esprit un schéma trop simpliste et trop rigide sur les correspondances. En fait **le pouvoir de l'intention, encore nommée pensée, image mentale, imaginaire, est extrêmement grand et suffit à provoquer des effets notables dans le corps.**

À l'écoute, on remarque que les trois aaaa chantés avec les trois intentions différentes n'ont pas la même couleur, pas le même timbre. Il ne sera pas forcément facile au chanteur de s'en rendre compte, toutefois ce sera évident pour une autre personne qui l'écoute attentivement. Le aaaa placé au ventre a une sonorité plus profonde, plus grave que celui de la tête qui semble plus léger, alors qu'ils sont tous les deux à la même hauteur. Ce qui est plus grave ou plus aigu, ce sont les composantes harmoniques du son. Le changement de placement des résonances produit des harmoniques différentes.

## La voix, instrument de bien-être et d'harmonie

Implicitement nous nous imaginons sans trop y porter attention que le son est produit par les cordes vocales et émis par la bouche. C'est en partie vrai puisque la bouche est l'organe de l'émission sonore. Cependant la vibration sonore, lorsqu'elle est guidée par l'intention, s'étend à tout le corps qui l'amplifie à la manière d'une caisse de résonance, et l'émet comme un instrument de musique. *"Celui qui chante bien fait de tout son corps une sorte d'instrument extraordinaire, qui se prend à vibrer par un appui total du larynx sur la colonne vertébrale. De ce fait, c'est la colonne qui chante, et qui en chantant, fait vibrer tout le corps, notamment les os du crâne. Le son vrai sort de partout et non pas seulement de la bouche."* (Alfred Tomatis)

La qualité des sons émis par le chanteur dépend de la facilité et de la liberté avec laquelle résonnent les zones correspondantes de son corps. Cela se manifeste dans le timbre, la couleur de ces sons. Par exemple, ils peuvent paraître plus fades, criards, éteints, agressifs, etc. si la "caisse de résonance" corporelle est encombrée de blocages musculaires et mentaux. En somme, **notre voix est le témoin de notre état physiologique et psychologique.**

Réciproquement, chanter ou émettre des sons tels que des voyelles ou onomatopées, sans forcément rechercher la justesse ou l'exécution conforme d'une œuvre connue, est une façon de masser, réveiller, harmoniser les tissus endormis, rigidifiés, encombrés ou privés d'énergie. Dans le domaine de la mécanique, il est habituel de nettoyer de petites pièces métalliques en les plongeant dans l'eau et en les soumettant à des ultrasons. Cela prouve bien que le son agit fortement sur la matière, en particulier sur notre chair. **Le chant est en quelque sorte une thérapie douce et sans danger**, d'autant plus efficace que le chanteur travaille dans le but de faire résonner sa voix dans tout le corps.

Dans la tradition religieuse indienne, on utilise de petits chants appelés **mantras**, destinés à opérer un nettoyage du corps et une purification mentale. Par la vibration juste, le chant réaccorde l'instrument corporel et lui restitue son harmonie. La maladie est décrite comme la perte de cette

harmonie sonore. *Le Cosmos entier se manifeste en un certain nombre de mantras: l'Univers est sonore [...]. Un mantra est un symbole dans le sens archaïque du terme: il est en même temps la réalité symbolisée et le signe symbolisant. Il existe une correspondance occulte entre, d'une part, les lettres et les syllabes mystiques et les organes subtils du corps humain, et d'autre part entre ces organes et les forces divines endormies ou manifestées dans le Cosmos. En travaillant sur un symbole, on "réveille" toutes les forces qui lui correspondent, à tous les niveaux de l'être.* (Mircea Eliade, *Le Yoga*, 1983)

Cette connaissance est remise en honneur et renouvelée par des enseignants contemporains dans un langage adapté à notre civilisation occidentale et moderne. *Toute la manifestation cosmique commence par le Son primordial incréé. Tous les autres éléments qui composent la structure de l'univers sont un dérivé vibratoire du son, jusqu'à ce que nous en arrivions à la fréquence vibratoire la plus dense, l'élément terre. L'univers entier tourne autour d'une grande symphonie cosmique de pulsation vibratoire incessante qui émane de la divine Octave directrice à partir de laquelle tout est recréé, s'étend et se transforme à l'infini. [...] La maladie n'est qu'une perte de fréquence [de vos systèmes corporels], et rétablir la tonalité signifie retrouver le bien-être et l'harmonie.* (Ramathis-Mam, *Révélation d'Arcturus*, 2004)

Sentir et ressentir les résonances dans notre corps est une capacité qui peut être développée par l'attention et l'entraînement. Notre sensibilité s'accroît alors progressivement et cela a des conséquences positives dans tous les domaines de notre vie. **La capacité à sentir les résonances corporelles nous amène à l'écoute de nous-même**, à l'écoute de notre enfant intérieur et de nos besoins profonds, qui est la porte ouverte pour entrer dans des dimensions plus subtiles de notre être. (*voir mon article [Le langage des émotions](#)*)

18 avril 2007



## Chapitre 2

# L'éducation musicale vivante selon Edgar Willems

Publié dans la revue *Routes Nouvelles* n°62, octobre 1973

### L'éducation musicale doit collaborer au plein épanouissement des facultés humaines.

Il ne s'agit pas de faire l'éducation musicale d'un enfant dans le but de lui fournir une occupation, un divertissement, mais pour développer en lui des éléments de vie qui sont prêts à être utilisés: *la musique est l'expression de la vie*. La musique c'est la vie.

Les musiques traditionnelles et ethnologiques, non savantes, faites sans l'aide du solfège, le prouvent bien. Elles naissent spontanément, souvent accompagnées de mouvements de danses, pour les fêtes (mariages, fêtes religieuses, changements de saison, etc.); ou pour rythmer les gestes du travail (chants pour hisser la voile ou un fardeau, de labour, de chasse, d'appel, pour tisser, pour repiquer le riz, pour piler le maïs, etc...).



Edgar Willems avec de jeunes élèves

La musique est donc mouvement. Elle exprime aussi un sentiment. C'est par elle que les peuples crient leur joie et leur douleur (chants d'amour, religieux, de fête, de caractère magique ou divin). Elle fait donc appel à des éléments physiques et psychologiques et n'est pas un exercice intellectuel comme on le considère souvent dans l'enseignement.

### La radio a tué le chant

Chez les peuples occidentaux, la musique ethnique reste limitée à une reconstruction intellectuelle figée des groupes folkloriques [*note: en 1973*]. Ceci est dû à la forme de la société actuelle, aux rapports de plus en plus conventionnels entre les hommes (l'être humain perdu dans la foule de la grande ville ne transmet plus ses traditions à son entourage), aux moyens d'information très développés (on préfère regarder la télé plutôt que de se réunir sur la place du village). La radio a tué le chant.

De même, les éléments profonds qui sont à la base de la musique sont très souvent étouffés par cette vie moderne et par l'éducation: la chansonnette était autrefois le moyen de donner à l'enfant le sens musical; le rythme de la vie intérieure est détruit par le rythme de la vie extérieure. Il est facile de le constater: un enfant a le sens du rythme, de très nombreux adultes ne l'ont pas et sont incapables de dire, parmi deux sons proches, lequel est le plus haut.

Le but de l'éducation musicale est d'éviter d'étouffer ces possibilités chez l'enfant, de les développer et de le préparer à la pratique de la musique. Requérant la participation de l'être humain dans toutes ses dimensions (sensorielles, affectives, spirituelles), elle collabore au développement de ses pléines facultés.

## Des éléments qui forment un tout

Recherchons les éléments physiques et psychologiques de la personne humaine qui entrent dans la pratique de la musique. Edgar Willems dont la méthode active nous inspire largement dans cet article, propose ce schéma:

Musique	Homme
Art	Intuition et création
Harmonie	Vie mentale
Mélodie	Vie affective
Rythme	Vie physiologique et sensorielle

Chacun de ces éléments a besoin des autres, c'est un tout, une unité. La musique est un fait global. On remarque aussi que la synthèse est de plus en plus poussée de bas en haut. On passe du son à l'intervalle (constituant la mélodie) et à l'accord (constituant l'harmonie) qui contiennent respectivement un, deux et trois sons. Pour bien comprendre ce schéma, il suffit de savoir que le rythme est essentiellement du mouvement, donc un élément physique et que la mélodie exprimant un état d'âme doit être interprétée avec sensibilité. Enfin, pour pouvoir distinguer les trois sons d'un accord, le cerveau entre nécessairement en jeu.

## Comme la langue maternelle

Ce n'est donc pas le solfège que l'éducateur cherchera à enseigner d'abord: la musique s'acquiert comme la langue maternelle. On chante sans avoir conscience des sons ni des rythmes. Peu à peu, on distingue les divers éléments. Enfin on cherche à les écrire. Ainsi le solfège apparaît en dernier. Il est la transcription symbolique de quelque chose de vivant. À la lecture, il faut retrouver, derrière les notes, la vie et non pas déchiffrer d'une manière mécanique. Débuter par le solfège est un non-sens: processus mental et abstrait, il est vide de signification s'il n'est pas précédé de la pratique. On aura donc le schéma d'acquisition suivant:

### Initiation

- développement du sens rythmique
- développement de l'oreille sensorielle, affective, mentale
- pratique des chansons

### Pré-solfège

- ordonnance en hauteur des sons, des notes
- graphisme, dessiner les mélodies
- écriture

### Solfège

## Des exercices basés sur la vie

Comment développer audition et rythme? Nous aurons toujours à cœur que notre méthode permette à l'enfant une adhésion active, qu'elle lui fasse aimer la musique et que les exercices soient toujours basés sur la vie. On ne doit pas faire appel à des moyens extra-musicaux qui

encombrent la mémoire: pas de couleurs, de dessins, de phononymie, d'histoires, de jeux, mais un matériel auditif varié, des chansons d'intervalles, des frappés, un vocabulaire correct, des mouvements corporels. Au début, il s'agit moins de pousser à la perfection que de permettre à l'enfant d'extérioriser sa vitalité et de développer son esprit d'initiative.

## L'audition et le rythme

Sans nous soucier d'ordre pratique, faisons la liste des domaines où doit porter notre éducation. Elle relève de deux grandes rubriques:

### Les rythmes

#### Mouvements naturels

- sur une musique, trouver le pas (marche, sautillé, course...). Ou mieux: à partir d'un rythme battu dans les mains en marchant, quelqu'un improvise une mélodie.

#### Improvisations rythmiques

- Inventer des rythmes libres, avec des timbres différents. On peut le faire sous forme de questions et réponses. Accompagner d'onomatopées, sans réfléchir.
- Même chose avec des rythmes mesurés: on bat d'abord la mesure et on improvise.
- Quelqu'un bat un rythme mesuré en marchant; tout le monde reprend. L'éducateur accompagne (par exemple à la guitare) en jouant d'autres rythmes.

#### Les rythmes des chansons

- Battre le temps, la division du temps, la mesure.

### L'audition

#### Le mouvement sonore

- Faire reconnaître si le son monte ou descend; faire chanter des montées et des descentes; demander d'accompagner avec la main; le représenter graphiquement; le lire.

#### Le grave et l'aigu

- Écouter, reconnaître des objets sonores divers; les classer par ordre de hauteur croissante. On peut apprécier jusqu'au centième de ton.

#### Le mouvement mélodique

- Reproduire sur "la" ou avec le nom des notes, des motifs joués par l'éducateur.
- Inventer des motifs musicaux (sous forme de question et réponse).
- Reproduire, reconnaître des intervalles.

#### L'harmonie

- écouter, reproduire des accords.
- trouver la tonique d'une chanson.
- improviser une mélodie sur une suite d'accords.

## Savoir captiver

Notre but est d'abord d'intéresser les enfants, de les amener à participer activement, de provoquer leur enthousiasme. Il ne faut pas chercher absolument la perfection, mais seulement l'effort. Il

faudra être observateur et veiller à ce que l'enfant n'arrive pas au résultat par d'autres moyens, par exemple en substituant la connaissance à la spontanéité: en improvisation, ne pas chanter un air déjà connu, mais improviser au fur et à mesure librement, sans réfléchir et surtout sans se contrôler. On fera donc très souvent appel à l'invention, à l'esprit d'initiative, aux possibilités créatrices de l'enfant. Celui-ci jouera parfois au professeur, en donnant un rythme repris par les autres.

- Toujours dans le souci de rendre la séance attrayante. nous battons les rythmes mesurés avec des instruments de percussion (triangle, bâtonnets, etc.).
- De même pour les exercices d'audition, nous faisons appel à un matériel varié: clochettes et grelots, sifflets, flûte à coulisse pour les montées et descentes, xylophone... Très souvent on peut les construire soi même, bouteille, maracas avec des boites d'"Ajax" des pots de yaourt, à classer par ordre croissant, etc.

## **Avec les plus grands**

Le but étant toujours de provoquer l'intérêt et l'enthousiasme, nous utilisons, à la place des chansons enfantines, de jolis chants adaptés à leur âge. On pratique le chant choral ou on étudie un instrument de musique (flûte ou guitare). Mais il ne dispensera pas de chanter, de reproduire les sons. Il sera simplement la motivation de l'éducation musicale. On alterne les séances d'éducation musicale et celles d'instrument ou de chant.

L'invention est malheureusement assez faible, car les adolescents et adultes ont perdu leur spontanéité. C'est dans les exercices de rythmes qu'on l'obtient le plus facilement. Parfois, ils ne veulent pas chanter. Dans ce cas, l'instrument est de rigueur au début.

On peut aborder le solfège immédiatement, car les plus grands sont capables d'abstraire. Mais n'oublions pas qu'on doit faire appel aux éléments vécus: audition et rythme. Ainsi le solfège, nécessaire à la pratique du chant et de l'instrument, sera associé à leur étude et alternera avec l'éducation musicale.

# Chapitre 3

## Gammes et modes musicaux

**Résumé:** La gamme est un condensé de mélodie qu'on peut appréhender sans connaître le solfège, par l'approche sensorielle. La gamme, c'est ce qui change sur les instruments à notes fixes lorsqu'on change la hauteur de la mélodie. La notion de mode est naturelle et reliée à la hauteur relative. Un mode, c'est ce qui reste fixe lorsqu'on change la hauteur de la mélodie. C'est une façon de diviser l'octave en échelons intermédiaires. Cette distinction est apparue récemment dans l'histoire musicale, en même temps que l'idée de hauteur absolue.

Ceux qui, conditionnés par le gavage scolaire, s'imaginent que l'univers musical repose en tout et pour tout sur les modes majeur et mineur, devront réviser leur point de vue et reculer les frontières de leur esprit. La construction des modes devient un jeu surprenant et amusant. De la manière d'arranger des intervalles à l'intérieur d'une octave. Découverte de nombreux types de modes produits par des cultures créatives de notre vaste monde. Modes pentatoniques et heptatoniques. Gammes occidentales, tziganes, indiennes, contemporaines, chinoises, arabes, etc. avec illustrations sonores.

### I. Nature et constitution, une approche sensorielle

**Qu'est-ce qu'un mode? Existe-t-il d'autres modes que majeur et mineur? Quelles différences y a-t-il entre un mode et une gamme?**

Je me posais ces questions tandis que j'étudiais le solfège dans mon adolescence. Malheureusement, mon livre de solfège n'apportait pas les réponses. J'ai donc fouillé ailleurs mais je ne disposais pas de documentation spécialisée dans mon environnement. Heureusement par la suite, j'ai recueilli de bonnes connaissances à ce sujet dans les cours d'éducation musicale Willems (avec Jacques Chapuis), puis la documentation spécialisée m'est devenue accessible. Or ces connaissances recueillies me sont apparues, non pas comme un perfectionnement destiné aux spécialistes, mais bien comme le fondement même de la pratique musicale. Pourtant, les écoles de musique conventionnelles n'abordaient pas ce sujet dans la formation de base. C'est pourquoi je partage ici ma compréhension de ces notions, de leur importance et de leurs implications, et je vous invite tout d'abord à les découvrir par vos sens.

*L'approche est sensorielle, parce que nous découvrons avec nos sens, en l'occurrence l'oreille et le corps, à partir de notre pratique musicale familière ou grâce à des exercices sonores que je vous propose. Cela s'oppose à une approche théorique ou à un savoir intellectuel figé. Le savoir intellectuel est un fabuleux outil, mais coupé de l'expérience, il devient porteur d'idées reçues sans vérification sensorielle. Exemple: si vous affirmez "une note ne sonne juste que si elle est en rapport harmonique", est-ce votre constatation personnelle, ou la répétition de ce que vous avez lu? Vous saisissez ce que je veux dire?*

La notion de **gamme** nous est plus ou moins familière, car nous en entendons parler par ceux qui suivent des études musicales instrumentales, à moins que ce soit nous-mêmes qui les suivions, et nous devons passer par la répétition fastidieuse des gammes, *Do majeur, La mineur*, etc. Dans ce contexte, on apprend que le concept de "gamme" se distingue du "mode". Il existe deux **modes**, le mode *majeur* et le mode *mineur*. À partir de chacun d'eux on construit autant de gammes qu'il y a de notes de départ possibles, donc 12, *Do majeur* et *Do mineur*, *DO# majeur* et *DO# mineur*, *RÉ majeur* et *RÉ mineur*, etc.

Cela semble un peu confus, et le but de cette *première partie* est d'examiner la nature et la constitution des modes et des gammes afin de comprendre leurs différences. La *deuxième partie* exposera un ensemble varié de modes.

Le *chapitre 8* nous introduira à la science des nombres qui a présidé à l'élaboration de plusieurs types de gammes au cours des temps, en fonction de la mentalité de l'époque.

## Une approche de la notion de gamme

Lorsque nous chantons un chant simple, disons *Au clair de la lune*, nous ne cherchons pas à savoir dans quelle gamme il est composé n'est-ce pas? Cela ne nous empêche pas de le chanter de façon agréable et juste. D'ailleurs quel intérêt cela a-t-il de savoir qu'il est interprété dans une gamme particulière, mis à part quelques considérations pratiques pour ne pas chanter trop haut ou trop bas? La question prend un sens beaucoup plus intrigant si l'on cherche à comprendre ce qui distingue les musiques du monde les unes des autres, et si l'on analyse la construction intime de ces musiques.

### Comme le langage parlé

Lorsqu'on parle, dès l'enfance on emploie un certain langage sans se questionner et ça fonctionne bien, mais un jour, on se demande: que sont les mots, les phrases, à quelle syntaxe obéissent-ils et pourquoi? De la même façon je m'interroge sur les mots et la syntaxe de la musique et je cherche quelle est l'origine de cette grammaire et qu'est-ce qui la justifie. Cela correspond-il à des lois internes, biologiques, cosmiques ou à de simples conventions culturelles?

Pour répondre à cette question, revenons à notre pratique simple et familière, et amusons-nous à repérer les notes qui composent notre chant *Au clair de la lune*.

### La première note

*Chantez la première phrase ("Au clair de la lune, mon ami Pierrot") sans les paroles, sur le son DOU. Puis sur un clavier ou tout autre instrument de musique, repérez quelle la première note. Est-ce un LA, un SOL, un DO, un MI bémol?*

Il n'y a pas de note imposée, elle est ce qu'on veut. Vous avez le choix, cela dépend de votre voix. Certains d'entre vous chantent plutôt aigu et d'autres plus grave. Or votre chant ne dépend pas de cette note de départ, car quelle qu'elle soit, on le reconnaîtra, il gardera son identité.

*Essayez de le chanter plusieurs fois en démarrant à chaque fois sur une note différente.*

### Les autres notes de la gamme

L'étape suivante de notre exploration est de savoir quelles sont les autres notes de la chanson. Le problème prend un aspect pratique différent selon qu'on le chante, ou qu'on l'interprète avec un instrument. Si je joue sur un instrument, une note correspond à un **doigté** spécifique de cet instrument, à une touche du clavier et cette touche porte un nom. Si je veux jouer plus haut, je dois changer de touche, donc de note. Commençons par la note DO du clavier.

#### « Au clair de la lune »

Les notes qui suivent sont DO DO DO RÉ MI, RÉ, ...etc.. Continuant avec les phrases musicales suivantes ("ma chandelle est morte"), on trouve les notes RÉ, DO, SI, LA, SOL. **La gamme est le condensé de toutes ces notes, rangées par ordre croissant:** DO, RÉ, MI, SOL, LA, SI. 6 notes seulement suffisent à construire ce chant.

Confirmons ce résultat en regardant ce qui se passe avec le chant "Ah vous dirais-je maman". Si vous commencez sur la note DO du clavier, quelles notes rencontrez-vous?

#### « Ah vous dirais-je maman »

DO DO SOL SOL LA LA SOL, puis les notes FA, MI, RÉ, DO. D'où la gamme: DO, RÉ, MI, FA, SOL, LA. 6 notes également, mais pas tout à fait les mêmes.

## « La gamme majeure »

Ces deux séries de 6 notes sont en fait extraites de la série complète des 7 notes qui composent la gamme de DO majeur :

**DO - RÉ - MI - FA - SOL - LA - SI**

## Hauteur relative, hauteur absolue

### Changer la note de départ

Passons à l'étape suivante de notre construction. Que se passe-t-il si je veux partir d'une note différente? D'un MI, par exemple. Vous avez probablement vécu cette expérience: vous fredonnez une chanson connue et votre copain ou copine se met à la chanter avec vous, mais c'est un peu difficile pour lui parce que la mélodie descend dans des graves qu'il a du mal à émettre. Alors que faites-vous? Si vous êtes sympa, vous la chantez plus haut. C'est banal comme expérience, et pourtant elle permet de nous confronter à la dénomination des notes. C'est la même chanson n'est-ce pas? Mais ça change toutes les notes alors que c'est le même air.

Ainsi, pour *Au clair de la lune*, on aura: MI, MI, MI, FA#, SOL#, et la gamme majeure sera celle de MI majeur:

MI, FA#, SOL#, LA, SI, DO#, RÉ#, MI.

### Ce qui reste fixe quand on change de hauteur, les intervalles

Donc la question est maintenant: si toutes les notes changent quand je chante le chant plus haut, alors que je reconnais parfaitement la mélodie, même sans les paroles, qu'est-ce qui reste fixe et qui *identifie le chant*?

Réponse, **ce sont les distances en hauteur entre les notes**, la distance entre la première et la deuxième, la deuxième et la troisième et ainsi de suite. Ce qui est important, ce n'est pas vraiment le nom absolu des notes, mais que l'air soit juste. Ces distances de hauteur sont appelées des **intervalles** (*voir chapitre 5 sur les sensations sonores*). La hauteur d'une note est repérée par rapport à la précédente (intervalle entre 2 notes consécutives). Musicalement, il est plus juste de la repérer par rapport à la note de base, par exemple la note de démarrage (intervalle avec le son fondamental, appelé la tonique). C'est ce qu'on appelle la **hauteur relative**. La **hauteur absolue**, c'est quand on fixe une hauteur précise, une note déterminée pour la tonique. Un musicien est sensible à la hauteur relative alors que la hauteur absolue ne lui importe que secondairement pour des raisons techniques de doigté. (*Voir plus bas des précisions sur l'historique de la notion de hauteur absolue*)

Lorsque je change la hauteur de la mélodie, je change de gamme, mais les intervalles restent les mêmes, je reste dans le mode majeur. **Ce qui reste fixe lorsqu'on change une mélodie en hauteur, c'est l'ensemble des écarts, des intervalles, on l'appelle le mode.**

Je peux chanter une gamme majeure plus haut ou plus bas. Cela change la gamme, ça ne change pas la mélodie, car les gammes sont en elles-mêmes de petites mélodies. On reste en mode majeur.

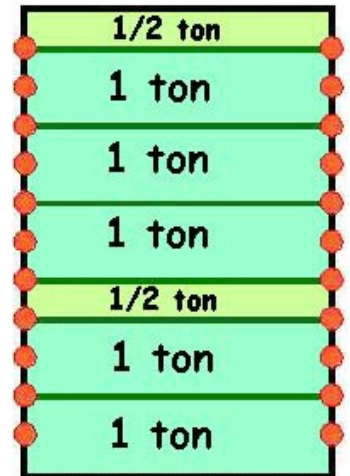
Alors qu'est-ce qu'un mode?

## Qu'est-ce qu'un mode?

**Un mode, c'est la mélodie de la gamme. Il est caractérisé par la grandeur des intervalles entre les notes.** Donc le **mode** majeur, c'est l'air de la gamme de DO majeur ci-dessus, chanté à n'importe quelle hauteur. Il est fait d'une superposition d'intervalles bien

déterminés entre les notes. On peut le représenter par une échelle sur laquelle les barreaux sont espacés à des intervalles fixés mais pas égaux, soit un **ton**, soit un demi-ton. En musique, les barreaux sont appelés des **degrés**.

Il en découle qu'un **mode**, c'est une façon de diviser l'octave en **échelons intermédiaires, qui délimitent des intervalles. Les modes diffèrent les uns des autres par le nombre de barreaux**, 5, 6, 7 ou plus (on ne compte pas le dernier en haut, qui est la répétition à l'octave du premier), et **l'espacement entre barreaux** qui pour l'ensemble des modes peut être d'un ton (que je noterai T), un demi-ton (noté d), et un ton et demi (T+d).



N'imaginons pas que la grandeur d'un ton est quelque chose de bien déterminé avec un étalon de mesure comme le mètre. Elle peut varier, selon les époques et les cultures, il n'y a pas de définition imposée (*voir le chapitre 8, Ton et intonation*).

En réalité, comme mentionné plus haut, il est plus musical de considérer l'intervalle entre un degré et le son fondamental que l'intervalle entre degrés consécutifs. Autrement dit, on détermine la grandeur des intervalles suivants: seconde, tierce, quarte, quinte, sixte, septième.

## Qu'est-ce qu'une gamme?

**La gamme, c'est la hauteur à laquelle on chante ce mode.**

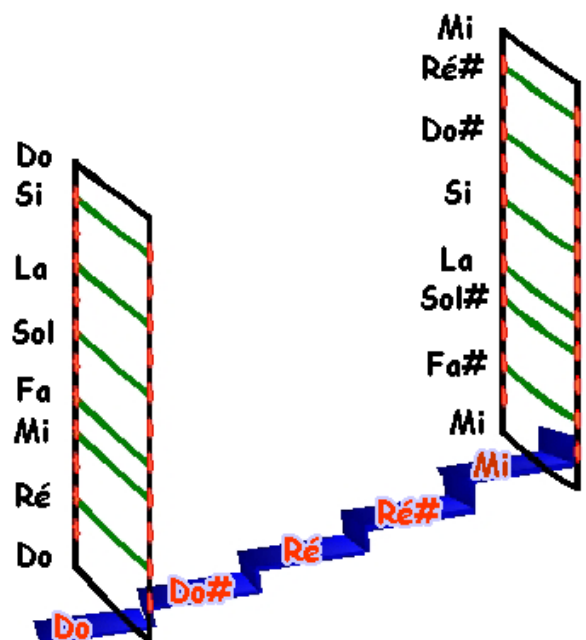
Cela veut dire qu'on fixe la hauteur du premier échelon, le son fondamental, la tonique. C'est peut-être un DO, ou un MI ou un SI bémol, etc. C'est comme s'il existait un escalier de 12 marches en hauteur absolue qui montent de demi-ton en demi-ton, et que l'on décidait de placer l'échelle du mode sur une marche précise. Pour un mode donné, chacune des marches donne naissance à une gamme différente: avec l'échelle majeure, on aura Do majeur, ou Mi majeur par exemple.

## Les degrés d'un mode

Cela semble peut-être un peu compliqué de changer toutes les notes quand je change de hauteur alors que c'est le même air et le même mode! Quand je chante *Au clair de la lune* à des hauteurs différentes, je ne change pas les paroles pour autant, alors pourquoi changer les noms des notes quand je change de gamme en restant dans le même mode? N'y a-t-il pas moyen de nommer les degrés du mode plutôt que les noms des notes, si on n'en a pas besoin pour un instrument?

Oui, il y a une autre façon de noter. Dans le code de notation occidentale, quand on veut parler des hauteurs relatives, on parle des degrés, mais ils n'ont pas de nom précis. On les nomme avec des chiffres. Ils désignent l'intervalle entre le degré considéré et l'échelon de base, autrement dit sa position dans le mode.

Degré I - degré II - III - IV - V - VI - VII





Pour compléter la gamme, on ajoute l'octave:

**I - II - III - IV - V - VI - VII - [VIII]**

Ainsi cette notation est vraie quelle que soit la hauteur à laquelle on chante. Le premier degré s'appelle, comme je l'ai dit, la **tonique**. Le quatrième s'appelle la **sous-dominante**, le cinquième la **dominante** et le septième la **sensible**.

Si notre musique ne donne pas de noms aux degrés, c'est qu'elle les a perdus, car ils existaient autrefois, comme je le rapporte dans la prochaine section. Or la musique indienne actuelle se sert encore de 7 degrés qui se nomment

**SA - RE - GA - MA - PA - DA - NI - [SA]**

La hauteur de ces notes n'est pas déterminée en valeur absolue comme l'est le DO ou le LA occidental. Les notes indiennes sont définies par leurs relations mutuelles donc leur hauteur relative. C'est une façon commode de nommer les degrés, et nous pouvons les utiliser au besoin.

Et comment les indiens nomment-ils les notes en hauteur absolue? Ils ne les nomment pas, car la hauteur absolue n'est pas significative. Il faut savoir que **la hauteur absolue est un produit occidental récent**.

## Historique de la notion de hauteur absolue

Revenons à notre escalier qui fixe les hauteurs absolues. Comment la hauteur de ces marches a-t-elle été fixée?

Vous avez probablement appris que les notes DO, RÉ, MI, FA, SOL, LA, SI ont une hauteur absolue, fixée par les physiciens et les acousticiens. En effet, nous sommes habitués à interpréter un nom de note comme une hauteur absolue, et tous les instruments s'accordent sur le même LA, donné par un diapason normalisé.

Or cette norme est assez récente, et pas forcément suivie. La normalisation d'un diapason n'existait pas au Moyen-Âge, pas plus qu'elle n'existe pour les musiques primitives. Cela ne fait pas partie des préoccupations. L'attention est orientée sur la façon de chanter dans le bon registre, de choisir une hauteur de départ qui permette de chanter aisément et de mettre la voix en valeur. Un peu comme on l'a fait plus haut avec *Au clair de la lune*. **La notion de hauteur se réduisait à choisir le registre aigu, médium ou grave pour le chanteur, de même que pour les instruments**. Cela n'enlève pas le besoin de s'accorder de façon précise les uns par rapport aux autres, donc en hauteur relative. On s'accordait entre petits groupes seulement, en se fixant sur l'un des instruments. Cependant, la note d'un instrument pouvait être accordée sur une note différente d'un autre instrument, le DO sur un RÉ par exemple. C'est pourquoi encore, certains instruments, qu'on dit (à tort) **transpositeurs**, ne sont pas accordés sur le LA 440, mais sur une autre note. Ainsi le DO de la clarinette en *SIb* est accordé sur un *SIb*. (*voir chapitre 9 Les aléas historiques de la fréquence du LA et l'histoire du diapason*)

Donc on donnait un nom, non pas aux notes elles-mêmes, mais aux **doigtés**. Un clavier est, comme l'indique son nom, composé de **clés**. **On désignait les "clés" du clavier ("clavier" est un mot dérivé du terme "clé") par les lettres A, B, C, D, E et F**. Pouvons-nous voir dans la clé une hauteur absolue? Non, car on s'accordait comme on pouvait et cela variait selon les groupes d'instruments. Autrement dit, il n'existait pas de diapason.

Au XI<sup>e</sup> siècle **Guy d'Arezzo** introduisit les syllabes **UT, RÉ, MI, FA, SOL, LA, SI**, non pas pour remplacer les noms des clés, mais **pour désigner les hauteurs relatives**. Comme ses contemporains, le compositeur **Gioseffo Zarlino** (1517-1590), dont je rapporte les recherches sur la gamme dans le chapitre 8, utilisait comme repère de notes un système d'hexacordes, groupe théorique de 6 longueurs de cordes. À cette époque, la notion de gamme n'existait pas encore. On

considérait seulement des tétracordes décalés (*voir en annexe*). Les cordes étaient chantées avec les syllabes UT, RÉ, MI, FA, SOL, LA, quelle que soit la hauteur de l'hexacorde. C'était une hauteur relative.

La hauteur absolue (approximative) des hexacordes était repérée par les "clefs", les lettres A, B, C, etc. C'est de ce système d'hexacordes que sont issues les dénominations des notes, des clés de nos portées modernes, du bémol, etc., même si elles n'ont plus le même sens. De cette manière, la même touche C d'un instrument pouvait désigner le DO, ou le FA, le RÉ, etc. Donc, les deux systèmes d'appellation -lettres et syllabes- coexistaient, et ceci jusqu'au XVIII<sup>e</sup> siècle. [La plupart des auteurs amateurs actuels racontent que le nom des notes vient de Guy d'Arezzo, sans dire que ces syllabes ne remplaçaient pas les lettres].

Puis à cause de dérives dues aux pratiques pour accorder les instruments, et peut-être suite à l'émergence dans les mentalités de l'idée de normalisation, certaines confusions se sont produites. On a pensé que les deux systèmes faisaient double emploi, et on n'en a conservé qu'un seul. Mais pas le même chez les latins (syllabes) et les anglo-saxons (lettres). Avec l'usage progressif du diapason, cela fixa la hauteur absolue. En Europe, la double appellation a été également employée dans la méthode de notation et d'apprentissage musicale de **Kodaly**: les lettres figurent la hauteur absolue, les syllabes la hauteur relative.

Chanter les notes d'une mélodie en hauteur absolue, par exemple en lisant la partition, cela s'appelle **solfier**. La chanter en hauteur relative, cela s'appelle **solmiser**. On peut solmiser en chantant comme si on était en tonique DO ou en chantant les notes indiennes.

## II- Défilé de modes. Panoplie de modes musicaux en usage dans notre vaste monde

Selon les conclusions de la partie précédente, un mode musical ressemble au résultat d'un jeu de construction.

Soit une échelle représentant une octave. Elle comporte 11 encoches découpant l'octave en 12 petits intervalles. Soit un ensemble de 5 à 8 bâtons qui représentent les notes. Les différentes manières de placer les bâtons dans les encoches sont les modes. Un mode désigne donc un ensemble d'intervalles. Il peut être écrit à partir de n'importe quelle note de base, c'est-à-dire que la hauteur d'un mode est indéterminée. Dans cette partie, je les écris tous *avec la note DO comme note fondamentale*, afin de pouvoir les comparer plus aisément.

Cette façon d'aborder un mode n'est pas la réalité historique, mais un jeu de l'esprit moderne destiné à mieux faire comprendre.

Les modes ont souvent été élaborés par des érudits, en Inde, en Perse, en Grèce, et en Europe, puis repris, adoptés et adaptés par le peuple. Ils sont extrêmement variés de par le monde. Modes occidentaux, traditionnels ou modernes, modes chinois, indiens, tziganes, africains, arabes... Nous allons entreprendre un voyage dans l'espace et dans le temps, à travers des paysages musicaux, et écouter quels en sont les modes ou gammes. La distinction entre modes et gammes évoquée dans la partie I ne s'impose pas ici.

Nous commençons par la pratique musicale commune à la plupart des occidentaux, mais je suis conscient que vous pouvez avoir été éduqué dans une autre culture.

## Mode majeur et mode mineur

La musique occidentale populaire repose essentiellement sur 2 modes, le mode majeur et le mode mineur.

### Mode majeur, tierce majeure

Nous avons découvert le mode majeur dans la partie I. Le voici en image et en son.

#### Mode majeur



Je rappelle le nom des notes avec DO comme tonique:

**DO - RÉ - MI - FA - SOL - LA - SI - DO**

Les **intervalles** qui séparent les notes consécutives du mode majeur sont dans l'ordre: **TTdTTTd** où **T** désigne le **ton** et **d** le **demi-ton**.

Ce mode comporte uniquement des tons et des demi-tons. La tierce (sous-entendu: par rapport à la tonique, soit l'intervalle DO-MI) est majeure. Une **tierce majeure** vaut deux tons, TT.

### Mode chromatique

Lorsqu'on prend la note SOL comme base du mode majeur pour construire la gamme de SOL majeur, tout en respectant la suite des intervalles du mode majeur, il y a un barreau de l'échelle qui tombe en face d'une marche qui est étrangère à la gamme de DO majeur: c'est la note FA#:

Gamme de SOL majeur:

**SOL - LA - SI - DO - RÉ - MI - FA# - [SOL]**

De même, lorsqu'on construit les autres gammes majeures, on inclut d'autres notes. Si l'on rassemble toutes les notes des gammes usuelles en Occident, on obtient 12 notes différentes, étagées de demi-ton en demi-ton. Cela s'appelle la **gamme chromatique**:

**DO + DO# / RÉb + RÉ + RÉ# / MIb + MI + FA + FA# / SOLb + SOL + SOL# / LAb + LA + LA# / SIb + SI + [DO]**

On a ainsi défini les 12 positions possibles sur l'échelle (les "encoches") pour les modes à 7 notes.

### Mode mineur, tierce mineure et intervalle d'un ton et demi

#### Mode mineur



**DO - RÉ - MIb - FA - SOL - LAb - SI - DO**

**Intervalles** TdTTdGd

Ici apparaît un nouvel intervalle d'**un ton et demi** entre deux degrés consécutifs, la sixte et la septième, que je note **G**.

La tierce DO-MI est mineure. Une **tierce mineure** vaut un ton et demi, T+d ou d+T.

Ceci est la gamme mineure harmonique. Il existe une autre gamme mineure, la mineure mélodique, avec une sixte majeure DO - LA.

Le mode mineur, transposé en LA, s'écrit  
**LA - SI - DO - RÉ - MI - FA - SOL# - LA**

Les notes qui le composent ne diffèrent du mode majeur que par le SOL#.

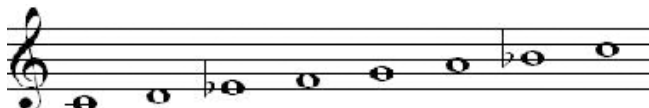
## Modes médiévaux liturgiques

### Mode de RÉ ou dorien médiéval

#### Colchiques

Vous connaissez peut-être la chanson *Colchiques dans les prés*. Elle est écrite ni en majeur, ni en mineur, mais dans un mode que l'on appelle le mode de RÉ. [En toute rigueur, elle n'utilise que 5 notes de ce mode et appartient donc aux modes pentatoniques explorés plus loin.]

#### Mode de RÉ



Il est appelé mode de RÉ, parce que si on écrit le même mode en commençant par un RÉ, on a les notes naturelles de la gamme de DO:

**RÉ - MI - FA - SOL - LA - SI - DO - [RÉ]**

Ce mode est utilisé en Occident sans que cela choque notre oreille même non éduquée. On le trouve également dans la musique classique chez Beethoven dans *L'hymne à la joie*, par exemple. Contrairement à ce que l'on croit, il y a bien d'autres modes que les modes majeur et mineur qui sont utilisés en Occident. Ainsi, au Moyen-Âge, il y avait 7 modes liturgiques. Ils étaient la reconstitution (mais avec des erreurs) d'une branche de l'école grecque du philosophe Pythagore. Bien qu'il soit surtout connu comme un mathématicien, il était en fait un maître de sagesse à la tête d'une école des mystères. On y apprenait les lois de l'univers et de l'être humain, en particulier la loi des nombres, et comment cette loi se manifeste dans la musique. Au VI<sup>e</sup> siècle de notre ère, le chant grégorien retrouve ces modes grecs, mais fait confusion dans les noms. Dans la suite, j'emploie les noms médiévaux. Leurs équivalents grecs sont donnés dans le [tableau panoramique des modes](#).

**Intervalles:** TdTTTdT

Tierce mineure T+d et sixte majeure

C'est un **mode symétrique** parce que l'enchaînement des intervalles TdTTTdT est le même en montant et en descendant. *Vérifiez-le*. C'est le seul mode symétrique parmi les modes anciens.

### Le mode de DO ou hypolydien

Pour construire le mode de RÉ, on a utilisé les notes naturelles du mode majeur, et on a simplement décalé la note de base en partant du RÉ au lieu du DO. De même, on trouve les autres modes en changeant de note de départ. Si on part de la note DO, on obtient le mode majeur. Il était donc l'un des modes anciens, avec la dénomination de **mode hypolydien**.

Or puisque les différents modes médiévaux sont composés des mêmes notes simplement décalées, et que la gamme est un condensé des notes d'une mélodie, qu'est-ce que ça change dans la gamme? Et bien, vous pouvez vous en rendre compte en écoutant *Colchiques*, qui a une atmosphère différente du mode majeur, plus suspendue peut-être. À quoi cela est-il dû? Au choix du son fondamental, sur lequel, le plus souvent, on termine la mélodie.

Il faut donc préciser qu'un mode, ce n'est pas seulement un stock de notes disponibles. **Chaque degré a un caractère, une fonction qui est d'être située à un intervalle précis par**

**rapport à la note fondamentale.** Le son fondamental, c'est comme notre terre, notre sol. Le mode, c'est un voyage, un envol vers des couches élevées de l'atmosphère, vers les planètes, le soleil (y a-t-il un rapport avec la note SOL?), les astres. Mais quel que soit l'endroit où nous nous trouvons, nous sommes conscients d'être reliés par l'esprit (ou par le cœur) au sol, qui est notre point de référence, notre point d'attache, notre point de retour, d'atterrissage, la note fondamentale. Voilà pourquoi chaque mode sonne d'une façon vraiment spécifique.

### Mode de LA ou hypodorien

Le mode de LA est obtenu en partant de la tonique LA:

**LA - SI - DO - RÉ - MI - FA - SOL - LA**

Transcrit avec la tonique DO, cela donne:

#### Mode de LA



**Intervalle:** TdTTdTT

Tierce mineure et sixte mineure

Le mode mineur moderne est la réminiscence de ce mode de LA.

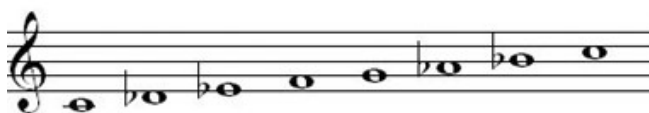
### Mode de MI ou phrygien

Le mode de MI est obtenu en partant de la tonique MI:

**MI - FA - SOL - LA - SI - DO - RÉ - MI**

Transcrit avec la tonique DO, cela donne:

#### Mode de MI



**Intervalles:** dTTTdTT

Tierce mineure et sixte mineure

### Mode de SI ou hypophrygien

Le mode de SI est obtenu en partant de la tonique SI:

**SI - DO - RÉ - MI - FA - SOL - LA - SI**

Transcrit avec la tonique DO, cela donne:

#### Mode de SI



**Intervalles:** dTTdTTT

Tierce mineure et sixte mineure.

## Mode de SOL ou mixolydien

Le mode de SOL est obtenu en partant de la tonique SOL:

**SOL - LA - SI - DO - RÉ - MI - FA – SOL**

Transcrit avec la tonique DO, cela donne:

### Mode de SOL



**Intervalles:** TTdTTdT

Tierce majeure et sixte majeure

## Mode de FA ou lydien

Le mode de FA est obtenu en partant de la tonique FA:

**FA - SOL - LA - SI - DO - RÉ - MI – FA**

Transcrit avec la tonique DO, cela donne:

### Mode de FA



**Intervalles:** TTTdTTd

Super majeur avec tierce majeure, sixte majeure et une quarte augmentée.

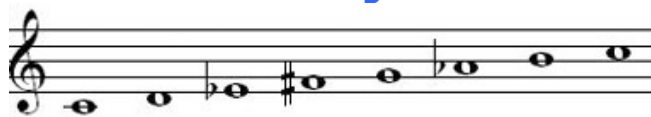
Les intervalles musicaux ont des rapports avec le corps, les planètes, l'univers et chacun exprime une ambiance, ou une qualité, une énergie. C'est pourquoi ils ne sont pas tous retenus dans une culture. L'Occident a développé la polyphonie et la tonalité, dont les exigences ont éliminés beaucoup de modes (*voir chapitre suivant Polyphonie et tonalité*).

## Modes tziganes. Intervalles d'un ton et demi

Tandis que l'Occident prenait la voie de la polyphonie, l'Orient et le Moyen-Orient (Inde, Chine, monde arabe, etc..) s'engageaient dans la musique monodique, les modulations mélodiques subtiles, et en particulier dans l'usage des micro-intervalles. Ils ont élaboré et conservé beaucoup plus de modes que les Occidentaux. Portons donc notre regard, ou plutôt notre oreille, en-dehors de l'Europe.

Les Tziganes vivent en Europe, mais sont originaires de l'Inde. Voici un des modes tziganes.

### Mode tzigane



**Intervalles:** TdGddGd avec tierce mineure, sixte mineure et quarte augmentée.

*On y trouve un intervalle d'un ton et demi comme dans le mode mineur, mais pas au même endroit. Ce mode est, dans ce chapitre, le premier exemple d'une gamme qui comporte à la fois des bémols et des dièses.*

## Panorama des modes

Le tableau suivant donne un aperçu panoramique des modes cités ci-dessus, et de ceux qui vont être abordés plus loin.

*Modes à 7 notes (heptatoniques): modes médiévaux, quelques modes indiens, un mode tzigane, un mode arabe sans quart de ton, un mode de Bartok. Les 7 degrés sont désignés par les noms indiens.*

Mode	Nom médiéval	Nom hindoustanie	Nom karnatique	SA	RE	GA	MA	PA	DHA	NI
RÉ	dorien	kafi		DO	RÉ	MI b	FA	SOL	LA	SI b
MI	phrygien	bhairavi		DO	RÉ b	MI b	FA	SOL	LA b	SI b
FA	lydien	kalyan	kalyani	DO	RÉ	MI	FA #	SOL	LA	SI
SOL	mixolydien	khammaj		DO	RÉ	MI	FA	SOL	LA	SI b
LA	hypodorien (éolien)	asavari		DO	RÉ	MI b	FA	SOL	LA b	SI b
SI	hypophrygien (locrien)			DO	RÉ b	MI b	FA	SOL b	LA b	SI b
DO	hypolydien (ionien)	bilaval	shankara-bharanam	DO	RÉ	MI	FA	SOL	LA	SI
		bhairava	mayamala-vagoulai	DO	RÉ b	MI	FA	SOL	LA b	SI
		marava		DO	RÉ b	MI	FA #	SOL	LA	SI
		pooravi		DO	RÉ b	MI	FA #	SOL	LA b	SI
		todi	todi	DO	RÉ b	MI b	FA #	SOL	LA b	SI
			raghupriya	DO	RÉ b	MI bb	FA #	SOL	LA #	SI
Tzigane				DO	RÉ	MI b	FA #	SOL	LA b	SI
Arabe Hijaz				DO	RÉ b	MI	FA	SOL	LA b	SI b
Bartok				DO	RÉ	MI	FA #	SOL	LA	SI b

## Modes arabes, les maqâmât. Intervalles de 3/4 de ton

Pour l'oreille d'un occidental, la musique arabe est reconnaissable à son caractère typique, qui est dû à l'emploi de gammes spécifiques, les maqâmât (singulier: un **maqâm**). Mais comme chaque fois que quelque chose nous est étranger, nous ne faisons pas trop la nuance entre les divers courants de cette musique et nous mettons tout dans le même sac. Or comme toutes les musiques, la musique arabe présente à la fois des caractères constants et des caractères de forte diversification. L'idée de *musique arabe* est une notion issue de la conscience moderne. En réalité, il y a plusieurs musiques arabes: algérienne, marocaine, tunisienne, libyenne, iraquienne,

égyptienne. Il y a des musiques populaires et des musiques traditionnelles savantes. Celles-ci ont été développées par de grands compositeurs et philosophes qui ont reçus des influences sémitique, turque, indienne, persane et grecque (pythagoricienne). Ces concepts sont examinés dans le chapitre 8 *Ton et intonation juste*.

Il est peut-être utile de rappeler à cette occasion que les Arabes ont été une civilisation brillante et cultivée, qui a développé la science et l'art et les ont diffusé en Occident pendant plusieurs siècles au Moyen-Âge, en particulier grâce à des échanges fructueux avec les moines. Les moines y trouvaient des résonances avec leurs propres connaissances secrètes issues du celtisme et du druidisme, que l'église interdisait. Il y a une filiation de la connaissance entre l'Inde, les Celtes, l'Égypte, la Perse, la Grèce. C'est LA connaissance, la même partout sous des formes adaptées.

Parmi les gammes arabes, citons la gamme CHADDA ARABANE, proche du mode mineur occidental, reprise aussi dans les modes indiens étudiés [plus loin](#), ce qui nous prouve les influences, les échanges, ou les ressemblances de l'âme humaine quel que soit le pays. On trouve aussi le mode de LA et la gamme tzigane décrits ci-dessus.

Voici d'autres exemples destinés à nous ouvrir à d'autres règles et coutumes. Ils m'ont été transmis par M. Abdou Ouardi, auteur - compositeur marocain, concertiste de renommée européenne, et [auteur d'une méthode de Oud](#).

### Gamme HIJAZ, bémols et dièses mélangés

#### Gamme HIJAZ



**Intervalles:** dGdTdTT

On remarque qu'elle comporte à la fois 2 bémols et un dièse, comme dans la gamme tzigane, mais pas aux mêmes notes.

### Gamme RAST, demi-bémols

Ce qui nous paraît exotique dans les modes arabes est l'emploi de demi-bémols, notés par un bémol barré  $\flat$  et de demi-dièses. Le **demi-bémol** abaisse la note d'un quart de ton, et le **demi-dièse** élève la note d'un quart de ton. Mais qu'est-ce au juste qu'un quart de ton? C'est un intervalle plus petit que le demi-ton, mais pas forcément la moitié d'un demi-ton.

Par ses demi-bémols, la gamme Rast est intermédiaire entre la gamme majeure occidentale et le mode de RÉ:

#### Gamme RAST



**Intervalles:** T33TT33 où 3 indique 3/4 de ton.

### Gamme SABA, octave diminuée

La gamme Saba a la particularité d'avoir l'octave plus basse

#### Gamme SABA





**Intervalles:** 33dGdTd, avec une tierce mineure et une "octave" diminuée.

**Remarque:** Voir aussi [Liste des gammes](#) dans l'encyclopédie Wikipedia.

## Modes indiens, thaat et ragas

Les modes indiens ont été popularisés dans un premier temps par les recherches d'européens en Inde comme Alain Daniélou dans les années 60, puis par les tournées et immigrations de musiciens indiens eux-mêmes. Ils sont d'une grande richesse et d'une extrême variété. Bien que les modes de l'Inde du Nord et de l'Inde du Sud aient une base commune, ils ont eu chacun leur évolution propre, leur style d'interprétation et d'improvisation, leur terminologie, car l'Inde du Nord a subi l'influence de ses envahisseurs moghols et persans. La **musique karnatique** s'est développée en Inde du Sud tandis que celle du Nord est connue sous le nom de **musique hindousthane**.

En notation indienne, les degrés ou **swaras** s'écrivent

**SA - RE - GA - MA - PA - DHA - NI - SA**

J'écris *DHA* plutôt que *DA*, car en langues indiennes (hindi, bengali, ..), il existe plusieurs sortes de *A* qui se prononcent différemment. Exemple: dans *HA*, le H se prononce, et *HA* n'est pas identique à *A*.

Rappelons que les swaras désignent des hauteurs relatives. Elles varient selon les modes de façon voulue et contrôlée par microintervalles (**gamakam**). La notion occidentale de gamme tempérée qui impose une valeur égale pour tous les tons n'existe pas (*voir chapitre 8*).

La méthodologie pour créer un mode, exposée en haut de page, consistant à placer 7 degrés sur un ensemble de 12 échelons, doit être modifiée en ce qui concerne l'Inde. Car ici l'échelle comporte 22 échelons. Les intervalles entre échelons, appelés **shrutis**, sont donc plus petits qu'un demi-ton et de valeurs inégales. Certains textes parlent même de 66 intervalles dont seulement 22 ont été retenus en pratique.

Pour donner des repères aux occidentaux, certains comme A. Daniélou ont donné des noms aux 22 shrutis:

**SA / RE1 RE2 RE3 RE4 / GA1 GA2 GA3 GA4 / MA1 MA2 MA3 MA4 / PA / DHA1 DHA2 DHA3 DHA4 / NI1 NI2 NI3 NI4 / SA**

Si nous choisissons DO pour tonique, les shrutis peuvent être représentés approximativement par les notes suivantes ou + et - indiquent un tout petit intervalle, une sorte de quart de ton, en plus ou en moins:

**DO / Réb- Réb Ré- Ré / Mib- Mib Mib+ MI / FA- FA FA# FA / SOL / Lab Lab+ LA LA+ / Sib Sib+ SI SI+ / DO**

Ce sont 22 notes différentes, même si plusieurs notes ont été désignées par des noms identiques.

Composer un mode ou **thaat (ou thât)**, c'est placer 5, 6 ou 7 notes (**swaras**) principales et deux notes accessoires parmi les 22 positions, selon des règles traditionnelles. Pour choisir les 7 notes, il y a 2 notes obligatoires, inaltérables, SA et PA. Puis on choisit les autres selon plusieurs méthodes. Il y a une étape où l'on retient 12 swaras:

**SA - REk RE GAk GA - MA Mat - PA - DHak DHA NIk NI - SA**

ou *k* (**komal**, doux) désigne une sorte de bémol et *t* (**tîvre**, aigu) est une sorte de dièse. Le tîvre n'est utilisé que pour le MA. Puis on choisit le RE et le GA parmi les 4 notes qui suivent SA, le MA parmi les 2 MA possibles, le DHA et le NI parmi les 4 notes suivant le PA.

Le son fondamental n'a pas de hauteur absolue. Il est choisi par les instrumentistes, puis reste fixe et constamment joué à la manière d'un **bourdon**. La pratique du bourdon existe également dans de nombreuses musiques traditionnelles européennes - française, bretonne, occitane - où il est souvent tenu par la vielle à roue ou la cornemuse.

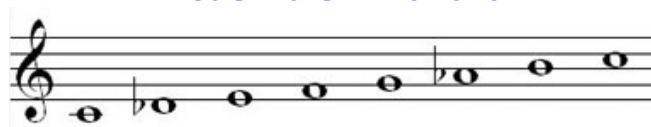
On peut ainsi construire 72 thaats, dont 10 principaux. Certains de ces modes sont identiques aux modes grégoriens et l'un d'eux est notre mode majeur (*voir plus haut le tableau de récapitulation des modes*). Cependant l'interprétation n'est pas la même à cause de l'utilisation de microintervalles et la notion de raga.

Un **raga** (ou rag ou ragam) est un mode élaboré, constitué d'une gamme de base, d'un son fondamental, de deux notes de cette gamme choisies comme notes principales (équivalent de dominante) et de règles d'exécution. À partir des 10 modes de base, il existe environ 600 ragas, dont 200 environ sont utilisés. Ils ont reçu plusieurs noms, en fonction de l'époque et du lieu (Inde du Nord ou Inde du Sud).

### Mode indien Bhairava

Un mode typique est le mode Bhairava.

#### Mode indien Bhairava



**DO - RÉ<sup>b</sup> - MI - FA - SOL - LA<sup>b</sup> - SI - DO**

**Intervalles:** dGdTdGd avec tierce majeure et sixte mineure

Il est également la gamme arabe CHADDA ARABANE.

Il est composé de deux parties identiques par la suite de leurs intervalles:

**DO - RÉ<sup>b</sup> - MI - FA** et **SOL - LA<sup>b</sup> - SI - DO**

DO - RÉ<sup>b</sup> et SOL - LA<sup>b</sup> : ½ ton

DO - MI et SOL - SI: 2 tons

DO - FA et SOL - DO: 2 ½ tons

## Les modes pentatoniques occidentaux chinois et indiens

Les exemples précédents ont été bâtis avec un ensemble de **7 notes**. C'est ce qu'on appelle un **mode heptatonique**, (du grec *hepta-*, sept). Nous abordons maintenant des modes à 5 notes ou **modes pentatoniques** (du grec *penta-*, cinq). Fabriquer un mode à 5 notes, c'est choisir 5 positions parmi les 12 possibles. Il y a de nombreuses manières de le réaliser, constituant autant de modes pentatoniques. En voici quelques-uns.

*Exercice: Pour vous familiariser avec la sonorité d'un mode pentatonique, je vous suggère de tapoter sur les touches noires d'un piano, dans un ordre quelconque. Quelle genre de musique entendez-vous?*

En sélectionnant les touches noires, vous avez joué les notes: DO# - RÉ# --- FA# - SOL# - LA# ---  
Si on les retranscrit en DO, cela donne

**DO - RÉ --- FA - SOL - LA --- [DO]**

Les modes pentatoniques sont employés dans certaines comptines enfantines françaises (*Une poule sur un mur, Rondin picotin, Une souris verte*) et dans des musiques extra-européennes telles que les musiques indienne et chinoise. La musique chinoise doit son caractère typique bien reconnaissable à l'emploi d'une dizaine de modes pentatoniques. Des gammes pentatoniques

étaient également en usage dans les musiques grecques antiques et dans la musique médiévale européenne.

### Un mode chinois et indien

Dans son enseignement, le compositeur franco-indien Ravi Prasad propose parfois d'improviser sur 5 modes pentatoniques. Le premier mode est nommé *mohanam* ou *bhopali*. Il exprime l'espace, la joie, le rire. Il fait également partie des modes chinois.

#### Mode chinois I



**DO - RÉ - MI --- SOL - LA --- [DO]**

En hauteur relative selon les noms indiens:

SA - RE - GA --- PA - DA --- SA

**Intervalles:** TTGTG

(Je rappelle que T désigne un ton, G un ton et demi)

#### Deuxième mode chinois

Pour trouver les modes suivants, il suffit de décaler l'ordre des notes en faisant passer la première note en dernier. Cela donne un deuxième mode:

RÉ - MI --- SOL - LA --- DO - [RÉ], qui, transcrit en DO s'écrit:

**DO - RÉ --- FA - SOL --- SI<sup>b</sup> - [DO]**

et en notation relative:

SA - RE --- MA - PA --- NI - SA

**Intervalles:** TGTGT

Par cette succession d'intervalles, ce mode est symétrique comme le mode de RÉ dont il dérive. Il exprime le recueillement, la mélancolie, l'intériorité.

#### Troisième mode

Effectuant une deuxième permutation, nous obtenons:

MI --- SOL - LA --- DO - RÉ - [MI], soit:

**DO --- MI<sup>b</sup> - FA --- LA<sup>b</sup> - SI<sup>b</sup> - [DO]**

ou encore

SA --- GA - MA --- DA - NI - SA

**Intervalles:** GTGTT

Ce mode indien exprime l'ambiance d'automne, le passage, la naissance proche

#### Quatrième mode

#### Mode chinois II



SOL - LA --- DO - RÉ - MI --- [SOL]

**DO - RÉ --- FA - SOL - LA --- [DO]**

SA - RE --- MA - PA - DA --- SA

**Intervalles:** TGTTG

Ce mode indien, nommé *Suddha Saveri* ou *Durga*, exprime l'hiver, la profondeur. C'est également un mode chinois.

### Cinquième mode

#### Mode pentatonique V



LA --- DO - RÉ - MI --- SOL - [LA]

**DO --- Mib - FA - SOL --- Sib - [DO]**

SA --- GA - MA - PA ---NI - SA

**Intervalles:** GTTGT

Ce mode exprime la sérénité, le calme, la paix.

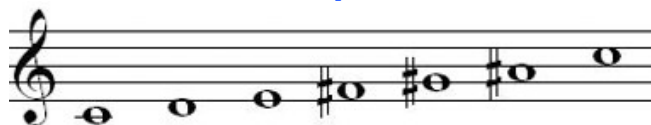
## Modes contemporains

La musique contemporaine s'est libérée du nombre imposé de 5 ou 7 notes dans un mode. La règle consiste à choisir un nombre variable de degrés à l'intérieur de l'octave. Cette démarche expérimentale est fructueuse, mais la pratique montre que seules certaines combinaisons sont musicalement intéressantes et requièrent des intervalles entre degrés successifs qui ne dépassent pas un ton et demi: le demi-ton, le ton et le ton et demi.

### Mode de Claude Debussy, la gamme par ton

Ainsi **Claude Debussy**, compositeur du 20<sup>e</sup> siècle, invente la **gamme par tons**, dont les notes sont toutes espacées d'un ton. C'est une gamme à 6 notes, dite **hexatonique**.

#### Gamme par tons



**DO - RÉ - MI - FA# - SOL# - LA# - DO**

**Intervalles:** TTTTTT

A l'audition, on se sent toujours emporté vers d'autres mondes. La quinte augmentée empêche de s'installer dans une tonalité définie.

### Modes octatoniques d'Olivier Messiaen

Remarquons que si on décale une gamme par tons d'un degré, on la retrouve identique à elle-même. On ne peut pas engendrer d'autres modes par permutation comme on vient de le faire dans les modes pentatoniques, et comme cela a été fait avec les 7 modes liturgiques anciens. Il y a "dégénérescence".

**Olivier Messiaen**, compositeur du 20<sup>e</sup> siècle, a recherché d'autres modes possédant cette faculté d'être identiques par décalage d'un certain nombre de degrés, engendrant un nombre limité de modes. C'est ce qu'il nomme une **gamme à transposition limitée**.

Les modes de Messiaen les plus célèbres comportent 8 notes. Ce sont des modes **octatoniques**. Voici le premier:

### Mode de Messiaen



**DO RÉ<sup>b</sup> MI<sup>b</sup> MI FA# SOL LA SI<sup>b</sup> DO**

**Intervalles:** dTdTdTdT

Dans ce schéma, seulement deux modes sont possibles, car si on monte de 2 degrés, on retrouve le même. Si on monte d'un seul degré, on obtient le deuxième mode:

**Intervalles:** TdTdTdTd

### Mode de Bela Bartok

**Bartok**, compositeur hongrois du 20<sup>e</sup> siècle, a exploré plusieurs voies d'innovation. Il a entre autres utilisé l'un des modes de Messiaen. Il a également profité de la richesse du patrimoine de la musique traditionnelle hongroise. Par exemple, il en a tiré ce mode:

### Mode de Bartok



**DO RÉ MI FA# SOL LA SI<sup>b</sup> DO**

**Intervalles:** TTTdTdT

### Dodécaphonisme

Dans le dodécaphonisme (du grec "*dodéca-*", 12), les 12 notes de la gamme chromatique sont toutes employées de façon égale. D'autres règles viennent cependant guider la composition.

### Dissolution de l'échelle des 12 notes chromatiques

Le processus de remise en cause des échelles sonores ne date pas d'aujourd'hui. Il a même toujours existé, en parallèle avec l'évolution de l'humanité. La gamme tempérée majeure a supplanté les échelles dérivées des études de Zarlino au XVIII<sup>e</sup> siècle, qui s'étaient elles-mêmes substituées à celles dites de Pythagore au XVI<sup>e</sup> siècle. Les modifications de ces gammes, échelles ou modes concernent non pas le choix des degrés utilisés parmi les 12 repères prédéfinis, mais bien **la finesse de la position de ces 12 repères**. Autrement dit, elles répondent à l'interrogation: Où doit-on marquer les encoches sur l'échelle? Cette histoire-là est rapportée dans le chapitre 8 *Ton et intonation juste*.

Quant à la musique contemporaine, se mettant en quête de plus grandes possibilités créatrices, elle remet en cause les cadres traditionnels et s'affranchit complètement de l'idée de 12 repères fixes. Si je reviens à mon analogie des encoches, c'est comme si on les remplace par des supports coulissants qu'on place où on veut, et en nombre qu'on veut. De cette manière, **toute découpe de l'octave est possible**. Exemples: vont être proposées:

- une découpe en quarts de ton comportant 24 sons dans l'octave
- une découpe en tiers de ton, avec 18 notes

L'histoire de l'éclatement des règles classiques régissant les caractères de la composition est traité à part dans le chapitre 4 *Évolution de l'expression musicale occidentale: polyphonie et tonalité.*

## Musique populaire et musique d'érudits

À la lecture de cette étude, il apparaît que ces musiques, riches et complexes, ne sont pas issues spontanément d'une pratique populaire. Bien au contraire, elles sont des élaborations savantes soigneusement étudiées et expérimentées par quelques compositeurs érudits. Ainsi, les **modes occidentaux et arabes** doivent beaucoup à Pythagore et à ses disciples, et à d'autres tels que Zarlino. Pourtant les pratiques et innovations existent avant la théorie qui ne fait que fixer et développer la pratique. Il y a échange entre les deux.

Les **modes indiens** existent depuis longtemps, mais ils ont subi des modifications, des formalisations et des enrichissements à différentes époques par des maîtres tel que le maître Venkatamakhin au 17<sup>e</sup> siècle. Un traité de théorie musicale daté du III<sup>e</sup> siècle avant notre ère environ a été attribué au sage Bharata.

La **musique arabo-andalouse** a pour origine les compositions du maître Ziryab au 9<sup>e</sup> siècle. Ziryab quitte Bagdad et arrive à Cordoue en Andalousie (Espagne) en 822. Il invente le système des **nubat** (singulier nuba) qui sont les formes de la musique arabo-andalouse. Les arabes resteront en Andalousie jusqu'en 1492, date à laquelle ils fuient la persécution. Ils se réfugient au Maghreb en emportant leur musique.

La réflexion et les recherches des érudits participent à un déconditionnement des pratiques musicales, à l'éclatement des règles toutes faites. La confrontation avec des musiques étrangères accélère ce processus. Souvent les érudits sont guidés dans leur quête par des **considérations mystiques**, par le rapport entre la musique, le cosmos et le monde divin. Certaines musiques sont conçues comme outils pour faciliter la transe mystique.

3 Janvier 2006

# Chapitre 4

## Évolution de l'expression musicale occidentale du Moyen-Âge à nos jours

### *Polyphonie et tonalité, émergence et transformations*

**Résumé:** Du plain-chant à la polyphonie, de la monodie à l'harmonie, du modal au tonal puis à l'atonal, les formes de l'expression musicale n'ont pas cessé de s'inventer et de se réinventer tout au long de l'histoire. Dans cette évolution, c'est l'âme humaine qui s'explore sous toutes ses facettes. Quelle que soit l'époque, certaines musiques nous nourrissent, d'autres nous causent des préjudices.

Si nous observons les bacs des disquaires et leurs classifications, nous constatons bien vite que **notre univers musical est incroyablement varié**: chansons françaises ou étrangères, musiques pop, jazz, rock, musiques ethniques (africaines, arabes, latino, indiennes, asiatiques...), musiques "savantes" classiques, médiévales, baroques, contemporaines et expérimentales, musiques de relaxation et créations électroniques modernes, etc. Il semble que nous sommes dans une période où toutes les formes d'expression musicale sont possibles. Toutes les musiques se côtoient dans ce méli-mélo (terme fort à propos). Le temps et l'espace y sont rassemblés. Or **cette situation est le fruit d'une histoire**. J'ai eu envie d'en comprendre les ressorts intimes et le développement... et de partager avec vous ces trouvailles.

### Une histoire des esprits et des sensibilités

Quels sont donc les ingrédients qui distinguent une musique d'une autre et qui produisent cette incroyable variété? **Ne cherchez pas dans cet article des réponses techniques ou historiques précises**. D'autres documents, d'autres sites Internet le font très bien (certains sont cités en fin d'ouvrage). Si mon propos est bien de poser quelques repères historiques sur l'enchaînement des formes d'expression musicale en Occident, ce n'est pas dans le but de livrer des connaissances livresques et académiques. Il s'agit plutôt de rendre compte des ressorts de cette expression. Ce qui m'intéresse, c'est d'exposer, dans un langage concret et simple, **comment les pratiques musicales, les savoir-faire et les concepts ont évolué au travers des oeuvres des compositeurs, comme témoin des possibilités créatrices de l'être humain**.

Les formes évoluent, se complexifient et explorent des pistes nouvelles. Mais elles sont également vite codifiées et fixées en règles! Toutefois, la vie musicale se manifeste sans souci de ces règles, dans le déploiement de la créativité. De notre époque, nous sommes en mesure de contempler l'évolution des sensibilités et des esprits et cela nous amènera à **élargir notre propre conscience**. De ce point de vue, nous serons peut-être moins attentifs à la précision des dates si elles ne sont pas disponibles, ni même aux noms des compositeurs. Ceux-ci ne sont indiqués qu'à titre d'exemple, comme points de repère.

Pour mieux comprendre et sentir cette évolution musicale, je vous inviterai, du moins au début de l'histoire, à un **atelier de chant** imaginaire en cours d'apprentissage (accélééré). De la même façon que le peintre peut progresser en employant de nouvelles substances et de nouvelles couleurs, nous serons naturellement amenés à élargir notre gamme de couleurs vocales et musicales, soit dans l'ambiance d'un **simple amusement**, soit dans le but d'augmenter notre potentiel d'expression vocale **en accord avec notre être profond**.

C'est de façon assez analogue à la progression de cet atelier que **la musique occidentale s'est transformée au cours de l'histoire**.

## Chant à une seule voix (monodie), 5<sup>e</sup> - 12<sup>e</sup> siècles

Voici donc notre groupe dans l'apprentissage d'une **mélodie**. Le professeur la chante et tout le monde la répète. Si le groupe est composé de débutants qui ont du mal à mémoriser toute une mélodie, il peut être approprié de commencer par une **mélopée**, une mélodie récitative qui évolue de façon proche du langage parlé et rythmé. On continue par un chant simple, et ensuite peut-être par une chanson populaire. Tout le monde chante donc la même chose, d'une seule voix, même s'il y a des hommes et des femmes. Dans notre vocabulaire actuel, on appelle cela de la **monodie**, qui veut dire: (mono) une seule - mélodie. Puis on complexifie le chant en ajoutant d'autres éléments musicaux.

L'histoire de la musique occidentale au Moyen-Âge présente quelques ressemblances avec l'évolution de l'atelier de chant. L'une des formes anciennes de la musique liturgique est la **psalmodie**, récitatif qui s'appuie presque uniquement sur une seule note, comme la mélopée. Mais la forme la plus courante de la musique vocale occidentale au Moyen-Âge, du 5<sup>e</sup> au 12<sup>e</sup> siècle, était essentiellement la monodie, une mélodie chantée ou jouée par des instruments. On l'appelle le **plaint-chant**. Il s'épanouit dans le **chant liturgique** dit **grégorien**.

Il n'est pas facile de reconstituer ce qu'était la musique vocale ou instrumentale avant le 9<sup>e</sup> siècle, à cause du peu de documents disponibles, mais on peut en deviner certaines caractéristiques. Il n'existait pas de conscience d'une distinction entre différents types de musiques, comme nous le faisons actuellement entre musique profane ou religieuse, vocale ou instrumentale, bien qu'il existait probablement un style qui était utilisé pour les activités religieuses et un autre pour les activités quotidiennes et les réjouissances. Mais les deux types d'activités elles-mêmes n'étaient pas tellement séparés, car on avait une représentation du sacré et de la religion bien différente de notre pensée actuelle: une moisson est aussi bien une activité de labeur quotidien que l'hommage au don de la déesse.

Si l'on peut quelquefois avoir l'impression que cette musique est née de rien, cela est dû au manque de documents écrits pour rendre compte de ce qui se pratiquait. Or la musique et le chant se sont pratiqués à toute époque et dans le monde entier sous des formes diverses. Les pratiques antérieures au 9<sup>e</sup> siècle étaient donc probablement très vivantes. Pourquoi ne le seraient-elles pas en un temps où l'étaient les musiques grecques, arabes, etc. et où les échanges et les influences étaient nombreux. Rappelons-nous par exemple, que les arabes étaient installés en Andalousie et que la vie artistique et intellectuelle était très développée et englobait toutes les communautés de races et de religions. Le plaint-chant médiéval est donc probablement nourri d'apports et d'influences diverses, grecque, romaine, juive, arabe, et aussi galloise et celtique (*voir par exemple le rayonnement des études de Pythagore dans le chapitre 8, Ton et Intonation juste*).

### Ornements et improvisations

Nous qui sommes habitués aux groupes musicaux comportant de nombreux instruments et aux effets de la sonorisation, nous pouvons nous demander si la monodie n'était pas monotone. Pour s'en rendre compte, écoutons des chants grégoriens. Si l'on entre profondément dans l'interprétation de la monodie, si l'on se laisse imprégner de ses résonances harmoniques, elle peut se révéler d'une infinie richesse.

*Illustration sonore: Composition de Hildegarde de Bingen, 12<sup>e</sup> siècle. Monodie soutenue par un bourdon*

Dans ces musiques, les **ornements** et l'**improvisation** sont omniprésentes. On retrouve cette manière de faire dans les musiques traditionnelles actuelles basées sur la monodie, telles que la musique indienne classique.

Dans notre atelier, nous aurons envie, après un peu de pratique, de nous départir de l'uniformité créée par l'apprentissage et la répétition. Les chanteurs à l'aise avec l'improvisation vont ajouter



des petites variations, des ornements, ou des digressions momentanées.

Si dans notre atelier un musicien est présent, violoniste, pianiste, saxophoniste ou guitariste par exemple, il aura probablement envie d'exécuter un accompagnement pour participer et ne pas rester en reste. L'accompagnant peut reproduire la mélodie du chanteur avec son instrument, avec quelques variations. Mais s'il s'éloigne de la monodie, commence à dialoguer avec les chanteurs, alors la musique devient plus complexe et on s'achemine vers la polyphonie.

L'évolution de la technique musicale n'est donc pas forcément réfléchie au départ. Elle vient en premier d'un désir de créer et d'exprimer des émotions.

## Troubadours

Tandis que le chant grégorien exprime le sentiment religieux, d'autres chansons sont ancrées dans la condition sociale ou quotidienne: complaintes, chansons politiques, idylliques, érotiques, bachiques, satiriques, morales. La pratique des **chansons médiolatines** (en latin du Moyen-Âge) est attestée dès le 9<sup>e</sup> siècle.

Puis, dans la première moitié du 12<sup>e</sup> siècle et jusqu'à la fin du 13<sup>e</sup>, apparaissent les **troubadours**, s'exprimant en langue occitane, dans le midi de la France. Ils sont suivis par les **trouvères** dans le nord. Les premiers troubadours réputés dont nous avons connaissance sont **Marcabru** (né vers 1100, mort en 1150) et **Bernart de Ventadorn** (né vers 1125, mort vers 1200). Le mot *troubadour* vient de l'occitan *trobar* qui signifie *trouver* (comme d'ailleurs le mot *trouvère*). Le mot *trouver*, à cette époque, signifie trouver des idées, des mots. **Trouver, c'est créer des poésies**. Le mot *trobar* (en français *trope*) signifie *poésie*. D'ailleurs, on retrouve la même filiation en français, puisque le mot *poésie* vient du grec *poiein* ou *poiesis*, qui signifie fabriquer, produire, créer.

**Le langage des chansons des troubadours comportait également un autre sens, hermétique**, grâce auquel certains individus pouvaient communiquer entre eux. "*Mon chant paraîtra insensé ou sot à qui n'a pas le double entendement*". Ce langage est fait de symboles, qui indiquaient une action à effectuer, notamment au moment des répressions des cathares. Seuls les initiés pouvaient comprendre, mais les troubadours n'étaient pas tous des initiés. Ce langage indiquait également comment accéder à l'Amour inconditionnel, qui est la force pour accéder à son propre accomplissement. Il y a probablement un lien (caché?) avec la constitution de l'*Argot*, langue codée qui parle l'art des Goths (gothique), peuple établi dans le sud de la France, l'art de la lumière, et avec la symbolique des *Argonautes* de la Grèce antique, à la recherche de cette lumière sous la forme de la toison d'or.

Le texte des chansons est un élément important de la communication. Il est probable que l'**accompagnement instrumental** passe au second plan et que les instruments doublent la voix ou sont joués en alternance avec elle. L'accompagnement est improvisé et comporte des intervalles de hauteur peu variés qui ne forment pas réellement une deuxième mélodie.

## Musiques traditionnelles et ethniques

L'écoute des chants traditionnels ou ethniques actuels peut se révéler très instructive pour nous rendre compte de certaines pratiques anciennes. Chaque civilisation a produit des musiques parfaitement élaborées qui étaient leur expression propre: musiques d'Occitanie, de Corse, des pays arabes, d'Afrique, d'Inde, des Amériques du nord ou du sud, d'Océanie, de Chine, tziganes, géorgiennes, hongroises, etc.). Leur richesse est telle qu'elles ont fait l'objet de recherches comme source d'inspiration pour nos compositeurs modernes. Elles prennent aussi bien la forme de monodies que de polyphonies, avec ou sans instruments, avec une grande diversité de rythmes.

## Musique à plusieurs voix, 9<sup>e</sup> - 16<sup>e</sup> siècles

### Bourdon

La monodie proposée dans l'extrait sonore précédent est accompagnée d'un **bourdon**. C'est la voix additionnelle la plus simple: un son de hauteur constante, qui est soit la note de base, soit une note en rapport avec elle, quarte ou quinte, en-dessous ou au-dessus.

Certains instruments disposent de bourdons intégrés par construction. Les **vielles à roue** (appelée autrefois **chifonies**) ont des cordes supplémentaires à son fixe, et les **cornemuses** (ou **musettes**, **cabrettes**, etc..) en peau de chèvre sont dotées de tuyaux à anche, de type hautbois, bourdons qui émettent un son fixe pendant que la mélodie est jouée sur le hautbois principal ou chanterelle. Ces instruments existaient au Moyen-Âge, sous des formes variables dépendant de la région et du fabriquant.

Dans les musiques traditionnelles actuelles européennes, les bourdons sont très présents, aussi bien avec des instruments comme la cornemuse et la vielle à roue que dans les groupes de chanteurs. Ils peuvent être mobiles et suivre la mélodie, comme dans les chants géorgiens. En Inde, le bourdon est tenu par le **tampoura**.

### Organum

Dans notre atelier de chant, il n'est pas rare que quelques personnes ne chantent pas "juste". Je veux dire qu'elles ne reprennent pas la même note que le reste du groupe et chantent plus bas ou plus haut. Il est également fréquent que la note qu'elles prennent alors spontanément soit en harmonie avec la mélodie du groupe, disons à un intervalle de quinte. Sans le vouloir, elles ont introduit une sorte d'ébauche de deuxième voix, et c'est déjà de la polyphonie. La polyphonie émerge donc assez naturellement quand plusieurs personnes chantent la même mélodie à des hauteurs différentes.

À partir du 9<sup>e</sup> siècle, on adjoint à la monodie une voix supplémentaire, l'**organum**, qui lui est **parallèle**. C'est le premier accompagnement au sens moderne du terme. Il est distant d'une quinte ou d'une quarte. Puis apparaît le procédé nommé **gymel** (= jumeau) dans lequel la voix parallèle est placée à la tierce ou à la sixte.

*Illustration sonore: Chant amérindien accompagnant un jeu de "société". Deux voix parallèles, l'une par les hommes, l'autre par les femmes*

Le **faux-bourdon** désigne le procédé qui emploie deux voix supplémentaires, l'une à la quarte supérieure et l'autre à la tierce inférieure. Le chant principal, nommé **cantus firmus** ou **teneur** (**tenor**) se trouve placé à la position intermédiaire.

La pratique de l'organum se situe surtout aux 10<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup> siècles, tandis que celle du gymel se situe plutôt au 12<sup>e</sup> et le faux-bourdon au 13<sup>e</sup> siècle. Mais on aurait tort de découper le temps en tranches trop nettes, car en vérité, une pratique nouvelle n'effaçait pas l'autre et de plus, les nouvelles formes n'apparaissent pas partout au même moment. **Des pratiques diverses coexistaient.**

Imaginons notre atelier bien à l'aise, se laissant aller à quelques improvisations en voix parallèles. L'ambiance est joyeuse, et certains ont envie de s'amuser par quelques fantaisies vocales, connivences et taquineries. Le chant devient support d'un jeu: on se rencontre par le regard et la voix, on simule des séparations aussitôt suivies de retrouvailles.

Le jeu qui consiste à être ensemble, se séparer et se retrouver se traduit en mélodie par: si tu montes, je descends, si tu redescends, je remonte et on se retrouve. C'est le **mouvement contraire** qui se distingue du mouvement parallèle. A la fin du 12<sup>e</sup> siècle, le chant principal se

place à la partie inférieure (la **teneur** ou **tenor**), tandis que l'**organum** passe à la position de contre-chant au-dessus du chant principal en mouvement contraire (procédé nommé **déchant**).

## Contrepoint

Acquérant plus d'aisance en improvisation, notre groupe s'enhardit. Voilà maintenant que les réponses chantées ne sont ni parallèles, ni contraires, mais évoluent en toute liberté. Dans la mesure où les participants s'écoutent les uns les autres, ces mélodies s'accordent en harmonie les unes avec les autres.

Dans le **contrepoint**, qui se développe du 13<sup>e</sup> au 16<sup>e</sup> siècles, les mélodies se déroulent librement en restant en lien et dans le dialogue. Elles s'approchent, se frottent, se croisent, se séparent, se répondent. Les mélodies se déroulent horizontalement. Il n'y a pas encore la conscience de la verticalité. C'est en quelque sorte une polymélie. Ce procédé s'ajoute aux autres sans les éliminer.

Avec cette liberté, les rythmes des mélodies simultanées ne sont plus calqués les uns sur les autres. Ainsi, la forme musicale du motet comporte une voix inférieure (**tenor**), qui *tient* longuement les notes du texte principal. Elle peut être doublée ou remplacée par un instrument. A celle-ci sont superposées une à trois autres voix (duplum, triplum et quadriplum) qui ont des textes différents et des rythmes plus rapides que la tenor. La seconde voix ou **duplum** s'appelle également **motetus** (d'où le nom de motet).

Au 14<sup>e</sup> siècle, certaines compositions à 4 voix (de **Guillaume de Machaut** par exemple) ne conservent pas le quadriplum, mais doublent la teneur par une **contreteneur** ou **contretenor** qui deviendra plus tard le **haute-contre** (en italien **contralto**). Ces deux voix constituent un duo grave qui évolue en valeurs longues, tandis que duplum et triplum forment un autre duo plus animé.

La production musicale était inventive et des formes variées coexistaient. On ne se sentait plus contraint par les formes liturgiques traditionnelles.

*Illustration sonore: Paghjella, une forme du chant polyphonique corse à trois voix. La voix principale, a seconda, porte la mélodie. Les deux autres suivent en léger décalé: u bassu soutient la mélodie et a terza, sorte de contre chant plus aigu.*

## Polyphonie

Les compositions contrapuntiques se terminent par un ensemble des notes prolongées (3 notes s'il s'agit d'un contrepoint à 3 voix) dont l'oreille peut en reconnaître la beauté et la plénitude. Elle repère ces concordances et les retrouve à l'intérieur même des morceaux, au hasard des rencontres des différentes voix et s'aperçoit qu'elles forment des structures verticales, les accords. Peu à peu se constitue une connaissance de ces accords. On les différencie, on les nomme, on les classe.

A la fin du 15<sup>e</sup> siècle, on a acquis la conscience du vertical. On a repéré la quinte, puis la tierce majeure, et l'accord qu'on nommera parfait. La **polyphonie** s'épanouit au 16<sup>e</sup> siècle (la Renaissance). Elle est illustrée par des compositeurs fameux comme **Josquin des Prés**, **Guillaume Dufay** et **Giovanni Pierluigi da Palestrina**. Les différentes voix y sont souvent d'égale importance.

*Illustration sonore: Extrait du Sanctus de la Messe du Pape Marcel, de Palestrina. Polyphonie à 4 voix.*

## Monodie accompagnée, 17<sup>e</sup> - 18<sup>e</sup> siècles

### Harmonie

Vers 1600, sous l'influence des innovations italiennes, la voix supérieure s'émancipe et prend sa liberté pour exprimer les sentiments personnels humains. C'est la **monodie accompagnée**. La mélodie est soutenue par une **basse continue** ou basse chiffrée. C'est une voix qui n'est pas écrite de façon précise et dont l'instrument n'est pas spécifié. Elle était habituellement exécutée par l'orgue, le luth, la harpe, le clavecin, ou même plusieurs instruments ou un orchestre.

Puis, vers 1650 et ensuite, les formes musicales deviennent plus élaborées et plus complexes: sonates, symphonies, etc. La mélodie prend le rôle d'un thème musical qui traverse l'œuvre en se transformant. C'est la période **baroque** ou **préclassique** (**Henri Purcell, Marin Marais, Antonio Vivaldi, Jean-Philippe Rameau, Jean-Sébastien Bach...**), suivie de la période **classique** (**Joseph Haydn, Wolfgang Amadeus Mozart, Ludwig von Beethoven...**) qui va évoluer en **romantisme** (**Franz Schubert, Hector Berlioz, Frédéric Chopin, Johannes Brahms...**).

Dans l'accompagnement de la mélodie, les **accords** jouent un rôle essentiel. On étudie leurs définitions et les règles de leur emploi. Ils deviennent des entités à part entière, des personnages avec leur vie propre, leur caractère et leur fonction, leurs interactions et leurs articulations. C'est l'**harmonie**. Même si au sens large du terme, l'harmonie est présente dans toute polyphonie, le mot a surtout pris le sens d'harmonie classique associée à la tonalité.

Dans notre atelier de chant, les participants adorent reprendre des chansons de variétés populaires. Un guitariste joue un accompagnement fait d'un enchaînement d'accords. La presque totalité de ces chansons sont écrites selon les règles de l'harmonie classique et de la tonalité.

### Tonalité

En se développant, l'harmonie délaisse les anciens modes qui ne sont pas adaptés à cette écriture verticale. Des modes de la période médiévale, il ne reste que le **mode majeur**, qui est le mode de DO, et le **mode mineur** qui est le mode de LA dont la note sensible SOL a été altérée en SOL# (*voir chapitre précédent*).

Dans ces modes, les enchaînements de notes ramènent irrésistiblement vers la note de base, nommé **tonique**. La sensation de cette tonique est forte (*voir en annexe: Affirmation de la tonalité*). En même temps, on éprouve le besoin d'introduire de la variété en changeant de tonique. En conséquence apparaît la notion de **tonalité** qui permet de passer d'une tonique bien identifiée à une autre. Aussi, lorsque le thème mélodique se déploie, on introduit des variations, des **modulations** en changeant de tonalité. Cela veut dire qu'on conserve le même mode majeur, mais on le monte ou on le descend (par exemple on passe de DO majeur dont la tonique est DO à MI majeur dont la tonique est MI). À moins qu'on ne passe en mode mineur (de DO majeur à DO mineur ou LA mineur) qui est une alternative. Toutefois, même si un morceau est écrit dans une tonalité déterminée, cela n'empêche pas des modulations momentanées de se produire à l'intérieur. Mais on revient à la tonalité initiale.

La tonalité s'oppose à la **modalité**. Dans les anciens modes, on restait fidèle à la tonique (appelée note finale), et on n'en changeait pas. Par contre, on changeait parfois de mode, dont on disposait en plus grand nombre, *comme on l'a vu dans le chapitre précédent*.

La **tonalité** consiste donc à décliner un mode (majeur ou mineur) à une hauteur donnée. Elle est affirmée à l'oreille par l'emploi des **accords parfaits** (quinte et tierce), et par l'importance de la septième note ou **sensible**. Cette note crée une tension qui a besoin de se détendre, de se résoudre en appelant irrésistiblement la huitième note qui est la répétition de la première, la note

de base (*voir en annexe Affirmation de la tonalité, le rôle de la quinte diminuée*). Cette tension n'existe pas dans la modalité ancienne qui évolue surtout au travers de grands intervalles. Au 16<sup>e</sup> siècle, les deux systèmes coexistent.

## Tempérament

L'affirmation des règles harmoniques a amené l'introduction du tempérament. Le tempérament désigne la façon dont on définit la hauteur précise de chacune des notes du mode. La monodie grégorienne est liée aux **intervalles pythagoriciens** fondés sur la triade quinte-quarte-octave elle-même issue de la quinte. Dans ce système, les tierces sont fausses au sens harmonique, mais cela n'importait pas puisqu'elles n'étaient pas utilisées.

Avec l'apparition de la tonalité à partir du 16<sup>e</sup> siècle, la tierce entre en scène, et on la modifie pour qu'elle sonne juste. Plusieurs types de tempéraments sont employés, issus du **tempérament de Zarlino**, mais ce n'est pas encore le tempérament égal qui sera introduit plus tard. Aussi, les tons et autres intervalles entre notes n'ont-ils pas tous la même valeur. Par exemple, les 3 accords de base du mode majeur (bâties sur les fondamentales DO, FA, SOL en tonalité de DO) sont justes. Quand on change de tonalité, cela change les intervalles. À chaque tonalité était attribuée une couleur particulière, un sentiment spécial provoqué par l'utilisation de ces intervalles différents.

Enfin, à partir de 1650, moyennant une légère correction des quintes et des tierces, on simplifie en uniformisant tous les intervalles de même nom (**tempérament égal** et gamme tempérée). Alors, des notes comme RÉ# et MI $\flat$  qui étaient distinctes deviennent identiques. Cela ouvre la voie au développement de la musique moderne. (*voir chapitre 8 Ton et intonation juste*)

## Chromatisme et modulation, 19<sup>e</sup> siècle

Les compositeurs veulent des créations plus chatoyantes. Au lieu de se cantonner aux 7 notes de la gamme dans la tonalité choisie (par exemple DO, RÉ, MI, FA, SOL, LA, SI), ils vont flirter avec les 5 autres notes de la gamme chromatique (DO#, MI $\flat$ , FA#, SOL#, SI $\flat$ ) qui sont **altérées** d'un demi-ton par rapport aux 7 autres. C'est une façon de donner plus de couleur (chromatisme signifie couleur). Au début ces notes ne sont que notes de passage, broderies, fantaisies, petites infidélités d'un instant.

Ces notes altérées appartiennent à d'autres tonalités. Aussi en introduisant une de ces notes, on s'engage fugitivement ou avec détermination dans cette tonalité (le plus souvent au moyen de la septième note de la tonalité vers laquelle on tend). C'est par ce moyen qu'on effectue une **modulation**.

Souvent on se maintient à la même tonalité, mais on se délecte de faire comme si on voulait en sortir, tout en y restant. On l'assaisonne avec de plus en plus de chromatisme. Or si on en introduit beaucoup, c'est comme si on changeait constamment de tonalité. C'est le **chromatisme** exploité pour lui-même, et pas simplement comme simple digression. Il est très employé par **Claude Debussy** (français, 1862 - 1918).

De la même façon, les règles de l'harmonie subissent des distorsions. On construit des **accords de septième**, puis de **neuvième**, **onzième** et **treizième**. Et on se plaît à modifier les notes supérieures, comme **César Franck** (français, 1822 - 1890) et **Richard Wagner** (allemand, 1813 - 1883). Il y a une sorte de jouissance sensorielle à se baigner dans ces accords dissonants, leurs frottements, les tensions non résolues. À force de moduler, on ne sait plus où est la tonique initiale. **La tonalité devient flottante**. On perd le sentiment de tension qui cherche à se résoudre. On peut se diriger où l'on veut, dans toutes les directions (*voir en annexe Accords complexes: vers la polytonalité*). Le tempérament égal, qui s'est imposé au début du 19<sup>e</sup> siècle, a énormément facilité ces modulations puisque tous les tons sont identiques et qu'on peut glisser

d'une tonalité à l'autre en retrouvant les mêmes intervalles.

Partant du mode mineur, si l'on abaisse la septième note d'un demi-ton, on obtient l'ancien mode de LA. On sort du caractère tonal. C'est par cette voie qu'on a retrouvé de l'intérêt pour le caractère modal, puis pour les **anciens modes à 5 et 7 notes**. Ces modes ont fourni de nouvelles idées et conduit à construire d'autres modes. **Debussy** élabore sa gamme par ton où la quinte juste disparaît, donc l'accord parfait, ce qui anéantit la tonalité. Dans son poème symphonique, *La mer*, on a le sentiment de moduler et de glisser sans arrêt, comme les vagues et les reflets de la mer. Cette musique faite d'une succession de petites touches d'impression est nommée **musique impressionniste**, par analogie avec les peintures du même nom.

## Musiques moderne et contemporaine, 20<sup>e</sup> siècle

On a coutume de désigner par **musique moderne** la musique composée pendant la première partie du 20<sup>e</sup> siècle (**Claude Debussy**, **Gabriel Fauré** (français, 1845 - 1924), **Maurice Ravel** (français, 1875 - 1937) ...), et par **musique contemporaine** celle de la deuxième moitié.

### Atonalité

L'abandon de la tonalité et des modes majeurs et mineurs était effectif, sinon en théorie, du moins en pratique, ce qui a conduit les compositeurs suivants à prendre acte de cet abandon comme principe même de leurs oeuvres. **Bela Bartok** (hongrois, 1881 - 1945) emploie un mode issu de la musique traditionnelle hongroise qui ne comporte pas de note sensible, proche des modes médiévaux. **Olivier Messiaen** (français, 1908 - 1992) abandonne complètement les modes classiques. Il invente de nouveaux modes qu'il nomme modes à transposition limitée. (*voir chapitre précédent*)

La remise en cause des règles classiques s'avance d'un cran supplémentaire lorsque **Arnold Schoenberg** (autrichien naturalisé américain, 1874 - 1951), puis **Anton Webern** (également autrichien, 1883 - 1945), élaborent le **dodécaphonisme**. Ils décrètent l'égalité de principe des 12 demi-tons (*dodéca* = 12). Autrement dit, même la hiérarchie des notes qui prévalait dans les modes a été éliminée. On peut se promener où l'on veut, d'intervalle en intervalle, sans se soucier de tonique ou de dominante. On conserve toutefois les 12 demi-tons de l'échelle tempérée. Les accords harmoniques n'ont plus leur place. Ils sont remplacés par des agrégations verticales où toute superposition de notes est possible.

La remise en cause des règles tonales, modales et harmoniques entraîne avec elle la **révision de toutes les dimensions de la musique**, les échelles sonores, les formes rythmiques et les timbres. Les esprits sont en effervescence et s'efforcent de sortir des normes habituelles. Pourquoi, pensent-ils, obéir à de vieilles lois qui ont été exploitées et usées dans tous leurs recoins? Ils prennent conscience que ces lois ne sont pas inéluctables, que la création humaine a bien d'autres ressources et peut emprunter bien des chemins. On entre dans une démarche d'exploration de tous les aspects du phénomène sonore. Le phénomène sonore fascine par lui-même. Il s'agit réellement de **musique expérimentale**.

### Diversification des hauteurs de son

Ensuite certains remettent en cause l'échelle des 12 demi-tons égaux. Ils les remplacent par des **intervalles de tailles extrêmement diverses**. On divise l'octave en 22 intervalles égaux, en 31, 41, 53 ou autres, ce qui crée des **micro-intervalles** qu'on appelle des quarts de ton, des huitièmes de tons, etc. Ceci se produit dès le début du 20<sup>e</sup> siècle - **Charles Ives** (états-unien, 1874 - 1954), **Ivan Wyschnegradsky** (russe, 1893 - 1979), mais surtout après 1960 - **György Ligeti** (hongrois, 1923 - 2006), **Maurice Ohana** (français d'origine espagnole, 1914 - 1992), **Luigi Nono** (italien, 1924 - 1990).

Finalement, il n'est même plus besoin de fragmenter l'octave en paliers. À partir de 1948, on s'autorise l'utilisation de l'**échelle complète continue des sons**, de l'ensemble des fréquences, par exemple sous forme de glissandi (**Iannis Xenakis**, architecte et compositeur grec exilé en France, 1922 - 2001), un peu à la manière des sirènes ou du bruit du vent.

La découverte ou redécouverte des **musiques modales du Moyen-Âge** ou des **musiques traditionnelles européennes** et encore plus **extra-européennes** se révèle une source importante d'inspiration et de réflexion sur la remise en cause des échelles sonores et du tempérament. Ces musiques présentent une diversité de systèmes sonores d'une extrême richesse. On considère les musiques ethniques avec un autre regard, envisagées non plus comme des musiques rudimentaires de "sauvages", mais au contraire recelant des systèmes élaborés.

Dans notre atelier de chant, il est facile d'apprendre des chants d'autres traditions: Moyen-Âge, Afrique, Russie... Par les disques, les films, les émissions télévisées, nous sommes maintenant familiers avec ce genre de musique et ces modes de toute nature, au point qu'on ne se rend même pas compte qu'ils ne sont pas composés dans les modes classiques. Il faudra un peu plus d'entraînement et un sens de l'aventure pour reproduire des modes de Debussy, Bartok, Messiaen ou d'autres compositeurs modernes.

L'intérêt pour les musiques ethniques est antérieur à notre époque, il est né avec les récits des grands explorateurs, et les objets ou personnes qu'ils ramenaient. **Jean-Philippe Rameau**, au 18<sup>e</sup> siècle, dans son opéra-ballet "*Les Indes galantes*" voulait amuser les aristocrates et la cour par des danses de "sauvages" (ce qui n'enlève rien à sa qualité musicale). La mentalité évoluant, c'est avec plus de compréhension et de respect que les compositeurs du 19<sup>e</sup> siècle explorent les traditions de leur propre pays, puis celles des autres: **Bartok** et **Zoltan Kodaly** (hongrois, 1882 - 1967), **Edward Grieg** (norvégien, 1843 - 1907), **Antonín Dvorák** (tchèque, 1841 - 1904) et la musique slave et les musiques noires américaines, **Debussy** et les modes de l'extrême-orient, etc..

### Diversification des formes rythmiques

Le contact avec d'autres sonorités suscite également un renouveau de l'approche des notions de rythme et de timbre. Par le passé, les rythmes se réduisaient à la division du temps en 2 ou 3, et s'inscrivaient dans des mesures à 2, 3 ou 4 temps. Or les musiques ethniques et folkloriques offrent une diversité de rythmes incomparable.

La diversification des formes rythmiques est particulièrement nette avec **Igor Stravinsky** (russe naturalisé états-unien, 1882 - 1971). Dans son œuvre *Le sacre du printemps*, il se sert de rythmes constamment changeants comme expression de la force vitale primaire et fait voler en éclats la division binaire et ternaire. **Bartok** et **Messiaen**, puis les compositeurs de la musique dodécaphonique osent d'autres formes rythmiques. Bartok puise son inspiration dans les rythmes du folklore hongrois où il trouve des temps inégaux. Messiaen étudie les chants des oiseaux, tente d'inscrire leurs rythmes selon les procédés indiens, puis invente les siens propres, dans le sillage de la musique sérielle.

La **musique sérielle** est un développement logique de la musique dodécaphonique dans laquelle on cherche à organiser les 12 sons égaux de l'échelle sonore. Alors on imagine d'employer toutes les hauteurs possibles selon des suites ou *séries* déterminées. Mais pas seulement les hauteurs. Les intensités et les durées de sons sont également utilisées dans toutes leurs valeurs possibles. Bien évidemment, le tempo régulier n'existe plus. Avec **Webern**, puis **Pierre Boulez** (français, né en 1925), on a plutôt des agrégats sonores, des sons éparpillés ou regroupés, des cellules, des points, des lignes, créant diverses ambiances ou couleurs sonores.

En définitive, des règles classiques du rythme, il ne reste rien. Toute valeur, toute division, tout enchaînement sont possibles. Il s'ensuit bien évidemment qu'on ne peut plus reconnaître de thème mélodique dans ces œuvres.

## Emploi de nouveaux matériaux sonores

Les sonorités tirent également parti de ce foisonnement d'inventions: instruments employés, manière de les jouer, composition des orchestres et ensembles. Y participent de façon remarquable **Hector Berlioz** (qui augmente le nombre d'instruments pour produire des effets grandioses), **Wagner**, **Stravinsky**... Au fur et à mesure que les harmonies se complexifient et se transforment en agrégats sonores, **le son est considéré comme une matière**, avec son intérêt propre. On le tourne et le retourne, on le déforme, on l'expose dans tous les sens pour en extraire tous les saveurs possibles.

Au 20<sup>e</sup> siècle, des appareils électroniques font leur entrée sur la scène musicale, introduisent des sons synthétiques, et apportent la possibilité de transformer n'importe quel son, synthétique ou enregistré, par des filtres. On peut les couper partiellement, changer leur hauteur, leur rythme, les passer à l'envers... Toutefois, ces sons ne peuvent pas être exécutés par un orchestre. En concert, on fait entendre des bandes magnétiques, souvent accompagnées d'un orchestre réel. **Karlheinz Stockhausen** (allemand né en 1928) est un pionnier de cette **musique électronique**.

**Edgar Varèse** (compositeur français naturalisé américain, 1883 - 1965) se plaît à appréhender le son sous forme de masses sonores auxquelles il donne corps. *"Pour Varèse, la volupté sonore n'est pas une valeur de seconde main, c'est une qualité primordiale de la musique. Mais entendons-nous bien, cette volupté n'a rien d'une caresse épidermique. Elle n'invite pas à des pâmoisons distinguées. Ce serait plutôt un viol de l'oreille, une possession physique comprise dans un sens le plus dionysiaque, celui qui fait de l'agression le plus puissant ressort de l'assouvissement érotique"* (Henry Barraud, *Pour comprendre les musiques d'aujourd'hui*).

*Varèse est surtout connu pour son œuvre **Déserts** (1954) pour instruments à vent, percussions et bande magnétique.*

L'exploration du phénomène sonore comme manifestation de la matière se poursuit de nos jours, facilitée par le développement rapide des techniques informatiques et des connaissances scientifiques. C'est le cas de la **musique spectrale** (avec **Gérard Grisey** et **Tristan Murail**) qui exploite les notions d'harmoniques et timbre.

Une autre voie d'exploration, celle par exemple de **Luciano Berio** (italien, 1925 - 2003), consiste à tirer parti des instruments d'une façon beaucoup plus large. *"Voix ou instruments sont poussés à l'extrême limite de leur virtuosité, arrachés à leur tradition, élargis. Il libère une expression verbale souvent affective, spontanée, immédiatement descriptive: murmures, cris, souffles, pleurs, bruissements, onomatopées attachées à la vie corporelle. Il libère la respiration"*, nous dit l'IRCAM.

*Luciano Berio, **Sequenza VII** pour hautbois seul*

En atelier musical, il est curieux de constater que cette nouvelle musique d'exploration du son est à la portée de tous, si on l'aborde comme un jeu. Les enfants adorent. Comme eux, retrouvons ce plaisir ludique sans jugement. Nous nous amusons à produire des bruits et sons divers, avec des objets, avec notre voix dans tous ses aspects, avec notre corps (pieds, mains, etc.).

D'autres compositeurs introduisent comme sons nouveaux, des bruits provenant de la vie courante. C'est ce qu'on désigne sous le terme de **musique concrète**. **Pierre Henry** (français, 1927 - 2017) compose *Variations pour une porte et un soupir* (1963) et *Messe pour le temps présent* (1967), qui a été chorégraphiée par Maurice Béjart. Il y mêle musiques concrète et électronique.

*Pierre Henry, **Variations pour une porte et un soupir***

## Nouvelles méthodes de composition et de représentation

On change aussi la **disposition de l'orchestre** dans l'espace du concert. Dans certains cas, on place plusieurs orchestres jouant des parties différentes en des endroits distants.

Gênés par le côté trop fixe d'une œuvre, des compositeurs écrivent de la **musique aléatoire**,



dans laquelle la partition propose plusieurs choix à différents moments de l'exécution. Quelquefois, c'est le chef qui décide, et pour d'autres, ce sont les musiciens individuellement. Quelquefois, le choix est induit par un évènement extérieur, comme un danseur qui invente des mouvements.

Pour composer, **Ianis Xénakis** fait appel à de puissants ordinateurs qui déterminent les groupes de sons qu'il souhaite pour traduire sa pensée musicale, au moyen de calculs des probabilités (**musique stochastique**).

## Tendances de la musique actuelle

### Libres de toutes contraintes

Voici donc la création musicale libérée de toute règle imposée. Ni la tradition, ni l'église, ni les rois, ni la norme sociale ne soumettent plus le compositeur à ses obligations ou ses souhaits. Tout semble permis dans la création musicale: l'atonalité n'exclue pas la tonalité, le tempérament coexiste avec l'absence de tempérament, l'échelle continue des sons avec des notes bien définies, rythmes et sonorités se présentent de façons les plus diverses, etc. Quand tout est possible, il reste au compositeur à choisir lui-même sa forme d'expression. Il se trouve face à lui-même, à sa sensibilité, à sa personnalité, au public et à la société. Comment les compositeurs d'aujourd'hui gèrent-ils cette liberté?

Voici des pistes empruntées par quelques compositeurs. Attention, il ne s'agit pas d'une photographie de la situation actuelle, mais de coups de projecteurs sur des aspects particuliers de la musique élaborée à partir de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle, à la suite de la musique dodécaphonique.

### Communiquer avec le public

Le langage utilisé par la musique du 20<sup>e</sup> siècle s'est souvent éloigné de la sensibilité du public. Des compositeurs se sont questionnés. Comment **créer une musique qui soit compréhensible par un large public**, au-delà d'un petit cercle de spécialistes?

**Betsy Jolas** (états-unienne née à Paris en 1926) estime que la recherche du phénomène sonore, pour instructive qu'elle soit, nous a coupé de la **beauté** et du **langage du cœur**. Elle s'est surtout intéressée à la **voix** et accorde la même importance à toutes les dimensions de la musique (mélodie, harmonie, timbre). Il est intéressant de la citer, car elle est une des rares femmes compositrices "professionnelles". Elle recherche la sensibilité féminine en musique.



*Betsy Jolas, Épisode 1 et Quatre pièces en marge*

Une jeune compositrice coréenne déjà réputée (**Unsuk Chin**, née en 1961, résidant en Allemagne), semble avoir trouvé sa voie dans des œuvres très colorées (voir sa **biographie** en anglais).

**André Jolivet** (français, 1905-1974) "*recherche de façon méthodique à assigner à sa musique une fonction magique, incantatoire. À cela concourt une rythmique très complexe et l'usage corollaire d'une batterie très importante, riche en instruments exotiques et dans laquelle le son et le bruit se mélangent de façon organique, le son pouvant, dans certains cas, agir comme une sorte de résonateur des bruits répartis à la percussion*" (Henry Barraud). Sa musique foisonne de vitalité.

*André Jolivet, deuxième concerto pour trompette*

### Musiques de film

Sans que nous nous en rendions compte, nous sommes en partie familiarisés avec tous ces types

de musique contemporaine et de leurs sonorités, par l'intermédiaire du cinéma et des musiques qui l'accompagnent. Les **musiques de films** sont souvent des oeuvres musicales véritables. Soutenues par l'image, elles nous paraissent aller de soi, car elles épousent l'histoire, créent des ambiances, provoquent des gammes d'émotions. Explorer l'âme humaine sous tous ses aspects émotionnels et mentaux au travers du son est l'une des dimensions de la musique contemporaine.

Certains compositeurs se sont spécialisés dans la **musique de film**. Mais il n'y a pas de distinction nette de genre entre les deux, seulement des contraintes différentes et une diffusion commerciale spécifique. Des extraits d'oeuvres de compositeurs contemporains sont incluses dans des films, et ces compositeurs eux-mêmes n'hésitent pas à composer de la musique de film, tels **Sergueï Prokofiev** (russe, 1891 - 1953), **Arvo Pärt** (estonien né en 1935) ou **Philip Glass** (états-unien né en 1937).

*The City - Dance, extrait de Akhnaten (Akhénaton)  
opéra de Philip Glass. Acte 2, scène 3*

### L'apport des musiques de la planète

Le formidable essor technologique des moyens de transport des personnes et des télécommunications a eu pour conséquence une internationalisation de la musique. Les compositeurs occidentaux ont pénétré les musiques ethniques d'une façon plus intime et respectueuse. **Georges Gerschwin** (états-unien, 1898 - 1937), un pionnier, a intégré la **musique de jazz** dans certaines oeuvres (*Rhapsodie in blue*). Puis les compositeurs des autres traditions eux-mêmes se sont mis à voyager et enseigner leurs musiques (arabe, amérindiennes, indiennes, japonaise, africaine, balkaniques...). Si elles plongent leurs racines dans la tradition, elles n'en sont pas moins des oeuvres contemporaines, inscrites dans une culture internationale.

**Ravi Prasad** (indien né au Kérala, 1955) n'a pas eu besoin d'aller chercher l'inspiration en Inde puisqu'il y est né et qu'il s'est formé à Madras. Vivant en France depuis 1985, il s'est imprégné de nombreux courants musicaux: jazz, musique électroacoustique, musiques ethniques. Sa musique est la fusion organique du style indien traditionnel et de la culture occidentale. Ce mariage s'exprime parfois dans les titres de ses oeuvres (par exemple *Entre deux*). Les *Polyphonies indiennes*, compositions inspirées des chants de fêtes et de labeur qui rythment les saisons, instaurent la polyphonie dans la musique traditionnelle indienne.

### L'inspiration mystique

Même dans les périodes de fortes recherches matérialistes, il y a toujours eu des compositeurs pour qui la musique était un moyen d'exprimer leur ferveur mystique: **Messiaen**, **Francis Poulenc** (français, 1899 - 1963).

La suite d'orchestre *Les planètes* de **Gustav Holst** (anglais, 1874-1934) est issue de sa passion pour la mystique. Elle préfigure la musique de **John Williams** dans le film *La guerre des étoiles*. Il s'est aussi intéressé à la musique indienne.

*Gustav Holst, Les planètes*

**Arvo Pärt** (estonien, né en 1935) s'est d'abord initié à la musique sérielle, puis il y a renoncé et s'est consacré à l'étude de la musique médiévale et au chant grégorien, qui influenceront fortement ses compositions. Elles sont d'inspiration religieuse et épurées. *"Je construis à partir d'un matériau primitif - avec l'accord parfait, avec une tonalité spécifique. Les trois notes d'un accord parfait sont comme des cloches. C'est la raison pour laquelle je l'ai appelé tintinnabulation."* Et aussi: *"La complexité et les faces multiples ne font que me rendre confus et je cherche l'unité"*.

*Arvo Pärt, Te Deum*

## La musique, expression caractéristique d'une époque

Chacun des genres de musique qui se sont succédé du Moyen-Âge à nos jours produit des impressions caractéristiques de l'époque, du pays, de la mentalité d'une communauté, d'une société.

Ainsi, les **musiques romantiques** (Beethoven, Chopin, Schumann, Berlioz, Brahms...) expriment les vicissitudes de l'âme, les tourments de l'amour et la gamme des **sentiments** humains. Elles s'adressent à notre dimension émotionnelle. En remontant le temps jusqu'à Mozart, Haendel et la **musique classique**, nous voici dans la beauté émanant d'une harmonie, d'une organisation, d'une **structure**. C'est la dimension du mental (ce qui ne veut pas dire intellectuel, car relié au vivant et au spirituel), qui s'inscrit dans la vie sociale. Bach nous en offre une version plus verticale, s'étirant vers le haut plus que vers le social. Avec la **musique médiévale**, le chant grégorien et les modes liturgiques, nous sommes dans la dimension **spirituelle**.

Le temps semble nous avoir emmenés successivement dans toutes nos dimensions, du spirituel à l'émotionnel, et cela se prolonge dans la **musique moderne**. L'utilisation des sons et des accords complexes nous plonge dans la sensation et la **sensorialité**. Stravinsky, avec le *Sacre du printemps* et ses rythmes impulsifs et plein de vitalité nous entraîne dans le monde des **forces vitales primordiales**. On les retrouve dans l'apport des musiques folkloriques et ethniques et dans l'irruption des musiques africaines redigérées sous forme du jazz et du rock. Enfin les productions de la **musique contemporaine** nous emmènent aussi bien dans la manipulation de la **matière** sonore, que dans des évocations **minérales** au travers de la musique concrète ou électronique.

## La musique, expression d'un choix d'être

L'impression laissée par ce rapide survol de 12 siècles de création musicale est celle d'une richesse d'invention et de transformation. La création musicale se déploie, se cherche, se modifie, se réinvente. C'est l'**expérimentation liée aux forces de vie qui s'explorent dans toutes leurs dimensions**, dans toutes leurs possibilités. Les musiques nous touchent différemment selon ce qu'elles véhiculent. Elles entrent véritablement en contact physique, elles *touchent* notre corps. Elles produisent des **impressions** (impression = pression vers l'intérieur, ou **empreinte énergétique**). Il y a des musiques qui participent à l'épanouissement de l'être, qui nous vivifient et nous réjouissent. Il en est d'autres qui transmettent leur caractère tourmenté, aride, disloqué, agressent l'être et quelquefois le déstructurent et corrompent sa pensée (exemple la techno).

Dans l'élaboration d'une œuvre, un créateur traduit son état intérieur en communiquant des impressions au moyen de langages musicaux qui sollicitent son esprit. Or cet **état intérieur** a des composantes diverses. Quelles sont celles qui se mettent sur le devant de la scène? (*voir en annexe le point de vue de G.I. Gurdjieff: L'art subjectif et l'art objectif*). Sont-ce les états émotionnels de la personne, qui portent ses joies, ses désirs, ses frustrations et ses ressentiments, sont-ce sa sensorialité et sa sensualité? Est-ce la manifestation de son être profond? La musique contemporaine s'est parfois laissée fasciner par la sensorialité du phénomène sonore ou par des constructions mentales élaborées. Si la volupté sensorielle et l'invention raisonnée sont des facultés louables et bienfaisantes de l'être humain, il peut s'y perdre si elles ne sont pas reliées à son centre. **L'erreur est d'oublier qui est cet être profond qui demande à être écouté.**

# Chapitre 5

## Une approche sensorielle et expérimentale du son : hauteur, intensité, timbre

*Ce chapitre est consacré à la compréhension des caractéristiques physiques du son. Par l'expérience sensorielle, à travers des exemples familiers et grâce à des fichiers sonores, nous découvrons les qualités physiques et musicales des sons. L'expression vocale peut profiter de ces prises de conscience et je propose quelques exercices vocaux d'applications.*

*Dans la première partie, nous faisons connaissance avec les notions de hauteur et de fréquence, et de la notation musicale correspondante. Dans la deuxième partie, nous nous familiarisons avec les notions de volume ou force du son, ainsi que ses modulations. Enfin, dans la troisième, nous abordons la prise de conscience du timbre. Par des illustrations visuelles et sonores, j'explique en détail les notions d'harmoniques, ce qui nous permet de comprendre comment fonctionne le chant diphonique.*

Comment vous parler du **son**?

Le son a tellement de facettes que je lui ai consacré les multiples chapitres de cet ouvrage.

Et vous, si je vous dis "son", qu'est-ce que cela vous évoque?

Quelles images, quelles sensations, quels sentiments?

La musique, les CD, les bruits de la nature, les bruits de la vie quotidienne?

Votre voix?

Le chapitre présent est une invitation à une écoute affinée afin d'apprendre à connaître les qualités du son par l'expérience sensorielle. Je vais décrire successivement les 3 qualités physiques principales du son, à savoir la **hauteur**, l'**intensité** (dans cet article) et le **timbre** (dans un article séparé), avec l'approche de l'être sensible que nous sommes tous, complétée par celles du physicien, de l'acousticien et du musicien.

Les sons font tellement partie de notre univers qu'ils nous imprègnent de façon consciente et inconsciente dans les domaines les plus variés de notre vie. Notre oreille est stimulée par les sons de façon quasi-permanente. Pour le meilleur et pour le pire.

Le son ne touche pas seulement l'oreille, mais le corps entier et à travers lui, atteint divers niveaux de notre être, physique, émotionnel, mental, spirituel. Selon les personnes ou les circonstances, c'est un aspect ou un autre qui est mis en jeu. Par exemple, s'il survient un fort coup de tonnerre, une personne éprouvera de la peur, et éventuellement la manifestera. Quelqu'un d'autre va rester paisible, comptant le nombre de secondes entre l'éclair et le tonnerre, intéressé par cet aspect informationnel. Le niveau le plus immédiat est peut-être l'**émotion** que le son ou la musique nous procurent, de plaisir ou de déplaisir, quelquefois d'extase. Un autre phénomène extraordinaire lié au son est la **résonance physique** qui se produit dans notre corps et comment cette interaction peut harmoniser ou déséquilibrer les circuits énergétiques de notre corps. (*voir chapitre 1 Résonances sonores corporelles*).

Il y a aussi les sons qu'on émet soi-même. Comment dire l'importance de notre propre **voix**? À la fois comme instrument de **communication**, reflet de notre personnalité et de notre richesse, et comme **expression** de notre désir de chanter. Envie tout à fait naturelle et vivante, présente chez l'enfant dès le plus jeune âge, émergeant de nos élans intimes, à moins que nous ne soyons entravés par des jugements et que nous ayons honte de notre voix.

Le **physicien** est bien placé pour décrire les caractéristiques du son. Mais détient-il toute la

vérité? L'**acousticien** a un autre point de vue, qui tient compte de la physiologie et de la psychologie de l'auditeur. Je décrirai également l'approche du **musicien**, basée sur sa sensibilité et sur un système de notation de la musique occidentale. Mentionnons celle du **musicothérapeute**, qui s'intéresse à l'aspect équilibrant, nourrissant et guérisseur du son. Ce sont toutes des vérités, qui répondent à des interrogations différentes, s'adressent à des plans différents de la personne humaine.

Nous nous aiderons de certains appareillages et logiciels du physicien et de l'acousticien destinés à préciser et illustrer certaines notions. Toutefois, nous laisserons de côté les explications scientifiques théoriques. Bien qu'elles soient utiles et passionnantes, elles ne prennent sens que si elles reposent sur du vécu et perçu.

C'est la recherche de ce ressenti sensoriel qui va nous guider dans notre découverte de la hauteur, de l'intensité et du timbre des sons.

## I. Sons graves et sons aigus : hauteur et fréquence

### Écoutons les voix humaines

Commençons notre exploration du monde sonore en écoutant les voix humaines, sans jugement, juste pour leurs sonorités multiples. Remarquons la différence entre les voix de femmes et les voix d'hommes par exemple. Pour la plupart d'entre nous, c'est notre expérience première, puisque nous avons écouté la voix de notre mère et celle de notre père, même à l'intérieur de l'utérus maternel. Les femmes ont des voix plus **aigües**, et les hommes des voix plus **graves**. La qualité sonore qui nous permet de faire la distinction entre les sons graves et les sons aigus est leur **hauteur**.

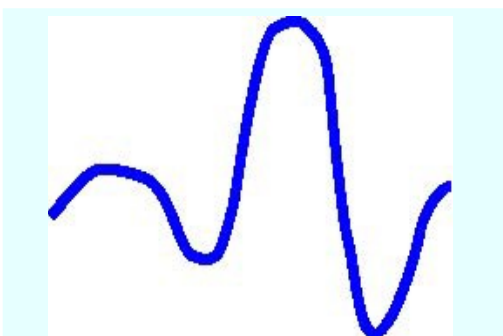
Les hauteurs de sons sont également très perceptibles lorsque nous les prononçons ou les **chantons** nous-mêmes. Nous pouvons généralement identifier si nous chantons dans le bas de notre voix ou dans le haut. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas car il existe des défauts de perception liés à des causes le plus souvent psychologiques, rarement physiques. Une éducation permet de retrouver une perception juste (*voir chapitre 2 sur l'éducation musicale Willems*).

### Ondulations

Alors chantons des sons au hasard. Peut-être entonnerez-vous une mélodie. Les mélodies sont composées de notes successives qui sont comme des paliers de sons à différentes hauteurs.

*Et si je vous propose de chanter des sons qui montent et descendent de façon continue?*

Cela ne vous semble pas naturel? Pourtant dans la nature, le vent nous fournit des mouvements continus du son en hauteur, surtout par jour de tempête, des montées et descentes du son. Nous pouvons l'imiter par la voix (écoutez l'[illustration sonore](#) jointe, voir la représentation graphique fig. 5.1).



*Fig. 5.1. Vagues montantes et descendantes*

Peut-être préférez-vous des sons plus mécaniques produits par les machines. Une sirène, une moto qui démarre avec une forte accélération, une débroussailleuse à fil, produisent des sons qui montent et descendent de façon continue.

Avec cette idée des vagues de sons, revenons à la voix humaine. Ne produisons-nous pas habituellement et

naturellement des sons montants et descendants? Et oui, et très souvent, mais nous n'y prêtons pas attention. Il s'agit des intonations de nos phrases dans le langage, celles qui diffèrent d'un accent régional à un autre par exemple. Encore plus typiques sont les intonations accompagnant l'expression de nos **émotions**: "oh", "ah", "ah bon!", "ouah!", ou encore des gémissements, cris, etc.

Les instruments de musique occidentaux sont conçus plutôt pour produire les notes par palier, autrement dit des notes fixes, cependant nombreux sont ceux qui sont capables d'émettre des sons montants et descendants, comme la famille des violons. Le violoncelle sait très bien imiter la voix humaine.

On peut donner une représentation imagée de ces montées et descentes par des graphiques (fig. 5.1). Les sons hauts sont dits **aigus** et les sons bas sont dits **graves** (grave comme gravité terrestre).

## Fréquence du son

Depuis longtemps, on sait que **les sons sont produits par des vibrations**. Ainsi, un son peut faire vibrer des objets autour de nous, les vitres de la fenêtre par exemple. Le technicien du son peut observer que les membranes de ses haut-parleurs vibrent lorsqu'elles émettent des sons. Ces vibrations sont lentes pour les sons graves au point qu'on voit la membrane se gonfler vers l'avant et revenir vers l'arrière de façon répétitive. Les allers et retours deviennent d'autant plus rapides que le son est élevé.

Grâce à des expériences extrêmement simples, les physiciens ont pu relier la hauteur du son à sa fréquence de vibration (*voir chapitre 10 Histoire de la notion de fréquence sonore*). Ils mesurent la vitesse de vibration par le nombre d'allers et retours que fait la membrane par seconde, qu'il nomme la **fréquence**. Elle est mesurée en un nombre par seconde, encore appelé des "périodes par seconde" (abréviation *ps*) ou **hertz** (abréviation *Hz*). Un hertz correspond à 1 vibration par seconde. Un kilohertz (*kHz*) correspond à 1000 vibrations par seconde et un mégahertz (*MHz*) à 1 million de vibrations par seconde. L'oreille perçoit les sons sur une échelle de fréquences allant à peu près de 16 hertz (son très grave) à 16 000 hertz (son très aigu). Ces limites d'audibilité ne sont pas strictes et varient en fonction des individus.

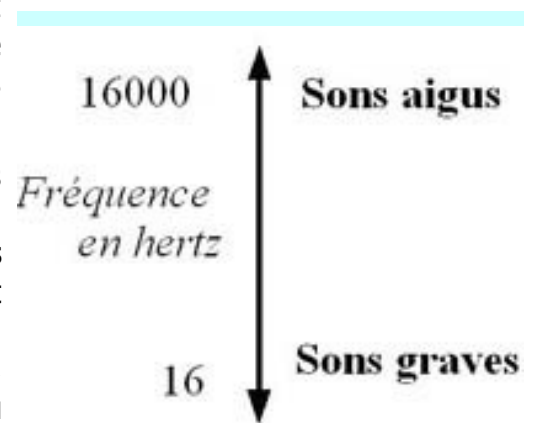


Fig. 5.2. Échelle de fréquence des sons audibles

*Pour nous rendre compte des valeurs des fréquences, écoutons deux sons, l'un grave de 110 Hz, suivi d'un autre aigu, de 3520 Hz, dans cette illustration sonore.*

### Son grave et son aigu

Cependant, il faut faire une distinction entre la hauteur absolue, mesurée par la fréquence, et la perception de la hauteur. Comme le dit E. Leipp, *la sensation de hauteur d'un son de fréquence donnée varie avec la hauteur absolue du son, avec son timbre, avec son intensité, avec le contexte musical.*

## Reproduire un son

**Exercice:** Je vous fais entendre un son, celui-ci: [Une note](#)

*Je vous demande de le chanter avec votre voix.*

*Puis celui-ci: [Une autre note](#)*

*Vous pouvez faire la même chose en produisant une note avec un clavier, ou tout autre instrument et le chanter. Si vous n'y arrivez pas, ce n'est pas important. Il ne vous manque que l'entraînement à la justesse de voix, qui passe par la sensation corporelle des sons.*

## Diapason: la définition du LA

Les musiciens accordent leurs instruments avant de commencer à jouer de manière à ce qu'ils aient tous le même LA. Or ils s'alignent sur un LA produit par un petit appareil nommé un **diapason**. Est-ce à dire que ce LA est fixé? Effectivement. Toutefois, la hauteur du LA et des autres notes a longtemps été assez approximative sans que cela pose de problème. Pour le musicien, les hauteurs sont plus relatives qu'absolues. Ce qui importe est l'écart juste entre les notes. Ceci est lié à la notion de gammes et de modes.

Vous êtes peut-être habitués aux notes données par le piano pour lequel un DO est un DO. Et lorsqu'un musicien rencontre un musicien, qu'est-ce qu'ils se disent? Accordons-nous. C'est-à-dire vérifions que nous avons bien le DO à la même hauteur. Mais la définition de la hauteur d'un DO ou d'un LA est arbitraire. Et oui! La notion de hauteur déterminée n'existait même pas en Occident avant le XVI<sup>e</sup> siècle. Puis la hauteur du LA (et des autres notes) a varié dans le temps et dans l'espace, selon les régions et les pays, selon les époques et selon les instruments. Plus encore, elle pouvait varier d'un bâtiment à l'autre d'une même ville. En Europe, des mesures sur les instruments d'époque montrent pour le LA un étalement de plus de 2 tons. Cependant, on a peu à peu attribué une fréquence fixe aux notes. C'est ce qu'on appelle le **diapason**. Fixer un diapason national ou international est une idée moderne plus ou moins respectée.

En France le LA3 a été fixé à 435 hertz en 1859, avant d'être détrôné par le LA international. En 1939, la *Fédération internationale des associations nationales de standardisation* (ancêtre de l'*Organisation internationale de normalisation* ou ISO) **fixe arbitrairement le LA3 à 440 hertz à la température de 20°C**. En 1953, la Conférence internationale de Londres l'officialise.

Des explications plus détaillées sont données dans le chapitre 9: *La hauteur des notes de musique doit-elle être normalisée par un diapason? Les aléas historiques de la fréquence du LA.*

## Sauts de hauteur sonore et intervalles

Dans les chants, la mélodie se promène par sauts de note en note, contrairement aux chants du vent et de la sirène qui glissent de façon continue. C'est comme si la rampe continue qui permet aux vélos et poussettes de monter la pente, a cédé la place à un escalier composé de marches espacées de façon ordonnée mais pas régulière. Les notes sont comme des paliers, des niveaux de hauteur de son. En musique, l'écart de hauteur entre 2 sons s'appelle un **intervalle**.

**Exercice:** *Écoutez deux notes successives différentes, qui constituent un intervalle, et amusez-vous à reproduire ces deux notes avec votre voix. Essayez avec celui-ci:*

Un intervalle

*Exercez-vous avec des intervalles variés, en jouant deux touches au hasard sur un clavier par exemple, ou avec un autre instrument. Commencez par les plus simples, avec des touches proches l'une de l'autre.*

L'intervalle entre deux touches de piano consécutives s'appelle un **demi-ton**. Intervalle entre un SI et un DO, par exemple, ou entre une touche noire et la blanche adjacente. Bien évidemment, on peut produire des intervalles qui ne sont ni des demi-tons, ni des tons ou leurs multiples: on peut sauter d'un son à un autre sans s'occuper des notes avec notre voix, ou avec des instruments de

musique qui ne produisent pas de notes fixes comme le violon ou certaines flûtes rustiques. Il est possible et tout à fait intéressant d'entendre et de reproduire des intervalles beaucoup plus petits qu'un demi-ton (**micro-intervalles**).

## Octaves

La musique est faite d'intervalles variés et innombrables. C'est la présence de certains intervalles plutôt que d'autres qui donne à une musique sa couleur orientale, chinoise, indienne ou occidentale par exemple. Car l'assemblage des intervalles produit les modes et des gammes.

Toutefois, il est un intervalle que l'on retrouve dans toutes les gammes et dans toutes les cultures, un intervalle universel, c'est l'**octave**. Qu'est-ce que l'octave? La meilleure façon de vous la définir n'est-elle pas de vous le présenter, de vous le faire écouter?

### Deux sauts d'octave

**Exercice:** chantez le premier intervalle d'octave entendu ci-dessus. Vous pouvez vous aider en imaginant que vous chantez (si vous la connaissez) la chanson suisse "*Là-haut sur la montagne*". Ce sont les deux premières notes, l'intervalle entre "*là*" et "*haut*".

Cet intervalle est universel parce qu'il est naturel, constitutionnel de notre nature. Il est facile de s'en rendre compte en comparant la voix féminine à la voix masculine. Demandons à un homme de chanter une petite mélodie et à sa compagne de chanter la même chose avec lui. Avec sa voix de femme, elle chantera naturellement plus haut que l'homme: exactement une octave plus haut. Et pourtant, tout en sachant que leurs voix sont différentes, ils auront la sensation de chanter la même chose, d'être ensemble, à l'unisson. Deux sons distants d'une octave, c'est le même son à deux niveaux différents.

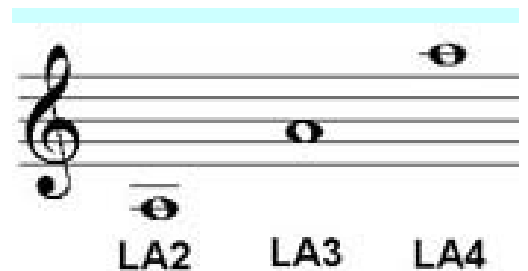


Fig. 5.3. Deux sauts d'octaves successifs

### Numérotation des octaves: LA3 = A4

En musique, deux sons distants d'une octave portent le même nom. Si le son grave est un DO, le son à l'octave au-dessus sera aussi un DO. Pour les distinguer, on leur attribue un numéro d'ordre qui augmente de 1 en montant: DO1, DO2, DO3, etc.... De même pour toutes les notes: LA3, LA4...

Dans les octaves graves en-dessous du DO1, on trouve, du moins pour la France, DO-1 et DO-2. Car **la notation change selon les pays**. En Grande Bretagne et aux Etats-Unis, on ne nomme pas les notes LA, SI, DO, RÉ, MI, FA, SOL, mais A, B, C, D, E, F, G. Pour la numérotation des octaves, l'octave de référence, l'octave numéro 1, n'est pas la même. Selon la notation anglaise, le A1 sonne une octave en dessous du LA1 français. Donc **le LA3 français est équivalent au A4**. En France, on n'utilise pas le zéro, alors qu'on l'utilise dans d'autres pays, et on peut donc trouver aussi la notation DO0 et DO-1 dans des partitions se référant à ces pays.

Pourtant, tous ne suivent pas ces règles. Les logiciels d'édition et de production sonore se réfèrent généralement aux habitudes anglaises et adoptent pour le LA3 la notation A4, qu'ils traduisent en français par LA4. Le même LA peut donc être appelé LA3 si l'on est fidèle à la tradition française ou LA4 s'il est calqué sur l'américain. D'après les concepteurs de ces logiciels, cela évite d'avoir des LA-1 et permet d'avoir un langage cohérent avec des musiciens étrangers.

Dans cet ouvrage, je conserve la notation française habituelle du LA3.



## Fréquences des octaves

Le technicien qui mesure les fréquences de 2 sons distants d'une octave constate que leurs fréquences sont dans un rapport 2. Par exemple, le son grave a une fréquence de 30 hertz et le son aigu de 60 hertz; ou encore 2000 et 4000 hertz. La connaissance de la fréquence des sons fait donc apparaître des chiffres caractéristiques: **à l'octave est associé le chiffre 2**. Le chapitre *Ton et intonation juste* rapporte les nombres associés aux autres intervalles dans trois types de gammes majeures. Ainsi pour les LA, on a les mesures suivantes:

Note	LA-1	LA1	LA2	<b>LA3</b>	LA4	LA5	LA6
Fréquence en hertz	55	110	220	<b>440</b>	880	1760	3520

On sait donc maintenant que l'exemple sonore de la figure 5.2 montrant l'amplitude des fréquences audibles va d'un LA1 à un LA6, à 5 octaves d'intervalle.

## 7 petites notes de musiques

Les musiciens repèrent la hauteur du son par les notes de la gamme. En Occident, les gammes de la musique classique et populaire reposent sur 7 notes de base s'inscrivant à l'intérieur d'une octave et répétées aux autres octaves. En français, ce sont les notes:

### DO - RÉ - MI - FA - SOL - LA - SI

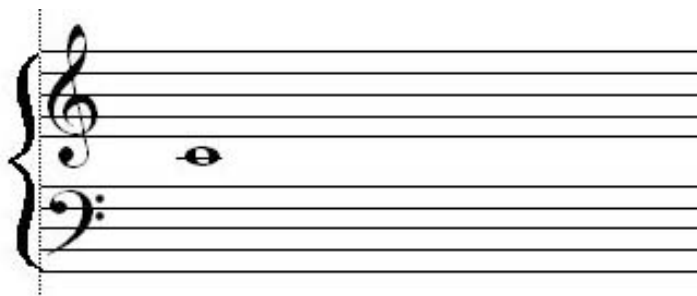
Tandis que la hauteur des LA est déterminée en fréquence par la convention internationale, les fréquences des autres notes ne peuvent pas être fixées de façon absolue, car elles dépendent de la gamme dans laquelle elles sont employées, et donc de la culture, de la conception que l'on a de la définition des intervalles, de notre jugement sur la justesse de la voix et en définitive de l'interprétation. Des détails sur les intervalles des gammes sont données dans le chapitre 8 *Ton et intonation juste*.

En anglais, on désigne ces notes par **A** (La) - **B** (Si) - **C** (Do, etc.) - **D** - **E** - **F** - **G**. En allemand, le **B** désigne un Si bémol, tandis que le Si est désigné par la lettre **H**.

Dans la gamme chromatique tempérée en usage actuellement, l'octave est partagée en 12 demi-tons équidistants:

### DO - DO# ou RÉb - RÉ - RÉ# ou MIb - MI - FA - FA# ou SOLb - SOL - SOL# ou Lab - LA - LA# ou Sib - SI - DO

Pour indiquer les hauteurs sur une partition, le musicien représente les notes sur une portée générale à 11 lignes, divisée en deux portées à 5 lignes, une en clé de Sol et une en clé de FA (fig. 5.4).



*Fig. 5.4. La portée de 11 lignes, avec le DO au milieu, représente l'échelle des hauteurs de notes par degrés*

On peut imaginer cette portée comme une projection graphique de l'échelle sonore: les sons graves sont inscrits dans le bas et les sons aigus dans le haut sur une étendue d'environ 3 octaves, sans parler de ceux qu'on peut ajouter

en bas et en haut. Le temps se déroule de gauche à droite.

Enfin, nous avons vu (chapitre 1) qu'il existe une correspondance entre l'échelle verticale des sons et le corps. Les sons résonnent dans le corps et ces résonances s'étagent des plus graves en bas du corps aux plus aigus dans le haut du corps.

## Mesure des intervalles, cents et savarts

L'oreille est un organe surprenant. Lorsqu'on monte de LA en LA, on a l'impression qu'on ajoute à chaque fois le même intervalle d'une octave. Pour un musicien, **l'intervalle d'une octave est égal à 12 demi-tons**, soit **6 tons**, quelle que soit la hauteur où se situe cette octave. 2 octaves font 12 tons, etc. Or de son côté, le physicien constate la multiplication de la fréquence par 2. En somme l'oreille a la propriété de transformer des multiplications en additions! En mathématique, la fonction qui réalise la même chose s'appelle un *logarithme*. Cela vous évoque-t-il quelque chose? C'est pourquoi on dit parfois que l'oreille est logarithmique.

### Cents

Aussi on a inventé une façon de mesurer un intervalle avec une unité qui s'additionne. L'unité la plus simple est l'octave. Un sous-multiple est le demi-ton tempéré défini comme la douzième partie de l'octave. L'unité utilisée par les acousticiens est le centième de demi-ton appelé **cent**. Il s'ensuit qu'**une octave vaut 1200 cents**.

*Un intervalle entre 2 sons de fréquences  $f_1$  et  $f_2$  s'exprime par le rapport  $f_1/f_2$ . Le même intervalle exprimé en cents se calcule en passant en logarithmes par la formule:  $I(\text{cents}) = \log\left(\frac{f_1}{f_2}\right) \times \frac{1200}{\log 2}$ . Les termes 1200 et*

*$\log 2$  sont simplement des coefficients d'échelle qui permettent de s'assurer que l'intervalle d'octave, de rapport  $f_1/f_2=2$ , fait bien 1200 cents.*

### Le savart

Il existe également une unité plus ancienne basée sur les logarithmes. Le physicien Savart a simplement transformé les multiplications de fréquences en additions en appliquant la fonction de logarithme à base 10. Puisque l'octave vaut 2 en rapport de fréquences, la nouvelle mesure d'*une octave vaut alors  $\log 2 = 0,30103$* .

Le **savart** est défini comme le 1/1000 de l'octave, ce qui fait qu'**une octave vaut 301 savarts**. Tout intervalle entre deux notes de fréquence  $f_1$  et  $f_2$  vaut  $1000 \log(f_1/f_2)$  savarts.

Le facteur d'échelle (1000) n'est pas tout à fait le même que celui des cents ( $1200/\log 2 = 3986$ ), de sorte que 1 savart vaut approximativement 4 centièmes.

Un comma vaut environ 5 savarts.

## Perception de l'oreille

Quel est le plus petit saut de hauteur que l'oreille peut apprécier?

*Écoutez. Entendez-vous le saut de hauteur entre le LA et la fréquence supérieure?*

1/2 ton

Un **demi-ton** tempéré ou 100 cents  
soit  $301/12=25,08$  savarts

En fréquences (*voir chapitre Ton et intonation juste*)  $2^{1/12}=1,0595$   
Exemple: le saut entre LA de 440 Hz et LA#:  $440 \times 1,0595=466,16$ .

1/4 de ton

Un **quart de ton** ou 50 cents  
ou  $2^{1/24}=1,0293$

Exemple: du LA 440 à la note de fréquence  $440 \times 1,0293=452,89$

1/10 de ton

Un **dixième de ton** soit 20 cents

ou  $2^{1/60}$

Exemple: saut de fréquence de 440 à  $440 \times 1,0116 = 445,11$

1/20 de ton

Un **vingtième de ton** soit 10 cents

ou  $2^{1/120}$

Exemple: saut de fréquence de 440 à  $440 \times 1,00579 = 442,55$

L'oreille perçoit très facilement le demi-ton, mais elle est beaucoup plus performante que ça, bien plus qu'on imagine: il lui est facile de distinguer le  $1/10^e$  de ton et même le  $1/20^e$  de ton. Une oreille entraînée est capable de discerner le  $1/200^e$  de ton dans les fréquences moyennes de sa plage d'audition, soit 1 centième ou une variation de fréquence de 0,05%. **Le cent (centième de demi-ton) apparaît comme la plus petite hauteur perceptible.**

## Amplitudes vocales et instrumentales

Sur la figure 5.5, j'ai reporté les tessitures des voix humaines, des flûtes à bec (flûtes douces), de la guitare et du piano. On remarque que la voix s'étale sur 2 à 3 octaves, tandis que le piano atteint 7 octaves.

Quant à l'oreille, elle peut percevoir environ de 16 à 16 000 Hz soit jusqu'à 10 octaves. En effet, si l'on double la fréquence 10 fois, cela revient à multiplier par  $2^{10} = 1024$ , très proche de 1000.

*Fig. 5.5. Étendues (tessitures) des voix humaines, des flûtes à bec, de la guitare classique et du piano*

## II. Sons forts et sons faibles : intensité et nuances

### Puissance et volume

La comparaison de sons de même hauteur nous livre une deuxième caractéristique, leur **force**. Vous en avez tous l'expérience. Telle personne parle avec une petite voix faible, à peine audible, tandis qu'une autre se fait entendre avec une voix trop forte, presque dérangeante. Cette qualité de force ou de **puissance** du son est nommée **intensité** par les physiciens. L'intensité du son est réglée par le bouton "**volume**" de notre chaîne hi-fi, autre façon d'indiquer sa puissance.

*Exercice: Écoutez la clarinette dans l'exemple sonore ci-dessus. De la même façon, émettez avec votre voix un son faible qui devient fort et redevient faible.*

Écoutez un crescendo et un decrescendo

Vous pouvez sentir dans votre corps que vous devez mettre plus de force dans le son fort. Cette caractéristique des sons est donc tout à fait perceptible par nos sens, dans les muscles de notre poitrine et de notre ventre, et pas seulement par l'oreille. Elle est reliée à l'**énergie** mise en oeuvre pour produire le son. Le son vibre dans l'air et vient stimuler le tympan. Pour les physiciens, sa puissance peut être exprimée avec des unités liées à l'énergie tel que le watt par mètre carré.

Notre langage est d'ailleurs un peu confus à ce sujet, puisqu'on dira "parle tout bas s'il te plaît". Le "bas" dont il est question ne concerne pas la hauteur du son, mais le **volume** du son. Cette association du haut et du fort (cf "haute tension") ne doit pas se transformer en équivalence. Il est vrai que la distinction de ces deux qualités d'un son n'est pas acquise d'emblée. Prendre conscience qu'un son est plus fort ou plus haut qu'un autre est un processus de conscience qui nécessite un apprentissage. La hauteur d'un son est une caractéristique différente de son intensité. On peut avoir des sons graves qui sont faibles et d'autres qui sont forts et on peut avoir des sons aigus faibles et d'autres forts.

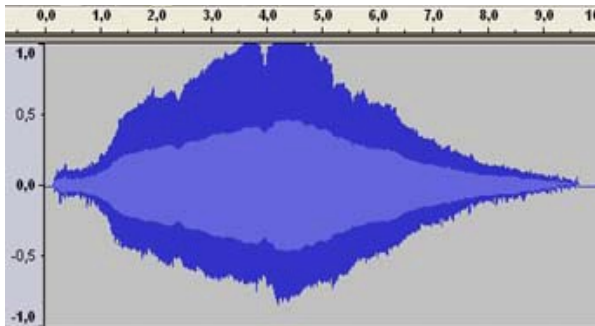
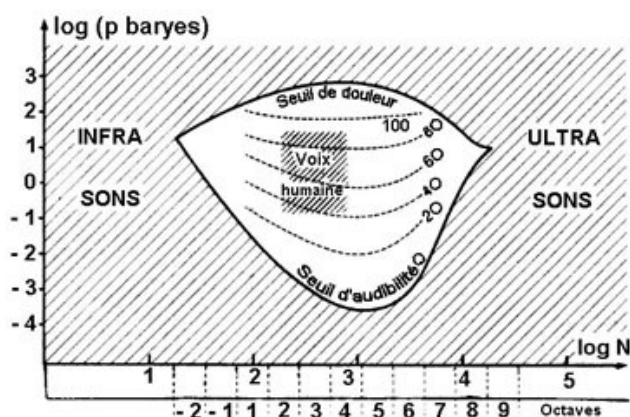


Fig. 5.6 Son croissant et décroissant

La figure 5.6 montre une représentation possible de la puissance du son. La ligne horizontale figure le déroulement du temps de gauche à droite. La ligne verticale figure le volume: un son fort est représenté par un élargissement de part et d'autre de la ligne médiane du zéro. Un son nul se réduit à la ligne médiane (voir des explications plus détaillées dans le chapitre suivant).

### L'oreille et les décibels



L'oreille n'entend rien en-dessous d'un certain seuil d'intensité (**seuil d'audibilité**). Elle a également une limite supérieure: certains sons sont tellement forts qu'ils sont assourdissants et douloureux.

Fig. 5.7. Courbe typique d'audibilité.

*En abscisse (ligne horizontale), la hauteur du son exprimée par le numéro de l'octave ou la fréquence. En ordonnée (ligne verticale), l'énergie du son exprimée en pression de l'air (d'après Eurin et Guimiot, Cours de physique, Hachette, 1958).*

Les seuils d'audibilité et de douleur varient en fonction de la fréquence du son. On peut donc tracer un audiogramme pour les représenter, comme sur la figure 5.7. Les audiogrammes varient avec les personnes, avec l'état de santé et avec l'âge. Et aussi avec l'attitude mentale de l'auditeur (concentration, refus d'écouter,...)!

Pour tenir compte des particularités physiologiques et nerveuses du système auditif, les **acousticiens** évaluent l'intensité sonore en **décibels**. Cette unité prend en compte un seuil moyen d'audibilité et certaines lois physiologiques de l'oreille. Celles-ci sont d'ailleurs diversement appréciées par les physiologistes, ce qui donne lieu à plusieurs définitions de "décibels pondérés".

## Nuances

Le **musicien** exprime l'échelle de force des sons ou **nuances** du plus faible au plus fort par les termes italiens *pianissimo (pp)*, *piano (p)*, *mezzoforte (mf)*, *forte (f)*, *fortissimo (ff)*, et le passage de l'un à l'autre par les termes *crescendo* et *decrescendo* (ou *diminuando*).

## La perception du volume varie selon le contexte

Ce n'est pas parce que le physicien mesure avec précision l'énergie du son et ses modulations qu'il faut s'imaginer qu'on peut définir la perception de sa force en mesurant son énergie. Pour un signal d'une même force, cette perception diffère avec la hauteur, comme on le voit sur la figure 5.7.

Elle varie également avec le contexte. Des esprits rationalistes bien intentionnés ont tenté de codifier les nuances *pp*, *ff*, etc. en leur attribuant des valeurs précises en décibels. Mais ils ont échoué car l'exécutant, guidé par sa sensibilité, ne joue pas un "piano" de la même façon selon le passage où il se trouve. *"L'oreille est un système adaptatif, où la chaîne des osselets joue le rôle d'un potentiomètre d'intensité réglable... Si un son est trop intense, l'auditeur, à son insu, généralement "baisse le niveau" de quelques 20 ou 30 décibels en relâchant les muscles de ses osselets. Si un son est trop faible et qu'il veut l'entendre, il "tendra" l'oreille, c'est-à-dire réglera le système ossiculaire de façon optimale. Dès lors les conclusions sont évidentes: le niveau perçu, "subjectif", sera fonction du niveau du contexte musical immédiat (de l'intensité des sons qui précèdent celui qu'on écoute." (E. Leipp, Laboratoire d'Acoustique Musicale, Université de Paris VI, bulletin du GAM, décembre 1978)*

Les nuances n'ont pas de valeur absolue. C'est une appréciation subjective, et c'est ce qui est recherché en musique tant il est vrai que nous avons besoin de plaisirs subjectifs.

## III. Couleurs sonores : timbre et harmoniques

*Écoutez ces deux sons de même hauteur, un Ré, l'un joué à la clarinette et l'autre à la flûte à bec alto avec la même intensité.*

*Écoutez deux sons de timbres différents*

Vous distinguez parfaitement bien les deux sons et si vous avez déjà entendu une clarinette et une flûte, vous saurez dire que le premier provient de la clarinette et le deuxième de la flûte. Or qu'est-ce qui vous permet de les distinguer? Comment peut-on nommer ce qui est différent? Ce n'est ni la hauteur ni le volume. Intuitivement, on dira c'est la **couleur** du son. Le musicien l'appelle le **timbre**.

## Harmoniques

Pour savoir quel est l'élément responsable du timbre dans le son, les physiciens ont analysé les caractéristiques de l'onde sonore en comparant des sons de même hauteur et de timbre différent. Ils ont découvert que l'onde sonore est composée de plusieurs sons partiels qui se superposent (*voir Analyse physique de l'onde sonore le chapitre suivant*). À la composante de base qui donne au son sa nature de note musicale avec sa hauteur et sa fréquence  $F$ , se superposent d'autres ondes moins perceptibles dont les fréquences sont des multiples de  $F$ :  $2F$ ,  $3F$ ,  $4F$ ,  $5F$ ,  $6F$ , etc. On les appelle des **harmoniques**.

Pour mieux vous rendre compte de quoi il s'agit, l'illustration sonore suivante vous fait entendre séparément un son fondamental suivi de ses harmoniques. Dans cet exemple, le son fondamental (harmonique 1) a une fréquence de 130 Hz, très proche d'un **DO2**. C'est un choix arbitraire qui donne un LA quasiment à 440 Hz. Puis viennent les harmoniques 2 (260 Hz), 3 (390 Hz), 4 (520), 5 (650), 6 (780), 7 (910), 8 (1040), 9 (1170), 10 (1300), 11 (1430), et 12 (1560).

Numéro d'ordre de l'harmonique	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fréquence en hertz	130	260	390	520	650	780	910	1040	1170	1300	1430	1560
Nom de la note correspondante	DO2	DO3	SOL3	DO4	MI4	SOL4	proche de SIb4	DO5	Ré5	MI5	proche de FA#5	SOL5

### Écoutez les harmoniques

**Expérience:** Si vous disposez d'un piano à cordes (et non électronique), vous pouvez réaliser une expérience pour approfondir cette notion d'harmonique. Vous allez libérer les étouffoirs des cordes de certaines notes choisies en maintenant leurs touches enfoncées doucement. Les notes choisies sont en correspondance harmonique: d'abord un son fondamental, le DO1. Vous enfoncerez ensuite la touche de la deuxième harmonique, qui a la fréquence double - c'est, on l'a vu plus haut, l'octave, donc DO2. La note de fréquence  $3F$ , troisième harmonique est SOL2, puis les harmoniques suivantes sont DO3, MI3, SOL3. Maintenant, jouez avec force le fondamental DO1. Lorsque vous cessez, tout en maintenant les autres touches enfoncées, écoutez vibrer toutes les cordes libérées.

Ce phénomène n'est-il pas remarquable? Le son d'une note a la capacité de stimuler et de faire sonner d'autres cordes accordées sur ses harmoniques, par résonance, sans contact direct. Remarque: cela ne marche que si le piano est bien accordé. Essayez avec d'autres notes pour constater que la résonance ne fonctionne pas ou presque pas. **Cela nous montre qu'une note et ses harmoniques sont intimement liées.**

## Résonances

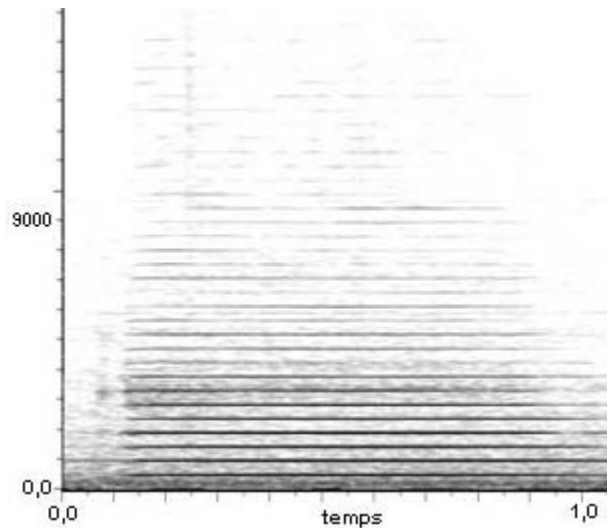
Ainsi, cette expérience nous révèle un autre phénomène étonnant quoique très répandu, le phénomène de **résonance**. Les cordes du piano se sont mises à vibrer alors qu'elles n'ont pas été touchées mécaniquement. C'est la vibration de la corde DO1 seule qui les a excitées à distance. De même un avion qui passe fait vibrer une vitre de la maison: résonance. Un bruit se manifeste dans votre voiture seulement quand le moteur tourne à une certaine vitesse: résonance.

Dans certains instruments de musique, comme le violon d'amour, instrument du Moyen Âge, ou le sitar, instrument traditionnel de l'Inde, il existe des cordes passives qui sont tendues sur l'instrument mais que le musicien ne touche pas. Elles émettent des sons par résonance avec les autres cordes, les cordes actives. On dit qu'elles vibrent en sympathie, ce sont des **cordes sympathiques**. On peut les trouver sympas car c'est effectivement très agréable, mais le mot

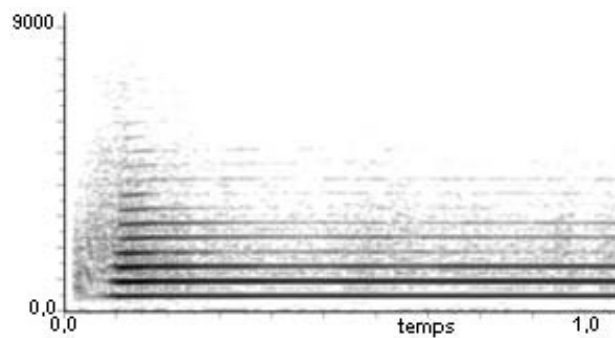
signifie qu'elles se trouvent sympas entre elles et qu'elles vibrent ensemble, car cela veut dire "qui sont sensibles (path..) ensemble (syn..)".

## Sonagrammes

Revenons au timbre, munis de cette connaissance des harmoniques. Le **timbre** est déterminé par la richesse du son en harmoniques. Un **sonagramme** (quelquefois aussi appelé sonogramme selon le terme anglais) montre la décomposition du son en ses composantes de différentes fréquences. C'est ainsi que nous pouvons constater que les sons d'un *violon* (fig. 5.8) comprennent beaucoup plus d'harmoniques que ceux d'une *trompette* (fig. 5.9). Si le son fondamental a la fréquence  $F$ , les harmoniques sont étagées selon des traits horizontaux espacés régulièrement de la distance  $F$ . Il existe aussi d'autres composantes, sons partiels, bruit de fond...



5.8. Sonagramme d'une note de violon.



5.9 Sonagramme d'une note de trompette

*Sur l'axe horizontal, le déroulement du temps. Le son commence à gauche et se termine à droite.  
Sur l'axe vertical, les fréquences. Le trait est d'autant plus noir que l'intensité est plus forte.*

## Sons partiels et bruits

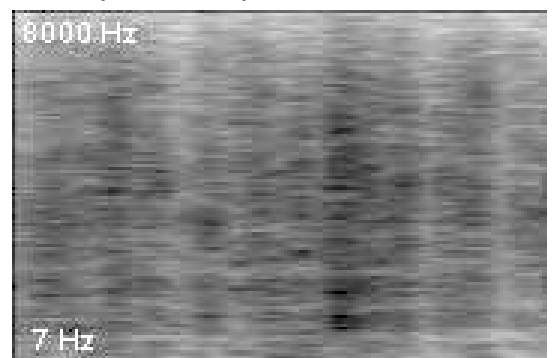
Les bruits tels que claquements, chocs, crissements, sont trop complexes pour qu'on puisse leur attribuer une hauteur déterminée. Leur sonagramme révèle des composantes qui ne sont pas des harmoniques, car elles ne sont pas des multiples entiers de la fréquence la plus basse. Un **bruit** est fait de la superposition d'ondes de fréquences sans rapport entre elles, qu'on appelle des **sons partiels**.

[Écoutez le bruit de papier froissé](#)

Les **instruments à percussion**, qui n'ont pas de hauteur fixe, ne comportent que des partiels.

Le son d'une **cloche**, bien qu'il soit hautement musical, est cependant complexe. On peut détecter plusieurs sons fondamentaux.

Lorsque les harmoniques d'un son de hauteur bien déterminée deviennent prépondérantes par rapport au son fondamental, l'oreille a de la difficulté à percevoir sa hauteur. Des sons synthétiques jouent sur cette confusion, par exemple en donnant l'impression qu'un son évolue en descendant sans cesse, alors qu'en réalité il est cyclique.



5.10 Spectre d'un bruit de papier froissé.  
*Le bruit ne comporte ni fréquence fondamentale, ni harmoniques, mais un ensemble continu distribué sur toutes les fréquences.*

## Le timbre ne se réduit pas à une quantité physique

Selon ce qui vient d'être exposé, la notion de timbre semblerait être complètement définie par la physique des harmoniques. Or il n'en est rien. Comme pour la hauteur et l'intensité, l'impression sonore dépend non seulement de l'onde sonore, mais également du fonctionnement de l'oreille et du cerveau, lui-même tributaire de la culture et de l'histoire de la personne.

Voici ce qu'en disent Jean-Claude Risset et Gerald Bennett, IRCAM (Institut de recherche et coordination acoustique/musique), Paris, dans la revue La Recherche n°108, février 1980. *On croit d'habitude que le timbre se caractérise d'abord par le spectre en fréquences du son, c'est-à-dire sa plus ou moins grande richesse en tel ou tel harmonique. Mais le timbre dépend de la hauteur et de la durée du son, et il est, généralement, lié aux vibrations du spectre au cours du temps, pendant la note. Il s'agit donc d'une notion complexe, difficile à caractériser d'une manière simple.*

Un exemple: l'attaque de la note participe de façon essentielle dans la reconnaissance de l'instrument, donc de son timbre. Autrement dit, pendant un laps de temps très court au-début de la note, le son évolue avant de se fixer sur un régime plus stable. Et bien, si on coupe ce temps électroniquement, on ne reconnaît plus l'instrument. Le son enregistré d'un piano rejoué en sens inverse ressemble à celui d'un accordéon.

Et voici ce qu'en disait E. Leipp, Laboratoire d'Acoustique Musicale, Université de Paris VI, bulletin du GAM, décembre 1978. *Les composants d'un SON MUSICAL CHANGENT CONTINUELLEMENT DANS LE TEMPS, un son qui ne fluctue pas continuellement étant un son "mort", non musical. En effet, un son physique, fixe, est bien un "objet sonore", mais un son musical est un "être sonore", un être qui naît, évolue puis meurt. Et dès lors une pièce de musique ne peut plus être considérée comme une "exposition d'objets" mais comme une "pièce de théâtre" acoustique où les sons musicaux sont des acteurs qui vivent, se côtoient, réagissent différemment selon les moments, les circonstances, le voisinage de l'instant, etc...*

## Superpositions de sons. Les accords

Vous pensez peut-être que l'approche vers la notion de timbre a été bien technique puisqu'elle a nécessité un appareil d'analyse électronique, le sonographe, et que cela n'a rien de sensoriel. Toutefois, le sensoriel est intervenu en premier lieu dans l'écoute de sons différents par leur timbre. En second lieu, il est possible de percevoir sensoriellement les harmoniques d'un son complexe. Autrement dit, ce que l'appareil a fait, l'oreille entraînée et développée peut le faire. Ce n'est cependant pas immédiat et cela demande un peu de pratique.

Il s'agit de distinguer plusieurs sons différents dans un complexe de sons. Cela commence par l'écoute de sons complexes où les composantes sont nettes et bien identifiées: les accords. Un **accord** est l'émission de plusieurs notes simultanées et superposées par tierces.

***Expérience:** Voici un accord composé des 3 notes DO, MI et SOL (accord parfait majeur) dans l'illustration sonore ci-dessous. Percevons tout d'abord l'accord comme un son global agréable et riche. Puis orientons notre attention sur les trois notes qui le composent et cherchons à les percevoir l'une après l'autre, séparément, puis à nouveau assemblées en accord.*

Écoutez un accord de trois notes

Le processus est exactement comparable à la dégustation d'un plat savoureux. On peut l'apprécier globalement, et on peut également fixer son attention sur la recherche des ingrédients, épices, légumes, etc. qui participent à la saveur. Une autre image, sonore celle-ci, est celle d'un orchestre jouant une symphonie dans lequel on peut percevoir la partie séparée de divers instruments. L'oreille possède donc la capacité remarquable de distinguer les sons composants dans un son complexe.



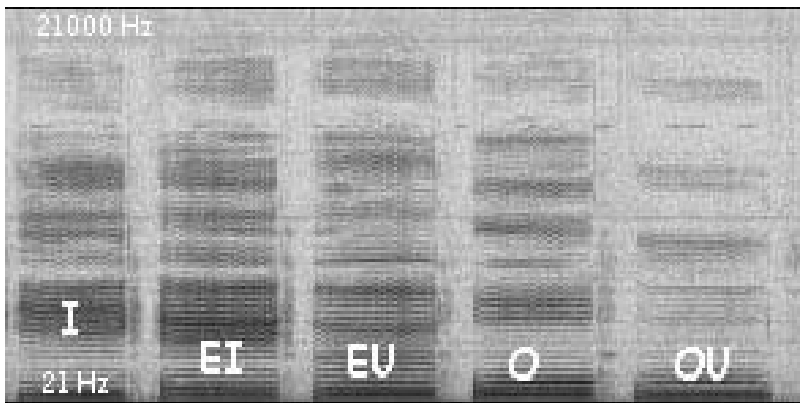
## Le timbre de la voix. Travail vocal

L'étape suivante du développement sensoriel de l'oreille consiste à repérer **les timbres de la voix chantée**. On reconnaît la voix de quelqu'un à sa couleur, à son timbre. Bien sûr, il y a aussi la hauteur de la voix, voix grave, voix aiguë. Mais on va également estimer que certaines voix sont "timbrées", alors que d'autres sont plus plates. Il en est de même de la voix chantée. Ce qui nous fait reconnaître un chanteur d'un autre, chantant la même chanson à la même hauteur, c'est son timbre de voix.

Lorsqu'on entreprend un travail vocal, le timbre de la voix change. Le travail vocal tel que je l'envisage ne consiste pas à façonner sa voix en luttant contre sa nature pour la faire ressembler à un modèle, mais à la découvrir, à l'explorer et à libérer ce qui l'encombre, pour en récupérer les pleines potentialités. On constate alors que la voix s'enrichit en harmoniques. Même si on n'est pas capable de percevoir les harmoniques, on constate la richesse de la voix globalement. Comme si des parties de notre corps un peu éteintes se mettent à vibrer et à participer à l'ensemble.

## Les voyelles

Or la voix chantée s'appuie essentiellement sur les voyelles. Les consonnes agissent pour structurer les voyelles. Ce que je désigne par voyelle ici, ce ne sont pas uniquement les voyelles *écrites*, qui sont spécifiques de l'alphabet spécifique français, tandis que chacun des alphabets étrangers codifie ses propres voyelles, différentes en nature et en nombre. Je parle des *sons* que produit la voix continue soutenue par le souffle, tels que A, E, I, O, U certes, mais également é, è, on, an, in, mm, nn, etc.



5.11 Spectre des voyelles: I, È ou EI, EU, O, OU

Il est intéressant de porter attention au timbre du son d'une voyelle. Si je prononce deux voyelles différentes, ou mieux si je chante deux voyelles à la même force et la même hauteur, je les reconnais et les distingue parce qu'elles n'ont pas la même composition en harmoniques. En fait, ce qui caractérise chacune des voyelles et qui fait leur nature, c'est leur spectre d'harmoniques.

[Écoutez la suite des voyelles correspondantes](#)

Le I comporte des harmoniques aiguës intenses. Puis, en chantant la suite È ou EI (comme dans *vEIne* ou *parEIl* qui se prononcent à peu près *parEIl* au nord et au sud de la France), EU, O, OU, on renforce des harmoniques de plus en plus basses.

Il existe des façons traditionnelles de chanter qui mettent en avant la richesse de la voix en harmoniques, et plus particulièrement des voyelles. La convergence des voix entre elles, associée à la résonance des voix avec un lieu tel qu'une église qui renforce les harmoniques, produit des harmoniques très distinctes qui semblent planer au-dessus des spectateurs et surgir de nulle part.

## Chant harmonique ou diphonique

Les musiciens et les chanteurs entraînés ont de tout temps été capables d'entendre les harmoniques contenus dans le son et superposés au fondamental. Certains sont même capables de les faire résonner séparément dans la voix chantée. C'est ce qu'on appelle le chant diphonique ou harmonique.

### Écoutez un extrait de chant diphonique

Cette façon de chanter existe depuis longtemps et a probablement été utilisée dans des rituels sacrés pour mettre en état de transe. David Hykes a été un pionnier aux USA et en France dans les années 1970 pour faire découvrir ce type de chant grâce à son groupe, *The Harmonic Choir*. Un chercheur d'origine vietnamienne, Tran Quang Hai, ethnomusicologue au CNRS, a étudié cette manière de chanter dans le chant traditionnel d'un peuple de l'Asie centrale, les Touvas.

Dans le film "Rencontre avec des hommes remarquables" (1977), d'après le livre autobiographique de même titre de George Ivanovitch Gurdjieff, le réalisateur Peter Brook montre un concours de chant harmonique en plein air "qui fait trembler la montagne".

3 Novembre 2005

# Chapitre 6

## Physique et perception du Son

**Résumé:** Qu'est-ce que le son? Est-ce un phénomène physique? Non, c'est un phénomène de perception par le cerveau provoqué par une source physique. Dans ce chapitre, nous découvrons cet enchaînement de phénomènes: nature vibratoire du son, comment il est émis, comment il se propage; par quel mécanisme il est capté, entendu et perçu par le cerveau.

Qu'est-ce que le son? Nous pouvons aborder cette question par deux attitudes. Ou bien, nous "observons" et expérimentons le phénomène du son dans ses manifestations familières. Ou bien, nous tentons de rassembler les souvenirs de nos lectures. Dans ce cas certains répondront peut-être: "Le son est une onde élastique transmise par l'air". Ne trouvez-vous pas qu'on répète une leçon apprise à l'école ou dans les livres, sans rapport avec notre vécu? Il me semble bien plus intéressant de ressentir le phénomène. **Le son est tout d'abord une sensation.** Le son se forme quand cette onde produit la sensation du son dans notre cerveau. Tant qu'il s'agit de la vibration physique, il n'y a pas de son. Nous allons examiner comment se forme cette sensation.

Lorsque nous percevons un son, nous nous rendons compte que nous le recevons par nos oreilles. Souvent, nous sommes capables de localiser et d'identifier la source du son. Ainsi, la **perception sonore** fait-elle intervenir une **source de son**, c'est-à-dire quelque chose qui produit le son, puis son acheminement jusqu'à l'**oreille**. Enfin c'est le fonctionnement du **cerveau** qui nous permet de le percevoir et d'en prendre conscience. Reprenons ces phénomènes point par point afin de les examiner en profondeur.

### Les sons sont produits par des objets vibrants



Tambour chamanique  
avec pictogrammes S. Cavé

Installez-vous tranquillement pour lire ce texte.

Maintenant, écoutez le monde autour de vous!

Qu'entendez-vous?

Nous percevons les **voix** des personnes qui nous entourent, le bruit du vent ou de la cascade, un cri, le **choc** d'un objet, le chant des oiseaux, un piano, un tambour, les bruits de l'activité humaine tels que les moteurs. Nous entendons la **musique** produite par les instruments de musique, par la radio et les CD et diffusée dans des hauts-parleurs, etc.

Le questionnement que je pose dans ce chapitre est: **Pourquoi et comment ces sons sont-ils engendrés et émis? Qu'est-ce qui fait qu'un instrument est sonore?**

La réponse la plus directe peut nous être fournie par l'attention portée à notre propre voix. Tentons d'émettre un son soutenu, une note chantée par exemple. Si nous sommes attentifs, nous sentons des parties du corps vibrer. Cela peut être dans la poitrine, dans le ventre, dans la tête, dans la gorge. Ou ailleurs. La voix produit des vibrations qui se répercutent dans le corps (*voir chapitre 1*) parce que **la voix humaine est elle-même une vibration** engendrée par les cordes vocales. Celles-ci vibrent sous l'effet de l'intention mentale. Elles sont mises en action ainsi que le souffle, par notre volonté. Mais attention: les cordes vocales ne sont pas des cordes, ce sont des bourrelets musculaires situés dans le larynx.

Qu'en est-il des sons extérieurs à nous? Il faut soit affiner notre sensibilité, soit nous mettre dans des conditions un peu excessives pour se rendre compte que **tous les sons sont des vibrations**. Ainsi, plaçons-nous à proximité d'un **haut-parleur** qui diffuse une musique très forte, par exemple lors d'un concert rock de plein air. Nous sentons immédiatement notre ventre vibrer sous l'effet du son.



Dans un **haut-parleur**, objet issu d'une technologie avancée, c'est une **membrane** souple qui produit le son. Nous la voyons vibrer elle aussi.

Dans tous les cas, **le son a été produit par**

**un objet qui vibre**. Ces objets sont naturels (les feuilles, la cascade), fabriqués (la peau d'un tambour, la corde d'une guitare, un tube de métal frappé), ou les cordes vocales d'un humain. Cet objet a été **mis en vibration, en oscillation**, par une sollicitation mécanique: la percussion, le frottement, l'effleurement, le souffle.

On peut s'amuser à produire des sons avec des objets de toute sorte, par exemple des bouteilles plus ou moins pleines. **La plupart des objets sont susceptibles de vibrer**, brièvement ou plus longuement, lorsqu'ils sont stimulés ou frappés d'une façon adéquate. **Si la fréquence de la vibration se situe dans le domaine audible, alors elle produit un son ou un bruit.**

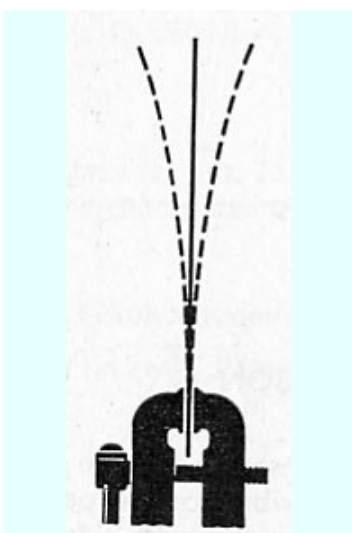


Figure 6.1. La vibration rapide d'une lame de scie fixée à une extrémité produit un son (d'après Eurin et Guimiot, Cours de physique, Hachette, 1958).

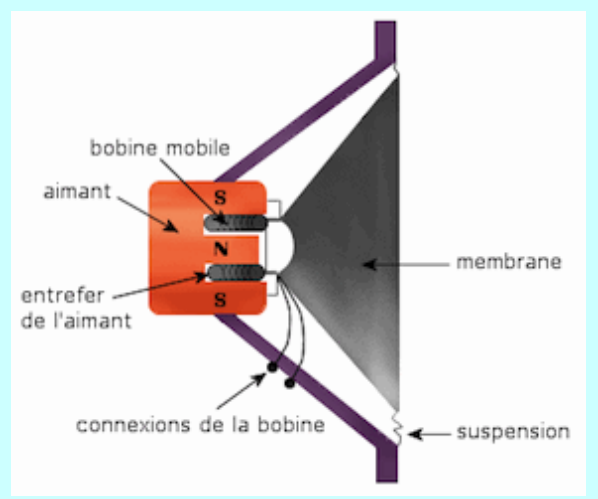
**Expérience:** Voici une expérience avec une lame de scie que je fais vibrer en la coinçant dans un étau (fig. 6.1). Je la tire sur le côté et je la lâche. Biiiiininngggg... Puis je change l'endroit de fixation. Au fur et à mesure que je descends la lame dans l'étau afin que la partie vibrante raccourcisse, je perçois des sons d'abord **graves**, puis de plus en plus **aigus**, et enfin plus rien car les sons sont au-dessus de mon seuil perceptible (domaine des **ultra-sons**). De même, si je monte la lame de telle sorte que la partie flexible de la lame soit longue, je n'entends plus rien, même si je la vois vibrer. C'est le domaine des **infrasons**, des sons inaudibles parce que leur fréquence est située en-dessous du seuil d'audibilité (voir chapitre précédent).

Dans le cas d'un instrument de musique tel qu'une **trompette**, quelle est la partie vibrante? C'est la colonne d'air contenue à l'intérieur de l'instrument. Elle est mise en vibration par **le souffle et les lèvres** du trompettiste. Il souffle comme s'il prononçait "ppp". En même temps, la vibration de l'air est communiquée **au corps de l'instrument** qui vibre dans son ensemble.

Dans une **clarinette**, le souffle met en vibration une fine **languette de bois** (en roseau), l'**anche**. Mais ce son est à peine audible et il prend de

## Fonctionnement d'un haut-parleur

Dans un **haut-parleur**, une membrane est fixée sur une bobine magnétique (un enroulement de fils électriques en **hélice** sur un cylindre). Cette bobine est mobile et peut coulisser dans les échancrures d'un aimant. Lorsqu'elle est traversée par un courant, par exemple celui qui vient d'un lecteur de CD ou d'un amplificateur, elle produit un champ magnétique qui interfère avec celui de l'aimant et l'oblige



l'ampleur parce que tout le corps de l'instrument est mis en vibration. L'anche vibrante transmet sa vibration au corps et à la colonne d'air. Pour le **violon**, c'est l'archet qui frotte sur la corde et la met en vibration. La corde est couplée à la caisse de résonance en bois qui se met à vibrer aussi dans son ensemble. Même chose pour la **guitare** avec la différence que la corde est mise en vibration parce qu'on la pince.

Quel que soit l'instrument, à vent ou à cordes, c'est l'ensemble du corps instrumental qui vibre sous l'effet de la sollicitation. Aussi, **les caractéristiques sonores** d'un instrument dépendent à la fois de la **matière** dans laquelle il est réalisé (bronze, cuivre, bois, corne...), et de sa **forme** (caisse de résonance d'un violon, tube de la clarinette et de la trompette, épaisseur du bois ou du métal) (*voir des précisions dans le chapitre 7, Le son créateur de formes*)

## Propagation physique du son

Comment le son produit par la corde du violon peut-il parvenir au tympan de notre oreille et à notre peau et devenir perceptible?

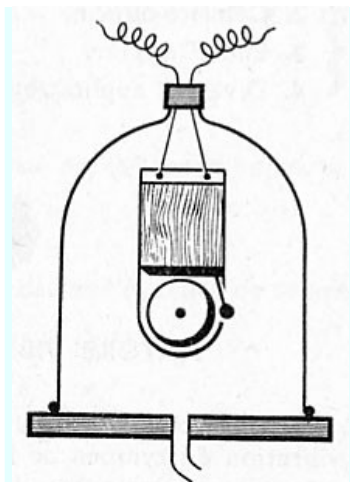


Figure 6.2. (d'après Eurin et Guimiot, *Cours de physique*, Hachette, 1958).

### Le son se propage dans l'air

**Expérience:** Pour étudier ce phénomène, des physiciens ont installé une sonnerie dans une cloche en verre dans laquelle on fait progressivement le vide avec une pompe (fig. 6.2). Au fur et à mesure que l'air de la cloche se raréfie, le son perçu à l'extérieur s'atténue, puis s'éteint.

C'est donc que l'air participe à la transmission du son de la sonnerie vers le tympan. **L'air est le support physique de la transmission du son.**

Comment cela se passe-t-il pour un instrument de musique? Lorsqu'un trompettiste souffle dans son instrument, l'air est mis en vibration par ses lèvres dans l'embouchure d'une trompette. Ensuite, l'air transmet sa vibration dans l'environnement jusqu'aux objets et surfaces qu'il touche. C'est ainsi que le tympan de l'oreille et la peau reçoivent la vibration de la trompette. Mais il ne s'agit pas encore d'un son, mais du souffle vibrant de l'air. Il faudra l'intervention du cerveau pour que cela

devienne un son.

Le souffle d'air est quelquefois perceptible lorsqu'on passe à côté de grosses baffles de sonorisation extérieure de concerts.

Le son ne se transmet pas seulement à travers l'air, mais **aussi à travers les autres gaz.**

Un autre phénomène familier est que le son est atténué par la **distance**. Plus on est loin de la source, moins on l'entend.

### Le son se propage dans les liquides et les solides

**Faites l'expérience suivante:** vous vous délassiez dans le bain et vous entendez le ruissellement de l'eau du robinet qui coule dans le bain. Plongez la tête sous l'eau (si vous lisez l'écran de votre ordinateur, je vous conseille de le poser avant !). Entendez-vous encore le bruit de cascade? Plus fort? Ou moins fort? **L'eau conduit le son bien mieux que l'air.**

Il en ressort que **le son a besoin d'une substance matérielle pour se propager**, que ce soit une substance éparpillée comme les gaz ou une substance plus dense comme l'eau. Cela peut également être une **substance solide dense comme le métal ou le bois**, comme le montre l'expérience suivante:

**Observation:** Vous avez un réveil avec des aiguilles, qui fait "tic-tac". Vous le posez sur un meuble creux en bois. Le son est amplifié, ce qui montre que le son s'est propagé à travers le bois du meuble. Il est familier de constater, lorsque vous entendez les bruits de la pièce voisine, que les bruits des chaises qu'on déplace sont bien plus perceptibles que les voix des personnes qui y discutent. En effet les bruits de chaise ont été transmis par les poutres ou le sol de la maison tandis que les voix sont véhiculées par l'air.

Quand Lucky Luke veut savoir si une troupe de chevaux arrive au loin, il colle son oreille sur le sol. Si c'est un train, il la colle sur le rail. Il les entend de bien plus loin. Ceci s'explique par la valeur de la vitesse de propagation du son dans la matière.

### Le son va plus vite dans la matière dense

**Observation:** Il est possible d'évaluer le temps mis par le son à se déplacer dans l'air en observant un orage. La détonation de la foudre produit simultanément un coup de tonnerre et un éclair. Or nous voyons l'éclair avant d'entendre le son, ce qui prouve que la lumière va beaucoup plus vite. Tellement vite qu'on peut considérer que l'éclair nous arrive pratiquement instantanément depuis l'endroit où il s'est produit. Le son voyage plus lentement et arrive avec quelques secondes de retard. En comptant les secondes, on peut calculer la distance à laquelle éclate l'orage.

On a pu mesurer cette vitesse dès 1738, en utilisant un canon. Elle est de l'ordre de 330 mètres par seconde dans l'air, soit **un kilomètre en 3 secondes**. Dans l'exemple de la foudre, on divise le nombre de secondes par 3 pour obtenir le nombre de kilomètres. Dans l'eau, la vitesse du son est 4,5 fois plus grande: 1500 m/s Elle est encore plus élevée dans les solides (5200 m/s dans l'acier, 3000 à 6000 m/s dans le verre). **En gros, plus la matière est dense, plus rapide est la vibration sonore.**

Les différences de vitesse du son selon le milieu de transmission sont responsables de **variations de sa hauteur**. Une cloche plongée dans l'eau devient plus grave. Cela produit des phénomènes amusants. Si l'on parle dans un récipient où l'on a mis de l'hélium, on a l'impression d'avoir une petite voix aigüe.

## Perception et conscience

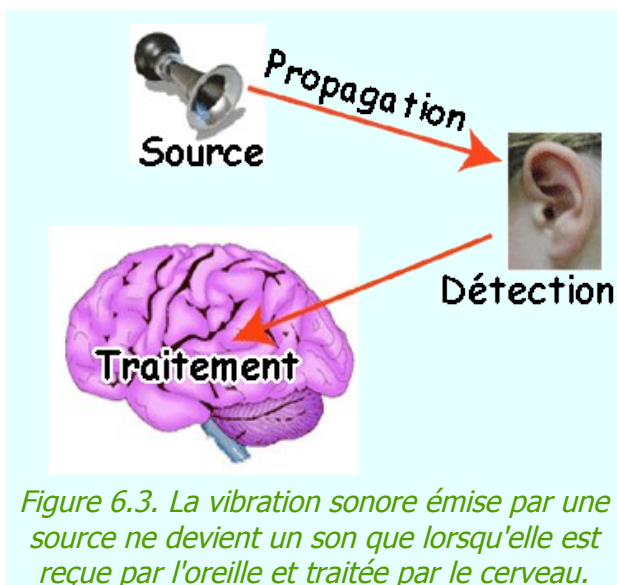


Figure 6.3. La vibration sonore émise par une source ne devient un son que lorsqu'elle est reçue par l'oreille et traitée par le cerveau.

Une vibration mécanique de la matière et de l'air qui met en branle le tympan ou le micro ne constitue pas en elle-même un son. Car c'est dans le cerveau que naît et se forme le son. **Le son n'existe pas en-dehors de notre cerveau, de nous-même.**

L'oreille recueille les vibrations de l'air, les transforme en impulsion électrique au moyen des cellules nerveuses, impulsion qui est perçue et interprétée en son par le cerveau (fig. 6.3). Le son est donc essentiellement une **perception**. Si l'attention se dirige vers cette perception, la perception arrive à la conscience. **Un son est un phénomène psychique, lié à la conscience des êtres vivants.**

### Psychoacoustique

Entre l'arrivée des signaux vibratoires aux oreilles et la sensation de son dans le cerveau, a lieu le phénomène de **traitement des signaux par le système nerveux**. Cela signifie que la vibration physique de l'air ne parvient pas de façon brute au cerveau. Elle est transformée.

Une constatation simple est que la gamme des vibrations est tronquée. Nous n'entendons pas les sons trop bas ou trop hauts, même si leurs vibrations parviennent à la peau ou à l'oreille. Notre système nerveux ne peut recueillir et transformer en phénomène sonore qu'une **fenêtre limitée dans les fréquences, environ de 20 à 20 000 hertz**, avec des variantes en fonction des individus.

Cependant, le traitement des signaux vibratoires met en action des mécanismes complexes: physiologiques, psychiques, émotionnels, cognitifs (liés à notre apprentissage et nos expériences antérieures). L'étude de ces phénomènes a donné lieu à la science de la **psychoacoustique**. Les connaissances accumulées par cette science ont des applications aussi bien pour le diagnostic et les dysfonctionnements de l'ouïe que pour la conception des salles de concert, les techniques de reproduction des sons, et les systèmes de compression numérique pour l'enregistrement et le stockage.

*L'ouïe traite les signaux sonores pour en extraire les informations nécessaires à notre perception de l'environnement* (J.C. Risset). Dans un environnement bruyant, nous sommes capables d'extraire de façon automatique les sons qui ont un sens pour nous, comme les paroles de quelqu'un qui nous parle. Nous sommes également capables de reconnaître des formes sonores, tels que des instruments de musique. Dans une musique, l'ouïe a la faculté de séparer et distinguer des sons superposés. D'autres fois au contraire, elle fusionne en un son complexe des sons distincts.

Certains phénomènes psychiques sont à l'origine de dysfonctionnements de l'ouïe. Il existe une surdité psychologique. On a souvent dit que l'oreille n'avait pas de paupières. Toutefois le cerveau peut en faire office de façon inconsciente. Il a la possibilité de bloquer la perception de certains sons qui nous font mal psychologiquement. Il se peut que nous entendions mal certaines fréquences associées aux voix des parents si ceux-ci ont été source de traumatismes, s'il l'un frappait l'autre par exemple. C'était trop douloureux à entendre. De même des traumatismes porteurs de dévalorisation, de négation, de violence, qu'il nous est impossible d'accepter sont source de baisse de l'acuité auditive ou au contraire d'hypermotilité.

### **Le son dans la peau et les os**

L'oreille n'est pas le passage obligé pour transmettre le son jusqu'au cerveau. La peau et les os sont également des voies efficaces.

Il est fréquent que des personnes ne reconnaissent pas leur voix enregistrée. C'est tout à fait normal puisque nous avons l'habitude de l'entendre non seulement par nos oreilles, mais par nos os et notre chair. Lorsqu'on effectue un audiogramme pour diagnostiquer l'audition, on teste aussi bien l'audition par l'air que l'audition par la conduction des os du crâne.

Si nous sommes immergés dans l'eau, oreilles comprises, et que nous écoutons de la musique diffusée dans l'eau, par exemple comme le propose **François Louche**, il est étonnant de constater combien **nous percevons cette musique avec clarté dans l'eau, même en nous bouchant les oreilles**. Nous la ressentons dans tout le corps.

### **Le son intérieur**

Encore plus insolite, quoique familier: nous pouvons entendre des sons **intérieurement**, soit parce que volontairement nous les chantons "mentalement", soit parce qu'ils **surgissent en nous comme une voix intérieure**. Par exemple une rengaine nous trotte dans la tête de façon inopinée. D'ailleurs comment font les compositeurs pour trouver leur musique? Ils entendent le son qui se déroule en eux, même s'ils le concrétisent immédiatement au piano, ils le sentent vibrer et le retranscrivent.

Dans le chant intérieur, il n'y a pas de vibration physique de l'air ambiant, pas d'onde sonore. Mais

par similitude avec les sons produits physiquement, on peut toujours caractériser la hauteur de ces sons par leur fréquence.

La production mentale du son est la preuve que **le son est créé dans le cerveau**. Il est donc surprenant que certains ne le définissent que comme la vibration physique de l'air (phénomène physique), comme s'ils ne connaissaient pas cette expérience évidente des phénomènes psychiques.

**Résumons:** La matière vibre et émet des **vibrations** qui se **propagent** en s'atténuant avec la distance. Ces vibrations ont des plages de fréquences très étendues qui affectent notre corps, notre peau, notre oreille, et provoquent des effets sonores. Le tympan est un filtre physiologique qui ne laisse passer qu'une plage réduite de fréquences et de volume et la sensation sonore se produit lorsque l'influx nerveux arrive au cerveau. Donc **le son est une impression intérieure suscitée par une excitation extérieure**.

## Son, rayonnements et matière

Je reviens avec insistance sur le double caractère du son: il est à la fois **matériel** (physique) et **mental** (sensation, perception).

Toutefois, même s'il a quelque chose de matériel, il n'est pas un objet, on ne peut pas le toucher, il n'a ni forme ni poids. C'est un **rayonnement** et comme tous les rayonnements, il est de nature vibratoire. Il se propage.

Dans l'expérience immédiate, les perceptions que nous en recevons de nos organes des sens nous suggèrent de classer les manifestations en deux grandes catégories: les **objets** et les **rayonnements** (*voir article Matière et rayonnements*)

- Les **objets** sont caractérisés par leur forme, leur volume, leur couleur, leur poids, leur position dans l'espace, leurs déplacements, leur consistance dense, liquide, gélatineuse ou gazeuse, leur température, etc... Ils sont constitués de matière. **Les objets sont l'expression de la matière par des formes.**
- Les **rayonnements:** ce sont par exemple la lumière, les rayons X, les ondes de télécommunication de la radio, de la télévision et du téléphone mobile. Également l'électricité. À l'inverse des objets, ils ne peuvent pas être touchés ni vus, on ne peut pas leur attribuer un volume, etc... Ils se propagent de façon invisible et ne manifestent leur présence que quand ils rencontrent un "obstacle", c'est-à-dire un objet avec lequel ils entrent en interaction. Par exemple l'antenne du téléphone mobile ou l'écran de cinéma.

Le son est très intimement lié à la matière, car il est provoqué et se propage par les vibrations de la matière. À tel point que **le son est capable de modeler de la matière fluide**. C'est ce qu'a montré par exemple Hans Jenny dans des expériences qu'il a nommées la "**cymatique**". Sous l'influence de sons transmis par des plaques vibrantes, des fluides ou de la poudre prennent des formes étonnantes (*ce sujet est développé dans le chapitre 7*).

**Comme tous les rayonnements, le son ne se manifeste à nos sens ordinaires que s'il rencontre de la matière** (le tympan, la peau, la membrane du micro). On pourra comparer le rayonnement sonore et le mécanisme de sa perception avec la nature et la perception des couleurs (*voir article La nature de la couleur*).

## Analyse physique de l'onde sonore

Dans le chapitre précédent, nous avons examiné de façon sensorielle les caractéristiques physiques du son: hauteur, puissance, timbre. Nous allons laisser de côté ici l'approche purement sensorielle et tenter de comprendre le lien entre les caractéristiques physiques du son et les impressions



sonores. Pour cela, effectuons quelques expérimentations à l'aide d'un microphone et d'instruments d'analyse.

## De la vibration sonore au signal électrique

Comment fonctionne un **micro(phone)**? C'est la vibration de l'air qui met en mouvement la membrane du microphone. La vibration mécanique de la membrane est transformée en **vibration électrique**. Ensuite la vibration électrique est acheminée dans des appareils électroniques qui la traitent et la transforment, par exemple l'amplifient ou l'enregistrent. Imaginons donc un son qui touche un micro où il est converti en signal électrique, lui-même enregistré sur un support matériel tel qu'une cassette magnétique ou un enregistreur MP3. **Le signal électrique enregistré est la reproduction (presque) fidèle de la pression de l'air sur la surface du micro.**

Lorsqu'on rejoue l'enregistrement dans un lecteur ou une chaîne hi-fi, c'est le chemin inverse qui se produit. Le signal électrique est converti en vibration de la membrane du **haut-parleur**, qui provoque les modulations de la pression de l'air ambiant, produisant l'impression sonore. Par la suite, nous allons examiner des enregistrements graphiques des courants électriques recueillis par un micro. Mais, pour la commodité de l'exposé, on peut tout aussi bien considérer qu'ils représentent le déplacement de la membrane ou la pression et l'énergie vibratoire de l'air.

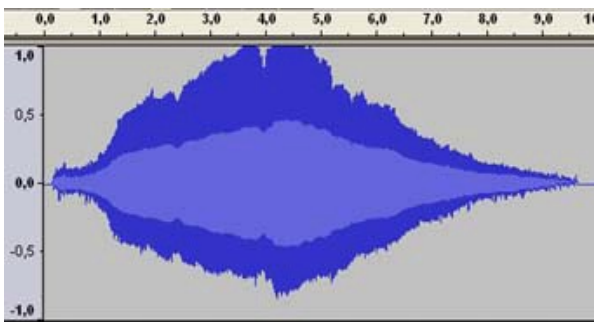


Fig. 6.4. Son croissant et décroissant

La figure 6.4 est l'un de ces graphiques. Puisque l'onde sonore y est enregistrée intégralement en tant que variations de la pression de l'air, il doit être possible d'extraire dans ce graphique toutes les caractéristiques du son: hauteur, volume (ou puissance), timbre. C'est ce que nous allons analyser maintenant.

## Volume ou puissance

Le caractère de volume a été examiné dans le chapitre précédent. **Le volume est relié au déploiement en hauteur de la courbe.** On comprend bien que plus le son a de force, plus la membrane du haut-parleur peut vibrer loin de part et d'autre de sa position d'équilibre, de façon similaire à une balançoire qu'on pousse de plus en plus fort.

Ainsi le son se manifeste par une alternance de surpressions et dépressions de l'air, oscillant entre des valeurs négatives et positives. C'est pourquoi la courbe évolue de part et d'autre d'une ligne zéro, qui est la ligne d'équilibre quand il n'y a pas de son.

Ce qu'on nomme le volume, ou intensité, ou puissance du son, est proportionnel à la quantité d'énergie produite par le mouvement de la membrane et donc la vibration de l'air. Mathématiquement, l'énergie développée à un instant donné est mesurée (à un facteur constant près) par le carré de l'amplitude de la courbe à cet instant.

## Hauteur

Nous savons que la hauteur est reliée à sa fréquence. Où donc la fréquence est-elle visible dans la courbe? Pour la débusquer, il faut agrandir la courbe sur l'échelle des temps.

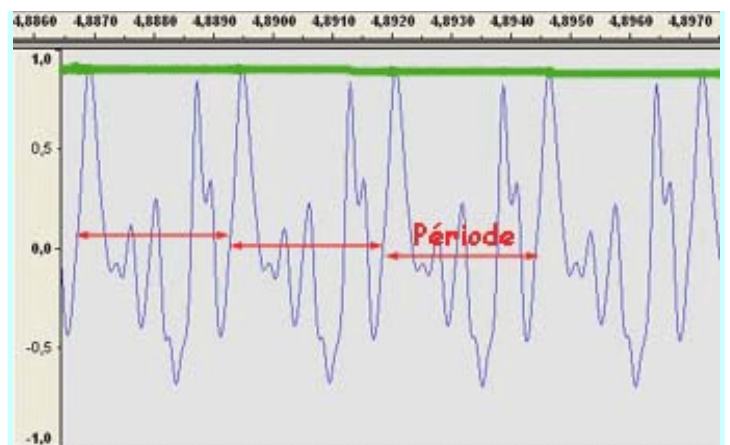


Fig. 6.5. Courbe de variation de la pression sonore. C'est la même que celle de la figure 6.4 agrandie à l'échelle des millièmes de seconde. Elle montre la répétition périodique de l'onde sonore. La ligne verte supérieure donne le volume.

Tandis que l'échelle de la figure 6.4 nous montre les secondes, la figure 6.5 a été dilatée jusqu'à montrer les millièmes de secondes. On peut alors nettement distinguer les variations de la pression de part et d'autre du zéro (échelle verticale de gauche).

On constate que les variations se répètent de façon quasiment identique sur une période de temps identique. C'est la **période** répétitive ou cycle. **C'est cette répétition cyclique qui est responsable de la perception de hauteur.** La fréquence est le nombre d'occurrences de cette période en une seconde. Dans l'exemple ci-dessous, la période est d'environ  $2/1000^e$  de seconde, soit une fréquence proche de 500 Hz. Précisément, c'est un LA3 de 440 Hz.

### Retour sur le volume

Après avoir dilaté la courbe avec ce détail, le volume du son y est beaucoup moins visible. On a vu qu'il se montre dans les positions extrêmes de l'amplitude. Il ne se "soucie" pas des variations à l'intérieur d'une période. Le volume est donc figuré par la ligne de crête que j'ai figurée en vert.

### Timbre

Nous savons par le chapitre précédent que le timbre est dû aux harmoniques qui se superposent au son fondamental et à leur évolution dans le temps. Reste à trouver où elles se logent dans la courbe. **On va trouver le timbre à l'intérieur d'une période**, c'est-à-dire dans l'espace délimité par un des traits rouges de la figure 6.5. Puisque la répétition de ce motif donne la fréquence, **c'est le profil particulier d'une période qui est caractéristique du timbre.** En effet lorsqu'un son est réduit à sa composante fondamentale, l'harmonique 1, le profil est alors celui d'une courbe sinusoïdale (figure 6.6). Le son est dit "pur" (selon la conception de pureté du physicien, c'est-à-dire exempt d'harmoniques).

Comme les mots "**sinusoïdal**" ou "**sinus**" sont employés quelquefois à tort et à travers, je précise son sens. Le mot "sinus" vient du latin et veut dire un "pli". Il a d'ailleurs donné le mot "sein" (qui veut dire pudiquement un pli dans le vêtement!). Mathématiquement, c'est un pli régulier et symétrique tel que celui montré sur la figure 6.6, qui peut seulement être étiré en largeur (ou comprimé en hauteur), et dont la véritable définition mathématique repose sur les propriétés géométriques du cercle.

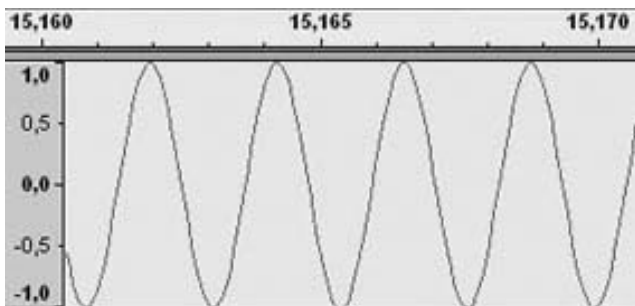


Fig. 6.6. Son pur sinusoïdal

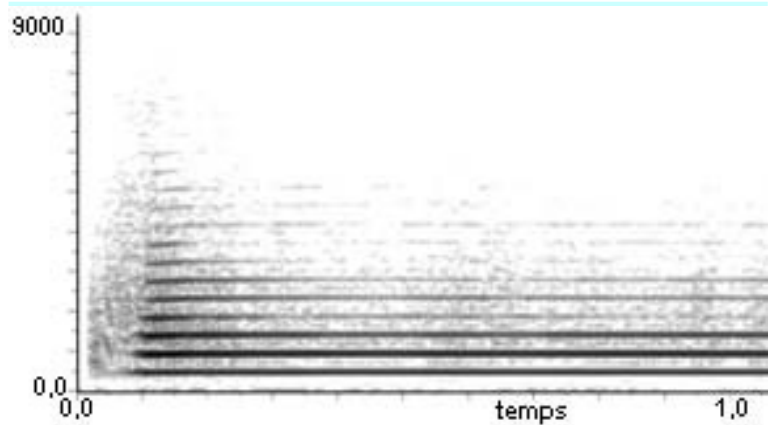
Il est possible de produire artificiellement des sons purs avec des générateurs de sons électroniques. L'illustration sonore sur les **harmoniques** en est un échantillon. Pour l'oreille, ce son paraît plat. Cela ne veut pas dire qu'il n'ait pas de valeur, mais l'émotion qui s'en dégage exprimera plus un aspect

mécanique que la chaleur d'une voix.

Le profil d'une note telle que celle de la figure 6.5 est dû à la superposition des courbes sinusoïdales de chacune de ses harmoniques. Par définition, leurs fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale, ce qui signifie que la période des oscillations de la deuxième harmonique est 2 fois plus courte, puis pour les suivantes 3, 4, 5, etc.. plus courtes.

Pour déterminer quelles sont les **harmoniques** qui sont présentes dans un son donné tel que celui de la figure 6.5, on décompose son profil. La façon la plus artisanale de le faire (et la seule possible avant l'ère de l'électronique) fait appel à des résonateurs physiques qui se mettent en résonances ou non lorsqu'on produit la note. Cela ressemble à l'exercice de résonance des cordes de piano vu dans le chapitre précédent sur le timbre.

Or il se trouve qu'une transformation mathématique de la courbe de l'onde peut nous donner le résultat: *c'est la transformée de Fourier*. L'ordinateur la calcule très vite et l'affiche sous forme du **sonagramme**. Dans un sonagramme (fig. 6.7), on voit le **temps** se dérouler le long de l'axe horizontal. L'axe vertical montre les **fréquences** étagées des multiples harmoniques, espacées de façon régulière, car leurs fréquences sont multiples de la fréquence de base. Enfin la **puissance** du son est indiquée par l'intensité du gris des traits.



*Fig. 6.7. Exemple de sonagramme*

### Perception du temps

On a donc trouvé, dans la variation de la pression en fonction du temps, les 3 caractéristiques du son: sa hauteur, son volume et son timbre. Mais alors, comment se fait-il qu'il puisse y en avoir trois, alors qu'il n'y a que 2 variables, la pression et le temps? Comment avons-nous fait? Où s'est produit la distinction?

Tout simplement parce que la hauteur et le timbre sont deux expressions différentes de la variation de pression, les variations responsables du timbre étant contenues dans une période, la hauteur étant produite par sa répétition. C'est donc bien notre perception sonore qui nous a conduit à distinguer les deux, car qui aurait eu l'idée de décomposer en deux variables une banale courbe de pression telle que la figure 6.5, si ce n'est pour rendre compte de notre perception? Oreille et cerveau combinés sont de puissants analyseurs.

Mai 2006

# Chapitre 7

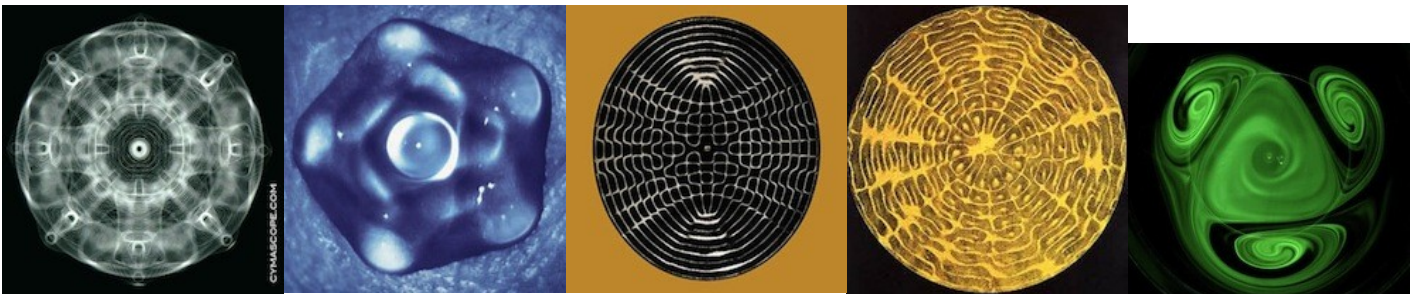
## Les sons créateurs de formes :

### Ont-ils participé à la formation de l'univers?

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

Les sons peuvent-ils se manifester par des formes? Compte tenu de leur immatérialité, cela ne semble guère possible. Ils se propagent partout dans l'espace de façon invisible. Toutefois, si on leur prête un peu plus attention, on remarque qu'un son possède une structure qui se déroule dans le temps. Il a un début, un rythme et une fin et nous pourrions parfois dessiner cette forme qui se déploie dans l'espace. Il semble naturel que **des structures rythmiques inscrites dans le temps puissent avoir des correspondances avec des structures géométriques inscrites dans l'espace**. Nous allons explorer comment s'effectue cette correspondance et dans quelles conditions.

Commençons en contemplant ces quelques images.



La première image représente un film d'eau déposé sur une membrane ronde en latex soumise à une vibration de 19 Hertz, éclairé par une lampe installée au-dessus. On voit en blanc les reflets de l'éclairage (Photo Erik Larson)

La deuxième image représente une grosse goutte d'eau déposée sur une surface plate soumise à une vibration de quelques dizaines de Hertz, éclairée par une lampe installée au-dessus. (Photo Alexander Lauterwasser, Images sonores d'eau)

La troisième image représente une plaque ovale en acier, de longueur 23 cm, sur laquelle on a déposé du sable fin et qui vibre à 12'301 Hertz. On voit en blanc la figure dessinée par le sable (Photo Alexander Lauterwasser, Images sonores d'eau)

La quatrième image représente une plaque ronde en acier, de 32 cm de diamètre, sur laquelle on a déposé du sable fin et qui vibre à 8200 Hertz. (Photo Hans Jenny, Cymatics)

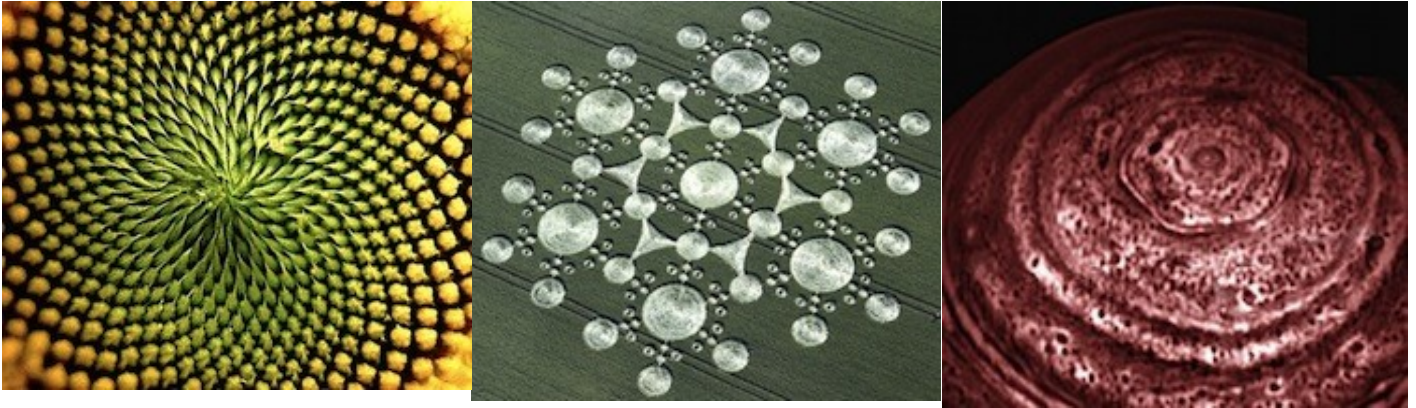
Les vibrations qui animent ces plaques et membranes (10 à 13'000 Hz) correspondent à des fréquences audibles. Pendant l'expérience, on entend le son correspondant à la vibration du

support.

La cinquième image représente de l'eau entraînée à grande vitesse dans un récipient circulaire, à laquelle on a ajouté un colorant fluorescent. (Photo Peter Rhine)

Toutes ces images ont en commun de montrer **de merveilleuses figures géométriques**. Elles ne se produisent que dans certaines conditions précises. **Comment ont-elles été créées?** Nous allons exposer cela en détail.

Contemplant maintenant cet autre lot d'images.



La première montre le cœur d'une fleur de tournesol. (Photo Département d'Ethnologie de l'Université de La Réunion)

La deuxième montre un diagramme imprimé dans un champ de blé, d'une taille d'environ 60 m. L'apparition de telles figures appelées aussi *crop circles* est un phénomène surprenant et prolifique, visible chaque année en Angleterre et dans le monde depuis des dizaines d'années. (Photo ©John Montgomery, Crop Circle Connector)

Enfin la troisième représente la photographie en rayons infrarouges du pôle nord de la planète Saturne. (Photo NASA / JPL / U. Arizonay)

Ces images sont donc à 3 échelles complètement différentes. Leurs formes sont construites sur des lois géométriques précises qui ont de grandes similitudes avec les figures sonores et vibratoires montrées plus haut. Est-ce seulement un hasard? Ou bien **les similitudes de formes nous indiquent-elles une similitude de causes?** Nous nous aventurerons un peu plus dans ce questionnement.

## Les formes résonnantes des plaques vibrantes

Tout d'abord, aventurons-nous dans le monde des plaques qui vibrent.

Si nous frappons une **plaque métallique mince**, posée de telle sorte qu'elle ne soit pas amortie par un contact, elle se met à vibrer pendant un moment. Généralement cela produit un son qui est soit un bruit soit quelque chose de plus musical, une note continue. Puis la vibration s'atténue et s'arrête.

Il existe un procédé facile à mettre en œuvre pour VOIR les vibrations de la plaque. Il consiste à **saupoudrer la plaque avec une poudre fine**: sable, sel ou semoule, par exemple.

Il y a différentes façons de **faire vibrer la plaque**. Lui donner un choc ne suffit pas car la vibration s'éteint rapidement. Il faut que **la vibration soit entretenue** pour que les grains de poudre aient le temps de se déplacer et de s'organiser. Une méthode simple est de placer la plaque au-dessus d'un **haut-parleur**, dont on peut faire varier à volonté la hauteur du son émis. On peut aussi utiliser un **vibreux électromagnétique**, sorte de haut-parleur sans membrane,

alimenté par un générateur électronique de courant (*voir le fonctionnement d'un haut-parleur dans le chapitre précédent*).



Merci à Wikimedia - Pieter\_Kuiper

Sous l'effet des secousses transmises par le son, les grains se déplacent comme lorsqu'on secoue légèrement un tapis. Ils se rassemblent dans les endroits les plus calmes et y forment des lignes.

**Pour certaines fréquences précises, les lignes** divisent la plaque en cellules souvent symétriques et **dessinent des figures géométriques impressionnantes**.

Nous allons explorer ces figures de plus près. Pour cela, nous profiterons des observations des pionniers, Chladni, Waller, Jenny, Lauterwasser. Ils les ont mis en évidence, en ont été émerveillés et passionnés.

## Les découvreurs des formes sonores

Historiquement, le premier à mettre en évidence les formes vibrantes des plaques a été un physicien allemand, **Ernst Chladni** (prononcez *kladni*, 1756 - 1827). **Chladni** est le fondateur de l'acoustique moderne. Il a publié ses études dans son *Traité d'acoustique* (1802).

Sa façon d'opérer était un peu différente de ce qu'on vient d'exposer puisqu'il ne disposait pas de haut-parleurs. Il prenait une plaque de verre ou de cuivre, de forme carrée ou autre, fixée sur un axe en son centre. Après l'avoir saupoudrée de sable, il la stimulait **en frottant le bord de la plaque avec un archet de violon**. En faisant varier la force de frottement, sa vitesse et son point d'application, il a obtenu de nombreuses figures variées.

Plus tard, **Mary Desiree Waller** (décédée en 1959), professeur de physique à l'École de médecine du Free Hospital de Londres, s'est prise de passion pour le travail de Chladni. Elle a étudié toutes ses figures avec une rigueur scientifique en les analysant par les mathématiques. Elle a aussi utilisé de nouvelles méthodes d'excitation de la plaque. Elle a publié ses études dans son livre *Chladni Figures, a Study in Symmetry* (1961).



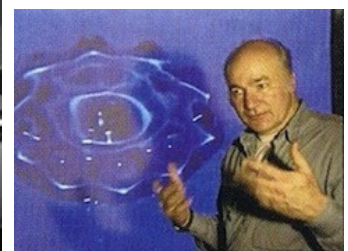
E. Chladni en démonstration



Mary Desiree Waller  
Merci à Cymascope



Hans Jenny  
Merci à H. Jenny,  
Cymatics



Alexander Lauterwasser

Un peu après, **Hans Jenny** (1904 - 1972) reprend lui aussi ces expériences et explore d'autres champs avec des conditions techniques améliorées. Il était à la fois médecin, artiste peintre, musicien et s'inspirait des visions philosophiques de Goethe et de Rudolf Steiner. En 1967, il donne un nom à cette étude: la **cymatique**, qu'il définit comme la manière dont les vibrations génèrent et influencent les dessins sur des supports vibrants. Il a publié un livre en anglais et en allemand: *Cymatics*.

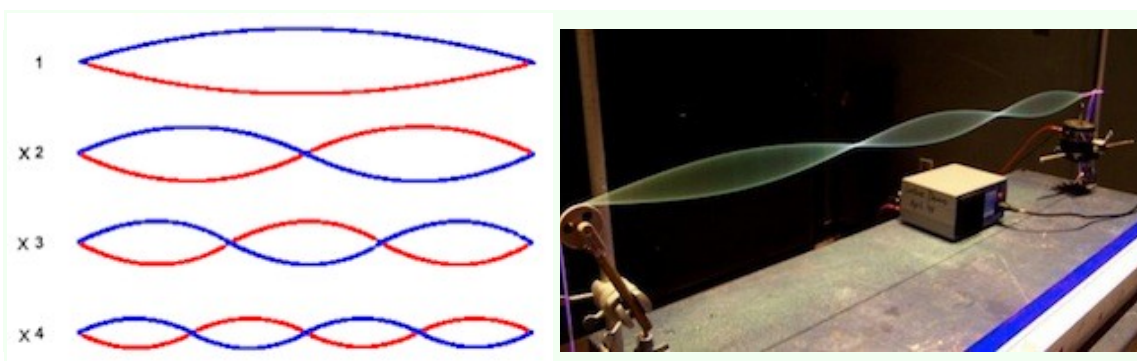
Pour mettre les plaques métalliques et les membranes en vibration, Jenny emploie un cristal piézoélectrique qui vibre en contact avec le support. Un **cristal piézoélectrique** est un cristal tel que le quartz (*voir mon article web [Géométrie cristalline](#)*) qui se déforme lorsqu'il est soumis à une tension électrique. Grâce à ce système, Jenny peut à volonté faire varier la fréquence de la vibration, sa force (ou amplitude) et la durée de son application. Il peut aussi choisir précisément l'endroit où il place le cristal sur la face inférieure de la plaque: au centre, à la périphérie ou ailleurs. Il expérimente les figures obtenues avec divers types de poudre (sable, spores, limaille de fer). Il innove en testant aussi des liquides (eau et substances visqueuses). Ses études sont poussées par son émerveillement pour les forces et les formes de la nature. Il est frappé par leur ressemblance avec des figures cymatiques, de la biologie à l'astrophysique.

**Alexander Lauterwasser** (né en 1951) est lui-aussi un chercheur philosophe amoureux du son et des formes, psychologue de formation et habile expérimentateur. Il a publié un livre traduit en français: *Images sonores d'eau*. Il reprend les observations de Chladni et de Jenny, avec méthode et passion, et en élargit les conditions expérimentales. Il utilise un nouveau vibreur électromagnétique adapté à ses supports. Ses interrogations portent principalement sur l'eau et sur la genèse des formes biologiques (*morphogenèse*).

## Formes de résonance d'une corde en vibration

Pour mieux comprendre ce qui se passe quand une plaque se met à vibrer, faisons l'expérience avec un objet plus simple, une **corde**. Plus simple parce qu'une plaque vibre à la fois dans sa longueur et sa largeur (en 2 dimensions) alors qu'une corde ne vibre qu'en longueur (une seule dimension). De plus la vibration de la plaque rigide est très petite et difficilement visible à l'œil nu alors que celle de la corde est bien visible.

Observons donc une **corde sur une guitare** que l'on excite en la poussant ou pinçant. Elle émet une note. Pendant que le son est émis, nous la voyons effectuer des mouvements rapides de haut en bas. Ils sont si rapides que notre œil ne peut pas les suivre et que nous voyons un fuseau. En réalité, la corde passe alternativement d'une position (représentée en bleue sur la figure ci-dessous) à une autre (représentée en rouge). La forme globale de fuseau provient de l'impression durable que produit l'image sur notre rétine.



*Formes créées à différentes fréquences de résonance. Les fréquences sont en rapport simple. 2 fois plus grande pour faire 3 fuseaux.*

*Onde stationnaire de 3 fuseaux sur une corde tendue entre 2 supports. Le support de droite est agité par un moteur. Corde d'1,5 m, enduite de craie fluorescente.  
Merci à Harvard Natural Sciences*

Afin d'observer ces fuseaux plus aisément, nous transposons cette expérience sur une **corde tendue entre deux supports**. L'un des supports est **agité verticalement** par un moteur (comme une main qui agite une corde à sauter, sauf que l'agitation reste dans le plan vertical, on ne fait pas tourner). Cette agitation est **entretenue**. On peut choisir la vitesse d'agitation et sa force (son amplitude).

Plus on agite vite, plus on fait d'allers et retours par minute ou par seconde. Le nombre d'**allers - retours par seconde** s'appelle la **fréquence**. Elle est exprimée en **Hertz** (abréviation Hz).

Ici, on ne s'occupe pas de savoir si la vibration produit ou non un son comme une corde de guitare. On peut toutefois dire qu'elle sera peut-être audible si sa valeur est située parmi les fréquences audibles.

Commençons par agiter la corde lentement et augmentons la vitesse progressivement. Pour une certaine fréquence qui reste faible (15 Hz dans le cas du montage expérimental de la figure), et uniquement pour cette fréquence, nous obtenons un seul fuseau. Même si le fuseau reste globalement à la même position, la corde n'a rien d'immobile. Mais le mouvement a lieu sur place. On dit qu'il est **stationnaire**.

Si nous augmentons la fréquence, nous perdons cette forme stationnaire et l'agitation devient chaotique. Continuons à augmenter la fréquence. Brusquement, une deuxième forme stationnaire prend place avec 2 fuseaux, puis une autre avec 3, etc.

Les fuseaux ont une position fixe sur la corde, car les points entre deux fuseaux, appelé **nœuds** par les physiciens, sont quasi-immobiles. On pourrait y déposer une fourmi sans qu'elle soit trop dérangée. Par contre entre ces nœuds, la corde oscille de haut en bas et de bas en haut. En plein centre d'un fuseau, c'est l'agitation maximum, c'est un **ventre**. Plus forte est l'agitation, plus grande est l'amplitude du ventre.

**Les valeurs des fréquences qui créent les fuseaux sont spéciales. Pour ces fréquences, la corde est entrée en résonance avec l'agitation entretenue.** (voir en *annexe* ce qu'est une *résonance*)

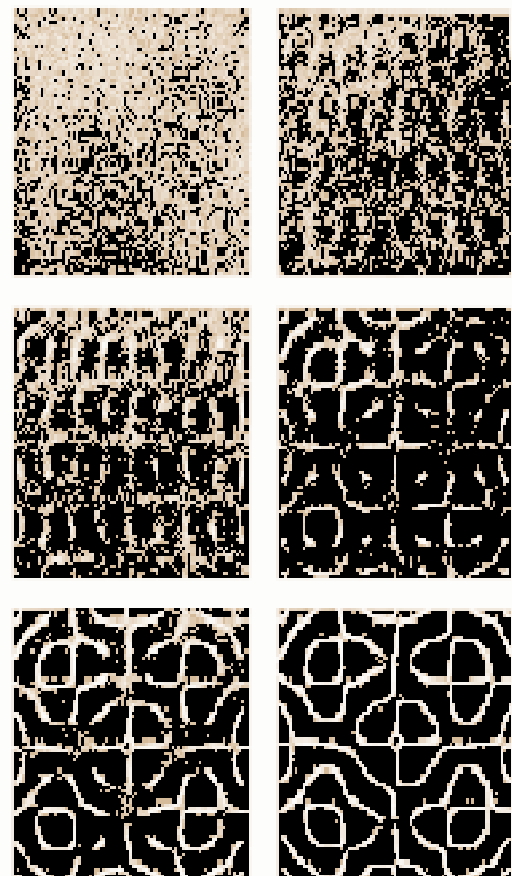
Repérons la valeur de la fréquence qui produit un seul fuseau (par exemple ici 15 Hz). Celle qui produit 2 fuseaux est le double (15x2), celle qui produit 3 fuseaux est le triple, etc. Ces fréquences **sont toutes multiples les unes des autres**. On les appelle des **fréquences harmoniques** (voir le *chapitre 5*).

En conclusion, **la mise en vibration mécanique de la corde crée des formes stationnaires dans l'espace, qui ont lieu seulement à certaines fréquences spécifiques, en résonance avec la corde. La valeur de ces fréquences est liée à la fois à la matière de la corde et à sa longueur.**

## Les figures acoustiques de Chladni

Revenons maintenant aux plaques métalliques et à leurs figures acoustiques.

Observons d'abord comment se forme une figure acoustique. Prenons une plaque carrée que nous saupoudrons de sable fin. Quand nous mettons le vibreur en route, **la poudre se met à bouger, s'écoule, se rassemble peu à peu à certains endroits**. Augmentons lentement la fréquence. La poudre bouge encore, des courants apparaissent, elle s'organise. Puis, **pour une fréquence**



*Sous l'action de la vibration d'un cristal sur une plaque (7560 Hz), le sable bouge et se met en place peu à peu (de haut en bas sur la figure) jusqu'à former une figure stationnaire. Plaque d'acier de 31x31 cm © Cymatics, H. Jenny*



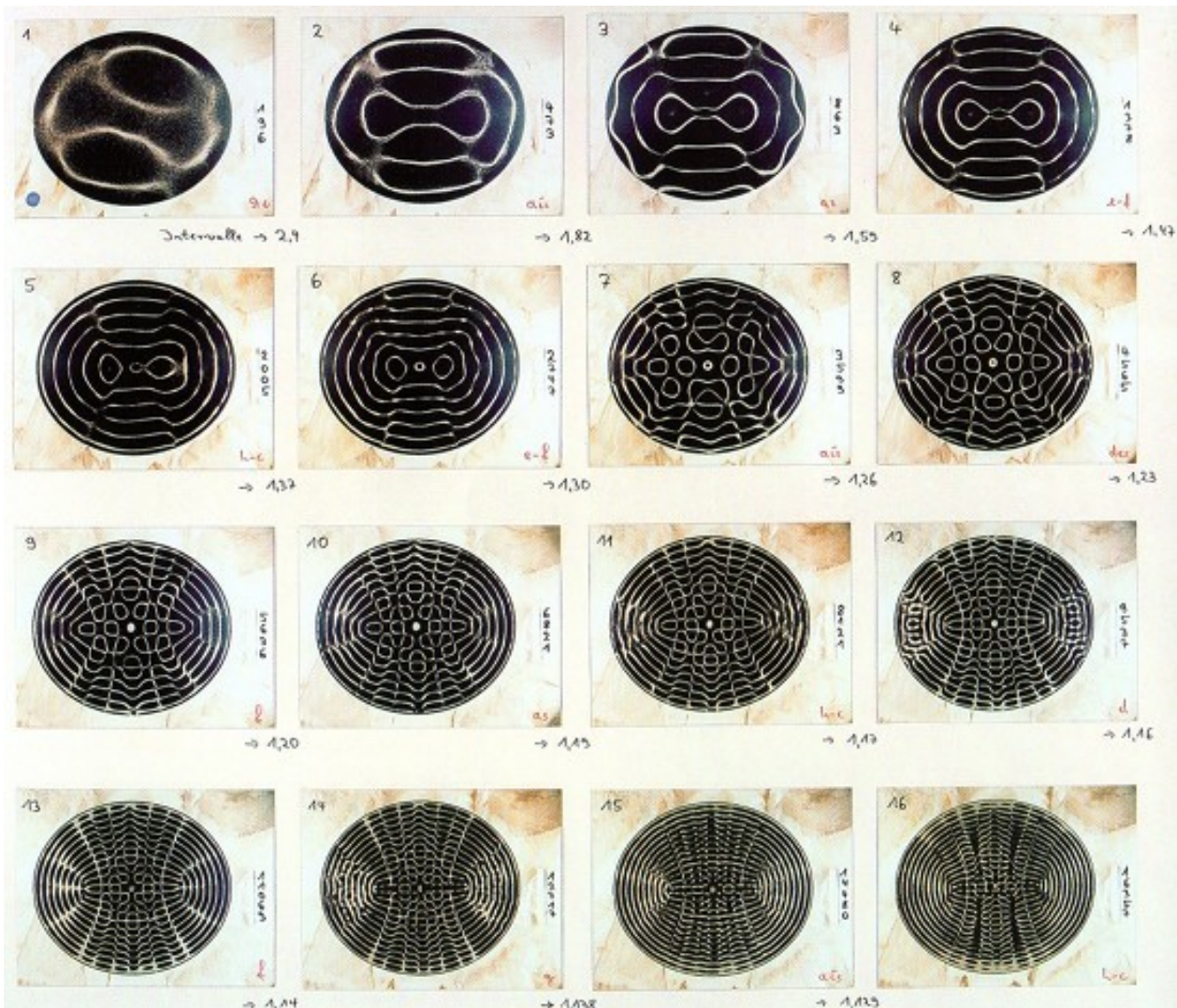
**particulière, une figure géométrique se forme nettement.** Restons à cette fréquence pour la contempler.

Les lignes où le sable se rassemble sont des zones calmes, l'équivalent des nœuds de la corde. Ce sont les **lignes nodales**. Ailleurs, la plaque oscille verticalement. La formation de ces figures est l'indication que des **ondes stationnaires** se sont établies dans la plaque (*voir en annexe*).

Les figures acoustiques obtenues sont extrêmement variées. Nous allons examiner comment elles dépendent des conditions de l'expérience: fréquence de la vibration et forme des plaques. Elles sont reproductibles lorsqu'on utilise le même appareillage dans les mêmes conditions.

### Suite de fréquences résonnantes

Si nous augmentons progressivement la fréquence de vibration, plusieurs figures géométriques apparaissent successivement et soudainement. Ces figures sont toutes différentes. Toutefois, on y retrouve souvent un même motif de base.



*Figures acoustiques apparaissant pour des fréquences croissantes, de gauche à droite et de haut en bas. Le chiffre inscrit verticalement à droite de chaque figure donne la fréquence en Hz, de 196 à 16357. Le chiffre inscrit en-dessous à droite indique le rapport entre 2 fréquences successives.*

*Photos © A. Lauterwasser, Images sonores d'eau*

**Les figures géométriques n'apparaissent que pour certaines valeurs précises des fréquences de vibration.** Ces valeurs sont spécifiques du montage expérimental, donc en particulier de la plaque-support choisie.

Les fréquences graves produisent des figures simples. Plus la fréquence est élevée, plus le nombre d'éléments qui composent la figure est grand. Ces éléments sont donc de plus en plus petits. Les lignes sont de plus en plus rapprochées et de plus en plus fines.

Contrairement au cas de la corde tendue, les **fréquences de résonance** de la plaque ne sont pas multiples d'une fréquence fondamentale et on ne peut pas les qualifier d'harmoniques au sens mathématique du terme. Les modes vibratoires d'une surface sont plus complexes que ceux d'un fil.

### Forme et nature de la plaque

**Les figures de résonance changent spectaculairement si les réalise sur des plaques de formes différentes.** Chladni et ses successeurs ont testé des plaques carrées, rectangulaires, triangulaires, circulaires, ovales. L'épaisseur de la plaque intervient également. On obtient une très grande variété de figures.



*Figures acoustiques pour des plaques de formes différentes.  
De gauche à droite, fréquences voisines de 2150, 2515, 1079, 1600 Hz.  
Photos © A. Lauterwasser, Images sonores d'eau*

Dans une figure de résonance, on peut généralement distinguer **deux ensembles de lignes nodales**. Les unes rayonnent à partir du centre (lignes radiales). Les autres suivent plus ou moins la forme extérieure, du moins à la périphérie. Les différences d'une plaque à l'autre ont lieu principalement à la périphérie. Le motif central est moins influencé et semble être une forme fondamentale liée à la fréquence.

La taille de la plaque a également une influence. Des expériences ont été rapportées avec des plaques de quelques centimètres à plus de 50 cm.

Les figures dépendent aussi de **l'endroit où est fixé le vibreur** sur la plaque (le plus souvent au centre, à un coin, ou n'importe où). Si la plaque est posée sur un support fixe, comme dans les expériences de Chladni, elle est excitée à un autre endroit par l'archet et l'emplacement de cet endroit a une influence. On peut aussi immobiliser certains endroits du bord de la plaque en y posant le doigt.

Si l'on procède avec des **plaques faites dans des matières différentes**, les valeurs des fréquences auxquelles les résonances se produisent sont modifiées, mais les figures restent assez semblables. Des expériences ont eu lieu avec du cuivre, de l'acier, du verre, du bois, du carton, de la terre cuite, du PVC. Si des **inhomogénéités** de matière sont présentes dans la plaque, elles déforment localement la structure géométrique.

Cette possibilité d'agir sur tous ces paramètres expérimentaux fournit une variété inépuisable de figures.

**Note:** J'attire l'attention sur le fait que nous nous sommes intéressés aux formes de deux façons différentes. Il y a d'abord la forme que possède la plaque **au repos** (ronde, carrée, ovale, etc.) ou la corde au repos (une ligne droite). **Tout objet possède sa forme propre**, tel qu'il est construit. Lorsque l'objet est mis en mouvement, **il vibre, oscille, ondule et passe par un ensemble de formes modifiées**. Lorsque la vibration est stationnaire, cela crée une autre **forme oscillante globale** (les fuseaux de la corde, les figures de Chladni). Il est important de ne pas les confondre. La forme stationnaire dépend de la forme au repos, et aussi de sa fréquence d'excitation et des autres paramètres cités ci-dessus.

## La voix humaine et le tonoscope



À gauche, un type de tonoscope  
Merci à [Gunesin tam icinde](#)

À droite, une figure obtenue avec la voyelle **A**.  
Photo © Cymatics, H. Jenny

Si au lieu d'une plaque, on choisit un support flexible tel qu'un **film plastique**, une membrane, il est **beaucoup plus sensible** aux sollicitations mécaniques. Un simple mouvement de l'air tel qu'un son peut le faire bouger. Il peut donc réagir au son d'un haut-parleur ou directement au son de la voix humaine.

C'est sur ce principe que Jenny a inventé un petit appareil très simple, sans aucune électronique, le **tonoscope**. La membrane plastique est fixée sur l'ouverture d'un vase creux. On y dépose de la poudre. L'utilisateur émet des sons ou des chants par le canal qui débouche dans le vase.

Lorsqu'on émet un son continu de type voyelle, **se forme l'image physique de la vibration**

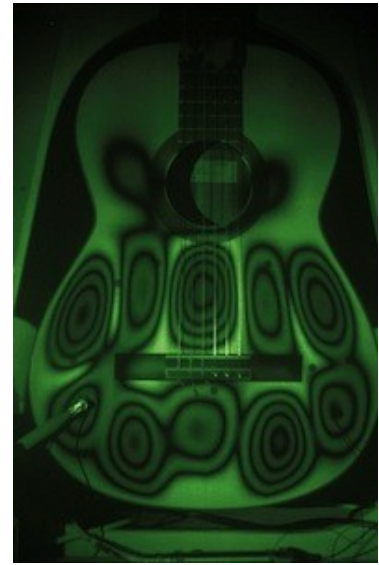
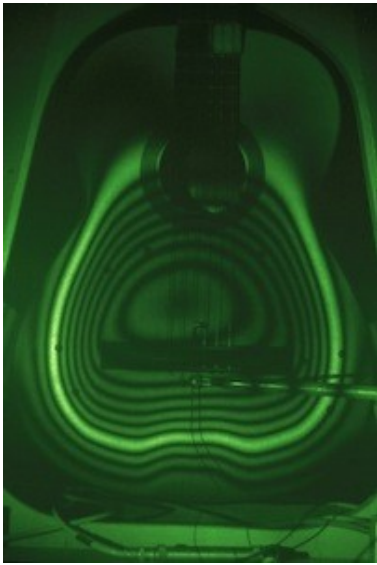
**de cette voyelle**. Il est intéressant de faire varier la hauteur du son pour chercher les meilleures résonances. Les formes obtenues, je le rappelle, dépendent non seulement du son émis mais aussi des caractéristiques de la membrane elle-même.

Si l'on chante lentement une mélodie, on voit la figure acoustique se modifier et suivre la mélodie. On peut ainsi "voir" toute une mélodie, tout en l'écouter. Jenny a proposé que ce dispositif serve d'aide dans l'éducation sonore des mal-entendants.

## Formes résonnantes d'une guitare

La méthode consistant à saupoudrer une plaque ou une membrane pour en visualiser les formes vibrantes peut être appliquée aux instruments de musique à cordes. Sous l'effet de la vibration de la corde, la caisse de résonance d'une guitare ou d'un violon se met à vibrer dans son ensemble. Avec du sable sur des plaques de bois découpées en forme de table d'harmonie (la plaque de dessus) d'une guitare ou d'un violon, on a obtenu des figures qui sont bien différentes selon les fréquences de résonance (*voir des exemples dans le site de [Joe Wolfe](#)*). La visualisation des vibrations stationnaires fournit des renseignements précieux au fabricant (le luthier) car la qualité du son de l'instrument dépend de ces modes de vibration.

Les techniques électroniques actuelles mettent à notre disposition des appareils plus élaborés qui permettent de **visualiser ces formes directement sur l'instrument** sans ajouter de poudre. Ils détectent des amplitudes d'oscillations aussi petites que quelques micromètres. L'instrument est éclairé par un rayon laser qui est réfléchi et on photographie la différence entre l'image de l'instrument au repos et de l'instrument en vibration. C'est la technique appelée **interférométrie**.



*Modes vibratoires d'une table d'harmonie de guitare pour 3 fréquences de valeurs croissantes de gauche à droite. La vibration est provoquée, non pas par la corde, mais par un vibreur posé directement sur le bois (le bâton au bout blanc). Les parties claires correspondent aux zones au repos et les parties sombres aux zones en mouvement. Visualisation par interférométrie holographique: interférence de 2 images (guitare au repos, et en vibration) dont chacune est un hologramme. On obtient un hologramme en illuminant l'objet avec un rayon laser qui suit deux chemins différents et se recombine sur la plaque d'exposition photographique.  
Photos © B. Richardson, Université de Cardiff, Royaume Uni. Merci à BBC News, mai 2011*

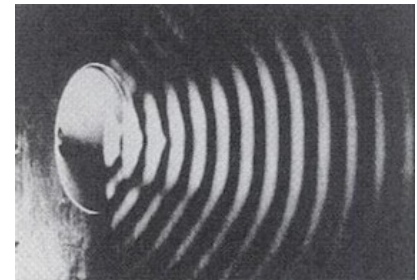
L'illustration montre comment vibre une table de guitare. Les zones claires sont les zones de repos, les lignes nodales. Elles dessinent des figures qui sont en rapport avec les contours extérieurs de la table au repos. On remarque que plus la fréquence est élevée, plus **la vibration se segmente en cellules**, d'abord 2, puis 4 ou 10, de plus en plus petites.

## Formes vibratoires dans l'air

Nous entendons les sons parce qu'ils se propagent dans l'air jusqu'à nos oreilles. L'air vibre et la vibration voyage (*voir en annexe Ondes voyageuses*). Peut-il exister aussi des ondes stationnaires, des structures géométriques inscrites dans l'air?

Une onde stationnaire est possible si elle est contenue dans une forme au repos (*voir en annexe Ondes stationnaires*). Dans l'air, il peut y avoir une ou des ondes stationnaires dans un volume fermé, tel qu'une boîte ou une salle. On peut les mettre en évidence dans une petite boîte ou un tube dont les parois sont disposées à une distance contrôlée.

### Le tube de Kundt



*Reproduction de l'expérience du tube de Kundt. Poudre de microbilles de polystyrène mise en mouvement par un générateur de fréquences. Merci à l'Université du Michigan*

*Photographie des figures d'ondes sonores dans l'air selon le dispositif de Kock. W.E. Kock and F. K. Harvey. Bell System Technical Journal, vol. 30, 1951, p.564-587*

L'expérience a été effectuée dans un tube transparent par le physicien allemand **August Kundt** (1839 - 1894). Le tube est rempli d'une fine poussière de talc. Pour faire l'expérience actuellement, on peut aussi y mettre de la mousse de polystyrène ou de la poudre de liège. À l'une des extrémités du tube, on place un haut-parleur qui émet un son continu dont on peut choisir la hauteur (la fréquence) et le volume. N'ayant pas de haut-parleur, Kundt agissait sur la longueur du tube qu'il modifiait avec un piston.

Lorsque la longueur du tube et la fréquence du son sont en résonance, la poudre se déplace et s'accumule aux noeuds. Les molécules d'air qui dansent qui sont calmes aux nœuds et remuantes aux ventres, alternant surpressions et dépressions. **La structure stationnaire de l'air devient visible.**

### Le microphone lumineux de Winston Kock

Comment rendre visible les structures de l'air qui se mettent en place devant un haut-parleur? Au moyen d'un **microphone**, qui capte la pression de l'air et ses variations là où il est placé, et les transforme en courant électrique. Habituellement, ce courant est envoyé dans un amplificateur puis dans des hauts-parleurs. On peut aussi le numériser et l'enregistrer dans un ordinateur.

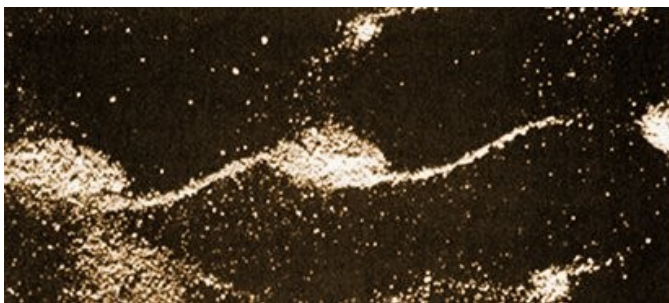
**Winston Kock** ne disposait pas d'ordinateur ni de traitement numérique. C'était un ingénieur du Centre de Recherche électronique de la NASA aux USA (1909–1982), musicien et auteur d'un livre sur l'acoustique (*Seeing sound*, Wiley-Interscience, 1971). Il a imaginé un dispositif qui transforme le courant du micro en lumière.

Le courant du micro alimente une petite lampe fixée sur le micro. **La luminosité de la lampe varie en fonction de la pression de l'air, donc du son capté: éteinte pour les sons faibles, pleinement brillante pour les sons forts.** Sur une table, le micro est fixé à un bras mécanisé qui balaye lentement l'espace du champ sonore devant le haut-parleur. Afin d'enregistrer le champ sonore complet sur une plaque photographique, le dispositif est installé dans une pièce noire et le temps de pose dure tout le temps de balayage soit environ 10 mn.

### Rivières de sable

Jusqu'à maintenant, nous avons concentré notre attention sur la géométrie des figures stationnaires qui se forment aux résonances, donc sur leur aspect statique. Or, dans les plaques, si les lignes nodales sont à peu près calmes, les autres parties subissent des oscillations intenses qui bousculent la poudre. Examinons ce mouvement plus attentivement.

Les grains de poudre ne sont pas seulement entraînés dans un mouvement vertical, mais poussés également latéralement. Dans les images de Jenny, les grains de sable ou de lycopodium sont propulsés un peu comme s'ils se trouvaient sur une trampoline. Dans certaines lignes nodales, de véritables courants de sable se mettent en marche.



*Petit tas de sable entraîné dans un mouvement de rotation, alimenté par deux bras opposés.  
© Cymatics, H. Jenny*



*Poudre de lycopodium propulsée en l'air  
© Cymatics, H. Jenny*

Ailleurs, se forment des tas isolés associés par paires, qui tournent sur eux-mêmes. Dans ce cas, les 2 tas tournent dans des sens opposés. Parfois, on voit le sable couler vers le tas sous forme de deux bras opposés.

Lorsqu'on sort des conditions de résonance des figures stationnaires, le sable se déplace fortement. D'autres types de mouvements plus intenses se déclenchent selon l'intensité de la vibration. Des formes se séparent, d'autres se rejoignent. Parfois, les mouvements sont plus turbulents et les particules sont projetées, comme par une mini-tornade. Le lycopodium se comporte différemment du sable. Si on augmente suffisamment l'intensité, il se met à sauter en l'air. (Pour une meilleure illustration, voir le film de Jenny n°1, à 3mn 40s.)

## Formes mouvantes des liquides visqueux

Jenny a été le premier à expérimenter l'effet des plaques vibrantes sur une variété de **liquides visqueux** et de pâtes, tels que eau glycinée et pâte de kaolin (une variété d'argile blanche). Il les déposait sur une membrane plastique qui imprime à la matière plus de mobilité qu'une plaque métallique. C'est réellement une trampoline. Il a découvert un monde de formes en perpétuelle transformation, bien différentes de celles obtenues avec le sable. Parfois, elles ressemblent étrangement à des formes d'organismes vivants.

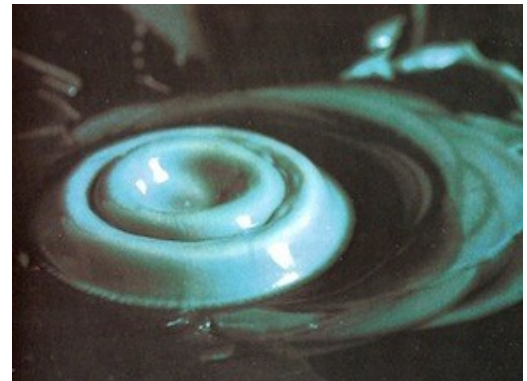
La matière visqueuse s'écoule en courants animés. Les lignes nodales de la membrane ne sont pas des lieux calmes pour le liquide, mais des pistes de courants turbulents. Les paysages composés par le liquide sont sans cesse en transformation. On y repère des tourbillons ou vortex. Lorsque la vibration est suffisamment forte et que le processus est bien établi, plusieurs tourbillons se déploient par paires, dans lesquelles les deux tourbillons tournent en sens inverse. Ils tournent d'autant plus vite que la vibration est forte.



*Liquide visqueux  
Membrane de 28 cm, 100 Hz  
© Cymatics, Hans Jenny*



*Liquide visqueux  
© Cymatics, Hans Jenny*



*Forme de disque dans un liquide très visqueux. En surface du disque, il se déplace radialement du centre vers la périphérie et il revient vers le centre par le dessous  
© Cymatics, Hans Jenny*

Les paysages se développent aussi dans la dimension verticale. À certains endroits, des collines et des vallées se forment, des vagues se propagent, des fronts avancent comme des coulées de lave. Pour de fortes amplitudes, des jets fusent, des pics s'élèvent et retombent. Parfois, dans les liquides très visqueux, naissent des figures ordonnées. Bien que la photo laisse penser qu'elles sont statiques, le film montre que la matière se déplace radialement en surface du centre vers la périphérie et revient vers le centre par le dessous.

Pourquoi les formes qui apparaissent avec les liquides visqueux sont-elles différentes des figures de Chladni? Parce que le liquide n'épouse pas la forme vibrante de la membrane. Il est propulsé en

permanence et adopte ses propres formes. Le transfert du mouvement entre la membrane et le liquide est beaucoup plus lâche que le transfert de la plaque métallique au sable.

## Films d'eau

Lauterwasser a apporté une contribution remarquable dans l'étude et la contemplation des formes créées au sein de l'eau par les vibrations sonores. Il prend une coupelle de plusieurs centimètres de diamètre, la remplit d'eau sur une épaisseur de quelques millimètres, et la pose avec minutie sur un vibreur électromagnétique. L'eau se met en mouvement. Des courants, des crêtes, des creux, des tourbillons naissent et forment des structures.

Mais comment délimiter des formes dans l'eau? Où tracer des lignes? C'est la lumière d'éclairage elle-même qui se charge de les dessiner, grâce à sa réflexion sur l'eau. Une lampe est installée au-dessus de la coupelle, et une caméra filme la surface de l'eau. Lorsque les conditions sont finement réglées, des figures stationnaires se forment. La coupelle doit être parfaitement horizontale et l'épaisseur de l'eau doit être ajustée. Puis, pour obtenir une figure symétrique aux oscillations régulières, il faut moduler l'intensité et la fréquence.

Les parties claires sont celles qui renvoient la lumière vers la caméra. Ce sont essentiellement les crêtes des vagues. Elles se présentent comme des lignes fines. Les vallées aussi sont claires, mais moins, et elles sont aussi plus larges. Les parties noires sont les pentes entre crêtes et vallées. Comme pour le sable, on a un entrecroisement de structures annulaires et de structures radiales.



*Suite d'ondes stationnaires dans un film d'eau, pour des fréquences croissantes de 10 à 160 Hz.*

*© A. Lauterwasser, Images sonores d'eau*

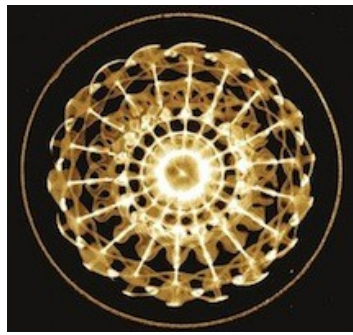
*Ci-dessous, un choix de 4 images agrandies*



*Structure à 8 branches.*

*24,24 Hz*

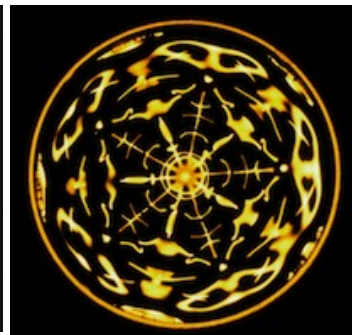
*© A. Lauterwasser*



*Structure à 18 branches.*

*35,1 Hz*

*© A. Lauterwasser*



*Structure à 5 branches.*

*38,45 Hz*

*© A. Lauterwasser*



*Spirale à 14 bras. Coupe*

*de 20 cm. 102,528 Hz.*

*© A. Lauterwasser*

Lorsqu'on monte doucement en fréquence, grâce au soin pris pour mettre en place le dispositif, on voit apparaître une grande variété de superbes figures symétriques avec des structures radiales. Le nombre des rayons ou des secteurs est surprenant. On y voit aussi bien des structures simples de 2, 3, 4, 6, 8, 12, 16 ou 24 branches, mais également des ordres comme 5, 7, 10, 14 ou 18 branches.

Si on épaissit le liquide, par exemple avec de la glycérine, les figures s'ordonnent en réseau, à la façon d'un cristal (*voir mon article web [Géométrie cristalline](#)*).

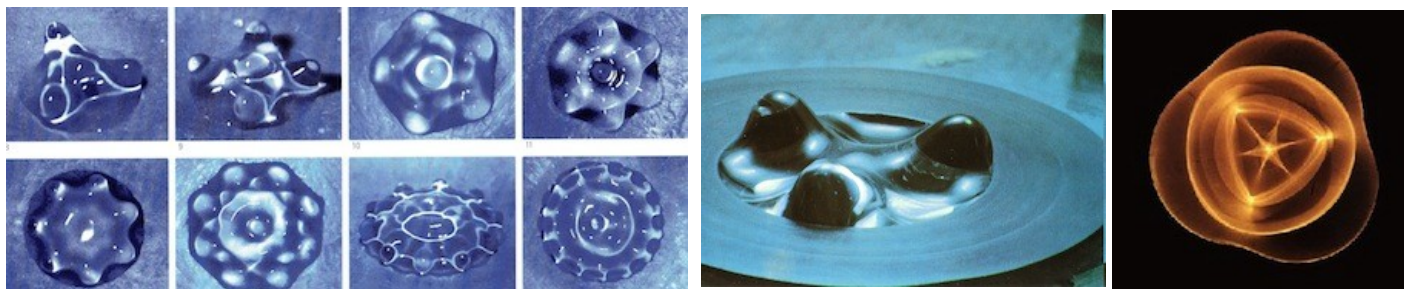
Les films d'eau sont sensibles aux sons d'une musique. Les formes suivent le rythme et la mélodie de la musique. Pour A. Lauterwasser, *ces images-là sont les plus fascinantes et les plus vivantes parce que les figures changent à chaque seconde.*

*Voir le diaporama d'Alexander Lauterwasser  
Water Sound Images.*

## Gouttes d'eau

Jenny a également exploré l'effet des vibrations sur des gouttes de liquides les plus variés: eau, huile, alcool, essence, alcool. Lauterwasser s'est plongé dans le monde des gouttes d'eau. Les liquides transparents sont éclairés avec une lampe placée par dessous ou par dessus, observés et photographiés par dessus.

Au début de la mise en marche de la vibration, des cercles concentriques se forment. Ils ne sont pas immobiles, mais parcourus par un mouvement constant. L'eau se déplace du centre vers la périphérie puis revient au centre.



*Des gouttes d'eau saisies un instant dans leur pulsation montrent des formes polygonales étonnantes à 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10 et 14 côtés.  
© A. Lauterwasser, ouv. cité*

*Goutte d'eau pulsante.  
Diamètre 2 cm. Les 3 sommets s'affaissent, les creux deviennent sommets, et l'oscillation se répète.  
© H. Jenny, Cymatics*

*La même goutte observée par dessus. Le cliché la saisit au milieu d'un mouvement. Lumière réfléchie.  
© H. Jenny, Cymatics*

Lorsqu'on augmente l'intensité ou la fréquence vibratoires, des figures géométriques apparaissent brusquement. Puisque les lignes correspondent aux crêtes et protubérances, elles soulignent le relief de la goutte. Des protubérances naissent, s'affaissent et d'autres naissent là où étaient les creux. Un rythme de pulsation s'établit. Ces changements ne sont pas synchronisés avec la vibration. Les photos montrent des instantanés de ces mouvements.

Pour certaines plages de fréquences précises, la goutte se segmente en cellules qui dessinent des **polygones: triangle, quadrilatère, pentagone, hexagone, heptagone, décagone et autres**. Ces polygones oscillent et le point d'un sommet par exemple passe sans cesse de l'état élevé à l'état affaissé. Il suffit d'une petite variation de fréquence pour modifier la forme. Il n'existe pas de relation entre le nombre de côtés du polygone et la fréquence.

Ces polygones montrent des formes, sinon stationnaires, du moins rythmiques, donc en résonance avec sa forme au repos. Dans les cas précédents cette forme au repos était celle de la plaque ou celle du récipient contenant l'eau. Mais ici, la goutte est livrée à elle-même sans contenant, sans limites extérieures. Qu'est-ce qui la limite? C'est une force qui la maintient sous forme de goutte, même au repos. Avez-vous remarqué que certains liquides s'écoulent et d'autres restent en boules lorsqu'on les pose sur une surface? Et que cela varie selon la nature de cette surface? **Cette force (ou tension) maintient les molécules de la surface du liquide entre elles et constitue une sorte de peau.** C'est leur contenant naturel.



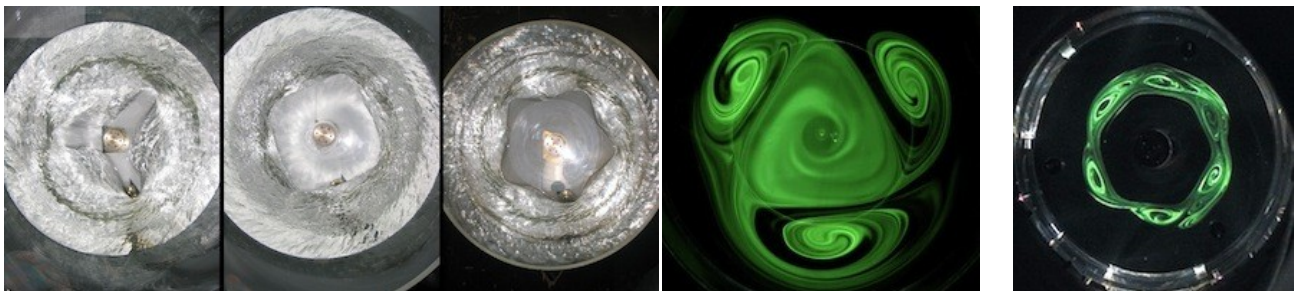
## Tourbillons polygonaux dans un liquide en rotation

Des formes géométriques polygonales sont susceptibles de se produire dans des liquides en mouvement tourbillonnaire, même en l'absence de sons. C'est une autre façon que le vibreur de stimuler le liquide. Des équipes de chercheurs dans le domaine de la dynamique des fluides ont observé comment se comporte un liquide mis en rotation rapide dans un récipient de type seau cylindrique. Ils ont abouti à la création de formes polygonales au sein du liquide.

Au Danemark, **Tomas Bohr et ses collègues de l'Université technique du Danemark à Lyngby** ont pris un récipient cylindrique en plexiglas, de 13 cm ou 20 cm de diamètre, équipé au fond d'un plateau en métal qui peut tourner. Ils l'ont rempli d'eau. Lorsqu'il tourne à grande vitesse (plus de 1 tour/s), la force centrifuge propulse l'eau sur les parois. Une cavité stable se forme au centre, qui n'est pas circulaire. Selon la vitesse de rotation, **la cavité prend des formes diverses, ellipse, étoile à 3 branches, carré, pentagone, et pour la vitesse la plus grande, hexagone.** (publié dans *Nature*, mai 2006)

Des observations analogues ont eu lieu au **laboratoire de dynamique des fluides géophysique à l'Université de Washington** (*Peter Rhine, Seattle, USA, 2003*). Dans ce cas, le liquide contenu dans un cylindre en plexiglas transparent est mis en rotation à la fois par le plateau du fond et par un disque en surface tournant à une vitesse différente. On observe des formes tourbillonnaires dans le liquide.

Aux vitesses lentes, le liquide est entraîné globalement dans le récipient. À des vitesses rapides, des turbulences se créent. Dans une certaine fourchette des valeurs de ces vitesses, **les tourbillons se disposent en positions symétriques qui dessinent des formes remarquables.** Le nombre de tourbillons qui tournent autour du centre dépend de la vitesse de rotation.



*De l'eau en rotation rapide dans un cylindre laisse se former au centre une cavité polygonale. Selon la vitesse, le polygone a 3, 4 ou 5 côtés. Diamètre 13 cm. Vue de dessus.*

*Photo © Thomas Jansson et al., 2006*

*Tourbillons dans une eau en rotation rapide dans un cylindre. Vue de dessus.*

*© Peter Rhine, 2003*

*Eau en rotation dans un cylindre. À vitesse rapide, les tourbillons prennent une forme hexagonale.*

*Eau glycinée avec pigment fluorescent.*

*© Photo Ana Aguiar, 2010*

Dans certaines conditions de vitesse, les tourbillons prennent des **formes polygonales**. C'est ce qu'ont constaté des chercheurs du **département de physique de l'Université d'Oxford, Angleterre** (*Peter Read et Ana Aguiar, publié dans *Icarus*, avril 2010*). Ils ont rendu les courants visibles en ajoutant un pigment fluorescent, puis des particules blanches de pliolite. Dans la vidéo ci-dessous, on voit clairement se former un hexagone, qui tourne lentement au centre. **Selon les conditions, on obtient d'autres polyèdres, à 3, 4, ou 7 sommets** (voir l'article de *Emily Lakdawalla* avec images et vidéo dans le site *The Planetary Society Blog* et la vidéo *Saturn's hexagon replicated in laboratory*)

Le cylindre en plexiglas a un diamètre de 60 cm et une profondeur de 10 cm. Le fond et le couvercle comportent un disque intérieur de 30 cm. Le liquide employé est de l'eau mélangée à du glycérol. Les disques intérieur et extérieur tournent à des vitesses différentes et cela crée une instabilité à leur frontière qui se transforme en onde stationnaire.

## Rupture de symétrie

Lorsqu'un polyèdre se forme brusquement dans une goutte d'eau, lorsqu'un film d'eau ou une nappe de sable déposés sur un support rond se cloisonnent en cellules, qu'est-ce qui fait le choix de l'**orientation des lignes de séparation des secteurs**? A priori, **si le support est circulaire**, rien ne permet de prévoir cette orientation. Toutes les orientations sont équivalentes.

Par exemple, si l'eau se scinde en deux vortex symétriques séparés par une ligne droite, pourquoi cette ligne est-elle orientée plutôt en face de nous plutôt qu'en travers? Qu'est-ce qui fait que brusquement **l'une de ces orientations est privilégiée**? L'apparition de ce privilège est appelé une **brisure de symétrie**.

On peut supposer que quelque chose introduit au départ une dissymétrie, quelque chose de minime qui existe dans le support ou dans l'environnement. Il peut exister des inhomogénéités dans la plaque, une légère dissymétrie du vibreur. Ou bien les figures sont sensibles aux champs magnétiques et cosmiques qui les entourent.

## Réseau cellulaire d'un liquide chauffé

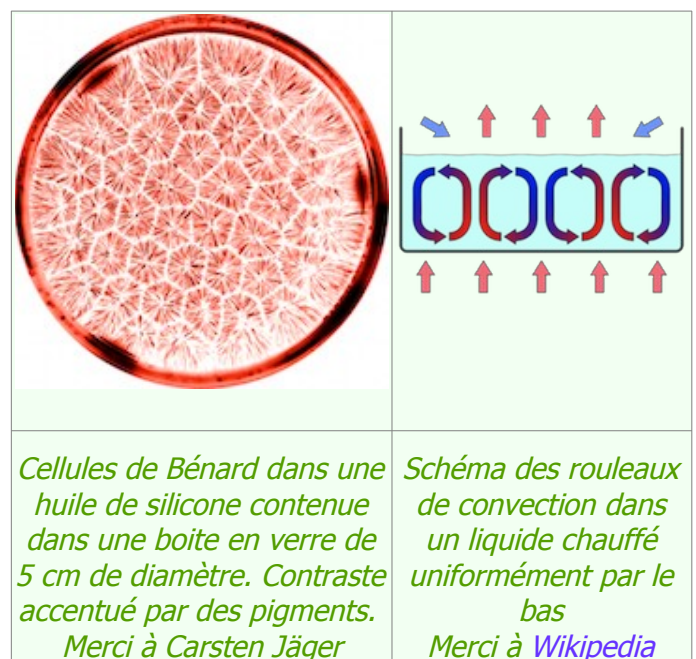
Voici un autre type d'expériences dans lesquelles des structures cellulaires apparaissent dans des liquides en mouvement. Il s'agit d'un phénomène découvert en 1900 par le physicien français **Henri Bénard** (1874 - 1939).

Si l'on chauffe par dessous un liquide contenu dans un récipient genre bocal de verre résistant à la chaleur, des mouvements de liquide se produisent entre le bas et le haut. La chaleur excite les molécules d'eau et les fait vibrer plus fort.

Pour un flux de chaleur bien déterminé, régulier, ni trop fort ni pas assez, **les courants s'organisent en structures cellulaires, appelées cellules de Bénard**. Si l'on augmente davantage la température du fond, des turbulences apparaissent, les cellules éclatent et le système devient chaotique.

Ces structures cellulaires résultent du fait que les courants se déplacent en rouleaux. Le sens de rotation est inverse dans deux cellules contiguës. Selon les liquides observés et les conditions choisies, la taille des cellules est de l'ordre du millimètre ou de quelques millimètres.

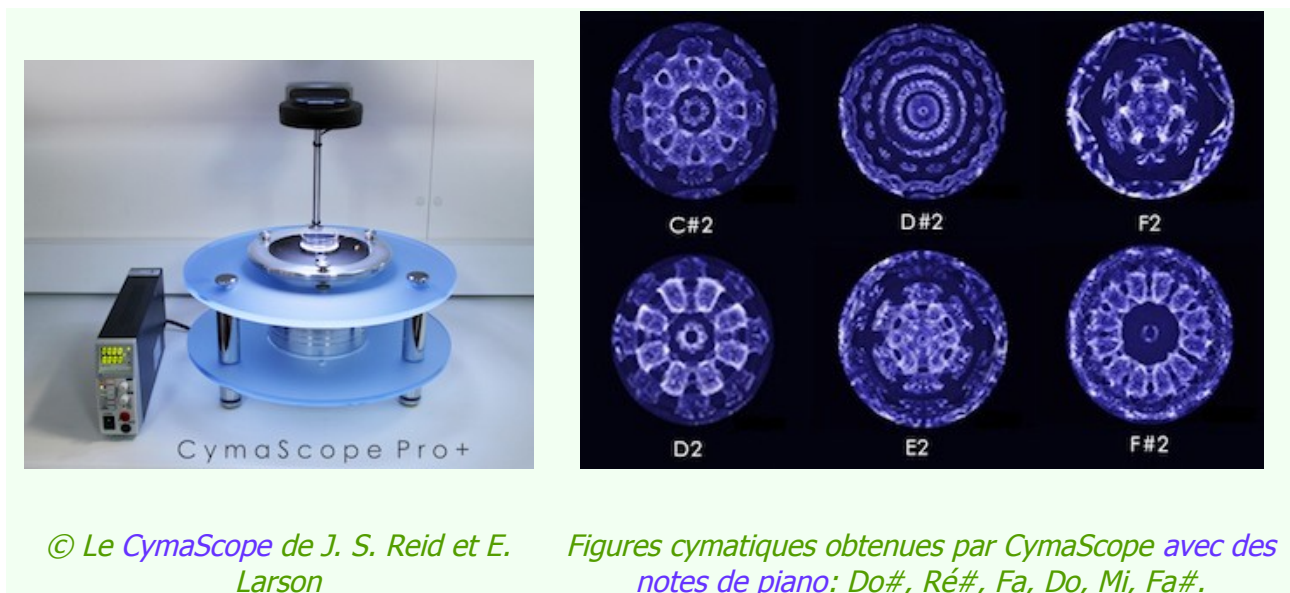
Cette observation a été expliquée plus tard par les scientifiques dans le cadre de la **théorie du chaos et des phénomènes dissipatifs**. Cette théorie énonce qu'**un ordre à grande échelle** (celui des cellules) **peut naître d'un désordre à un niveau élémentaire tel que celui des mouvements de molécules d'eau dans une casserole**.



Elle met l'accent sur l'extrême sensibilité des conditions d'apparition des cellules (sensibilité nommée **l'effet papillon**). Les scientifiques ne peuvent pas prévoir le sens de rotation d'une cellule. Alors que la physique permet de calculer les mouvements des particules individuelles, elle ne peut pas décrire les mouvements globaux avec exactitude, seulement ses probabilités. La température d'apparition des cellules dépend de la viscosité du fluide, de sa conductivité thermique, de son épaisseur et des dimensions du récipient.

## Davantage de structures sonores

Les travaux de Chladni et de Jenny ont inspiré d'autres amoureux des formes sonores. C'est le cas de **John Stuart Reid**, un ingénieur en acoustique, qui poursuit actuellement avec son équipe des recherches sur la **force de création et de guérison du son**. Il est co-inventeur, avec Erik Larson, du **CymaScope**, un appareil qui permet de visualiser le son avec de l'eau, selon un système analogue à celui de Lauterwasser. Le film d'eau pure est beaucoup plus sensible que les poudres et peut montrer beaucoup plus de détails. Avec cet appareil, il a réalisé de nombreuses observations sur la musique et la voix (*voir les résultats avec des notes de piano et des voyelles*).



© Le **CymaScope** de J. S. Reid et E. Larson

Figures cymatiques obtenues par **CymaScope** avec des notes de piano: Do#, Ré#, Fa, Do, Mi, Fa#.

La cymatique ouvre de nouvelles possibilités de recherches dans les domaines pour lesquels nous percevons mieux en "voyant" qu'en "entendant". On peut **visualiser les émissions sonores** des **instruments de musique**, des **chants**, des **sons sacrés**. Cela peut constituer une aide pour **l'acquisition du langage** chez les personnes qui présentent des difficultés. On peut s'en servir comme étude des émissions sonores et des langages chez les **oiseaux** et d'autres **animaux**. Cela a été entrepris avec les sons des **dauphins**.

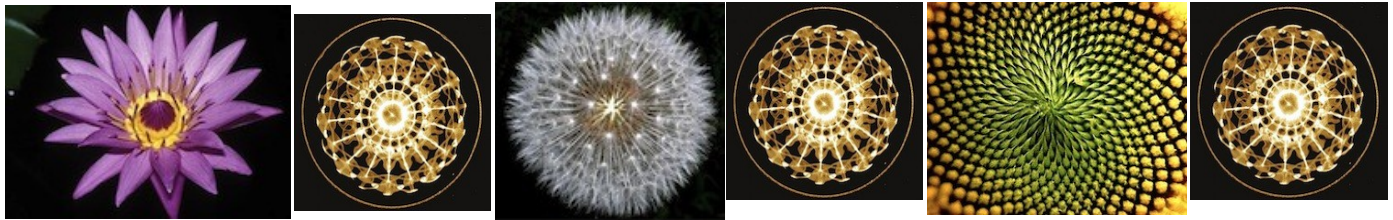
La cymatique peut aussi suggérer des **explications sur les formes adoptées par les éléments de la nature** (plantes, animaux), de **l'univers** (planètes, systèmes stellaires, galaxies) ou de certains phénomènes environnementaux (comme les **crop circles**). C'est ce qui est exposé dans les sections suivantes.

## Les formes des organismes dans la nature

*J'ai pu constater par moi-même que les oscillations et les sons peuvent effectivement donner naissance à des figures et donc que les vibrations et les rythmes jouent peut-être un rôle essentiel*

*dans le développement des formes qu'on rencontre dans la nature.* A. Lauterwasser (ARTE, Archimède du 18/01/2001)

Voici quelques similitudes frappantes entre des formes du domaine végétal et des figures cymatiques.



*Fleur de **nénuphar**  
Nymphaea cruziana  
© Eric Walravens,  
Liège*

*Onde stationnaire à 18 rayons dans un film d'eau. 35,1 Hz  
© Lauterwasser ouv. cité*

*Fleur de **pissenlit**  
Merci à Camélia*

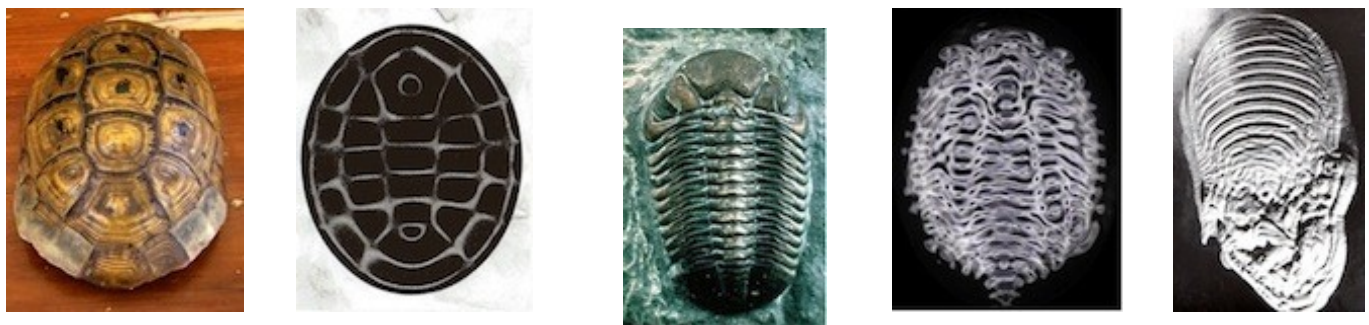
*Onde stationnaire d'ordre multiple dans un film d'eau. 91,8 Hz  
© Lauterwasser ouv. cité*

*Fleur de **tournesol**.  
Merci à Université de La Réunion, département d'ethnologie*

*Onde stationnaire dans un film d'eau. 102,58 Hz  
© Lauterwasser ouv. cité*

*En reprenant ces expériences, j'ai constaté qu'une plaque elliptique soumise à des vibrations sonores données permet de reproduire des figures qu'on trouve sur la carapace d'une tortue.* A. Lauterwasser (ARTE, Archimède du 18/01/2001)

Et voici des formes du monde animal mis en parallèle avec des figures cymatiques. À gauche, une carapace de tortue. À droite, il s'agit d'un **trilobite**, petit crustacé qui a vécu sur terre il y a 500 millions d'années jusqu'à 250 millions d'années.



*Carapace de **tortue grecque**.  
Merci à Calliope*

*Figure de **sable**.  
Plaque stimulée à partir du bord extérieur. 1088 Hz  
© Lauterwasser, ouv. cité*

***Trilobite**, fossile d'un crustacé d'il y a 426 millions d'années.  
Merci à Science Photo Library*

*Film d'eau dans le **cymascope**  
© John Stuart Reid*

***Pâte visqueuse**  
© Jenny, ouv. cité*

Les *scientifiques* pensent que la vie s'est organisée par associations successives: les atomes se sont assemblés en molécules, les molécules se sont assemblées en virus, les virus se sont assemblés en cellules, les cellules en organismes (*voir mon article web Origine de la vie*). C'est un raisonnement qui se fonde sur l'idée d'une machine qui se construit pièce par pièce.

Pour Lauterwasser, ce qui se passe avec le son montre que cela pourrait être l'inverse. **Le mouvement vibratoire crée des tourbillons et des flux, les parties se différencient et structurent la masse.** Plus le mouvement est rapide et plus la structure cellulaire est fine.

On peut donc dire que c'est **le son qui apporte l'information nécessaire à la création de formes et à leur différenciation.**

## Les diagrammes sonores des crop circles

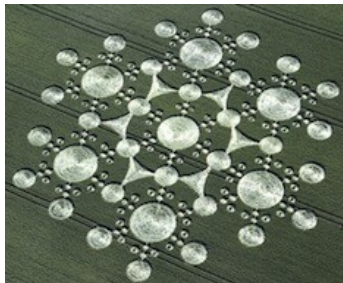
Les **diagrammes de champ** (en anglais **crop circles**) sont des dessins imprimés dans des champs cultivés, effectués à l'insu des agriculteurs et des observateurs, à quelques rares exceptions près. Leur taille peut aller d'une dizaine de mètres à plusieurs centaines (on peut s'en rendre compte sur les photos par les traces habituelles des roues de tracteur dans le champ). Ils apparaissent chaque été dans le monde entier, mais plus particulièrement dans le sud-ouest de l'Angleterre. Les figures ne révèlent leur dessin que vues du ciel. Leur réalisation est souvent d'une grande complexité et témoigne d'une habileté minutieuse et experte. Depuis les années 1980, on a répertorié des milliers de ces figures de toute beauté. *(Pour en savoir plus, voir mon article web [Diagrammes de champs et son diaporama](#))*

La majeure partie de ces figures sont construites sur la base de structures géométriques symétriques. Certaines ont des ressemblances frappantes avec les figures acoustiques. Parfois, on a même l'impression que le diagramme est une imitation volontaire de ces figures acoustiques.

La géométrie de ces dessins est parfaite lorsqu'on les observe de haut, même lorsque le terrain sur lequel ils sont imprimés est irrégulier. Quel que soit le procédé de fabrication, il est indispensable qu'il emploie une **projection verticale**, que ce soit du haut ou du bas. Il pourrait donc s'agir de l'action d'un rayon vibratoire. Aussi, une hypothèse très avantageuse a été avancée. **Ce rayon agirait comme une onde sonore.** De même qu'un son crée des figures cymatiques, de même on peut concevoir qu'une technique plus avancée **crée des formes dans l'air, dans l'eau du sol et dans les plantes par l'usage d'ondes vibratoires stationnaires.** D'ailleurs, certains témoins ont entendu un son suraigu survenant juste avant la formation du diagramme *(voir [Freddy Silva, 1997](#))*.



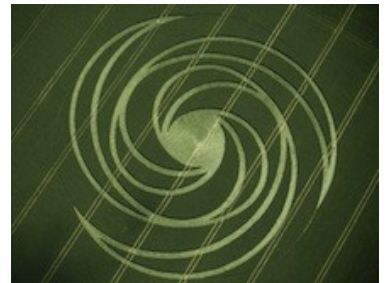
1- Une étoile à 10 bras.  
1994



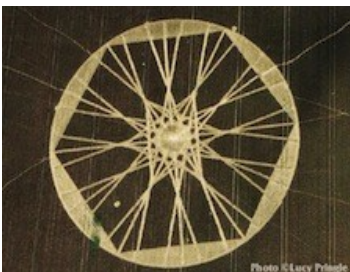
2- 2010



3- Étoile à 4 branches.  
2001



4- Spirales. 1999



5- Hexagone étoilé. 1997



6- Quadruple couronne.  
2002



7- Couronnes entrelacées.  
2002



8- Spirale à 6 branches.  
2001

**Crédits photos:** [Lucy Pringle](#), © photos 1, 3, 5, 6, 8; [Steve Alexander \(Temporary Temples\)](#), © photos 4 et 7; [John Montgomery, \(Crop Circle Connector\)](#) © photo 3.

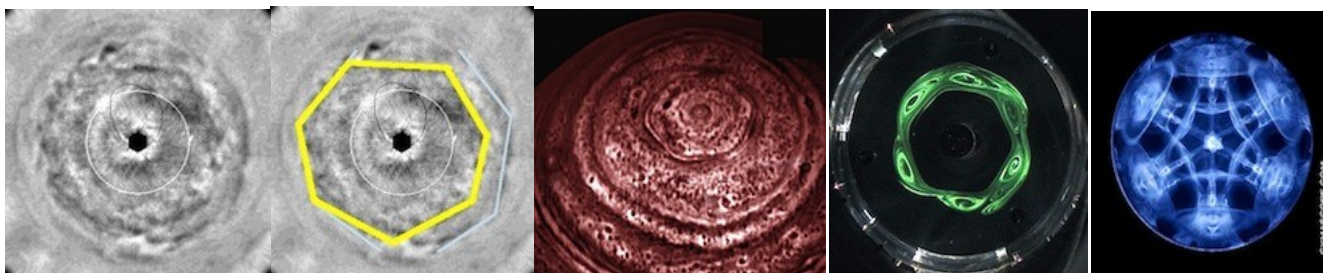
## Structures géométriques des planètes

Récemment, les sondes spatiales d'observation du système solaire ont apporté quelques surprises aux astronomes. Des structures géométriques sont visibles à la surface des pôles de certaines planètes, en particulier Saturne et Jupiter.

En ce qui concerne **Jupiter**, la sonde Cassini a recueilli des images en lumière ultraviolette de son pôle nord pendant 11 semaines en 1999. On y remarque la présence d'un tourbillon ou vortex dont la taille est supérieure à celle de la Terre. Ce vortex semble structuré par un ou plusieurs **polyèdres**. Selon la façon dont on définit les sommets, on peut y voir un pentagone, un hexagone ou un heptagone. Quoiqu'il en soit, une structure polyédrale est bien visible. En fait il semble exister plusieurs polyèdres imbriqués.

Dans le système nuageux de **Saturne**, la sonde Voyager 1 a détecté en 1980 une **structure hexagonale** autour du pôle nord. Son existence a été confirmée par la sonde Cassini en 2006. Les côtés de l'hexagone mesurent environ 13'800 km. Il tourne sur lui-même avec une période de 10h 39 mn.

La plupart des astronomes pensent que ces polyèdres sont dus à des ondes stationnaires dans l'atmosphère de ces planètes. Dans les études rapportées plus haut sur les tourbillons liquides dans des cylindres transparents (*Université technique du Danemark et Université d'Oxford*), les chercheurs ont pu simuler la formation de ces structures polygonales en laboratoire. Cela démontre que **des formes inscrites dans les planètes peuvent naître du mouvement circulaire et rythmique de la matière fluide**.



**Jupiter**,  
stratosphère du  
pôle nord.  
Photographie en  
ultraviolets  
Merci à NASA/  
JPL/HST/  
University of Hawaiï  
1999

2 hexagones sont  
visibles dans la  
structure du pôle  
nord. L'un  
représenté en  
jaune, l'autre en  
bleu clair (ajout  
d'A. Boudet)

**Saturne**, système  
nuageux hexagonal  
du pôle nord  
Photographie en  
infrarouges par la  
sonde Cassini. Les  
parties claires sont  
les nuages et les  
parties sombres sont  
les zones dégagées.  
Merci à NASA / JPL /  
U. Arizonay

**Eau** en rotation  
rapide. Les  
tourbillons  
prennent une  
forme hexagonale.  
Eau glycinée,  
avec pigment  
fluorescent.  
© Photo Ana  
Aguiar, 2010

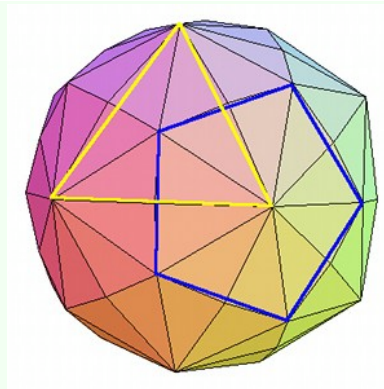
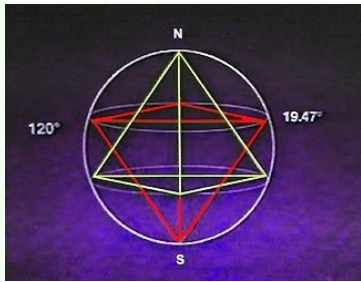
Hexagone visible  
dans un film  
d'eau en  
vibration sur une  
membrane  
ronde.  
© Photo Erik  
Larson

## Les tétraèdres des planètes et de la Terre

**Des observations sur plusieurs planètes suggèrent qu'elles sont sous-tendues par des polyèdres, en particulier par un double tétraèdre.**

C'est ce qu'énonce **David Percy**, un producteur de cinéma et de télévision britannique qui a aussi reçu la fonction de directeur européen des opérations pour la mission Mars. Cela l'a conduit à

proposer de nouvelles théories sur les structures des planètes, qu'il a exposées dans son ouvrage *Two-thirds (Deux-tiers, en collaboration avec David P. Myers et Mary Bennett)*. Ses propositions et ses documents photographiques ont été repris et exposés au siège de l'ONU en 1992 par [Richard Hoagland](#), un ancien conseiller de la NASA pour le Goddard Space Flight Center.



*Double tétraèdre inscrit dans une sphère. Polyèdre 120, base de la grille énergétique de la Terre*  
*Merci à R. Hoagland* *Merci à Robert Ferréol*

Percy montre l'existence d'un **tétraèdre régulier inscrit dans la Terre**. Un sommet est situé au pôle Nord et les autres sommets sont répartis à 120° les uns des autres sur le cercle de latitude 19,5°. **Les côtés et surtout les sommets du tétraèdre se manifestent par des flux énergétiques** à la surface de la Terre. Ces manifestations sont de nature magnétique et géophysique. C'est à la latitude de 19,5° nord qu'on trouve la grande île d'Hawaï qui est le théâtre d'une activité volcanique importante. Beaucoup de **sites sacrés** d'anciennes civilisations sont localisés autour de

19,5° Nord ou Sud: par exemple le complexe de Teotihuacan au Mexique. D'autres chercheurs ont complété ces observations et montré l'imbrication de **5 polyèdres, traditionnellement appelés solides de Platon**, qui se combinent en une grille de **120 triangles** (voir les détails dans mon article web *La grille énergétique planétaire*).

Percy a également mis en évidence des phénomènes importants à la latitude de 19,5° nord ou sud dans le système nuageux de plusieurs planètes: vortex géants pour les planètes gazeuses, activité volcanique dans les terres solides. La grande tache rouge de **Jupiter** est à cette latitude. De même la tache noire de **Neptune** découverte par la sonde Voyager II. Les activités volcaniques majeures de **Vénus** se situent autour de 19,5°. Le Mont Olympe, cône volcanique de **Mars** est à cette même latitude. Enfin, les fortes activités magmatiques et thermiques du **Soleil** se produisent à 19,5° Nord et Sud. (d'après le livre *Sedona: Beyond the Vortex*, Richard Dannelley).

Le pôle nord de Mars est recouvert d'une calotte glaciaire. Comme celle de la Terre, **la calotte glaciaire de Mars** se réduit de plus en plus et tend à disparaître (son réchauffement n'est pas dû à l'effet de serre. Tout le système solaire se réchauffe !). R. Hoagland et D. Wilcock ont fait remarquer qu'en se retirant, elle avait pris **la forme d'un hexagone** (*Interplanetary "Day After Tomorrow?"*).

Ainsi, **des formes géométriques polyédrales orientées sont inscrites dans des corps planétaires sphériques**. Comment est-ce possible? Cela ressemble fort à des ondes stationnaires créées par une vibration rythmique. **Le monde aurait-il été formé à partir de pulsations vibratoires?**

## Le monde a été créé par le son

La plupart des cultures traditionnelles planétaires possèdent un récit mythologique de la création du monde, dont beaucoup font référence au son ou à la parole. **Par le son, la parole ou le souffle, les dieux créent les créatures à partir de la substance primordiale sans forme.** (voir mon article *Aspects géométriques et sonores de l'univers - un autre regard sur l'évolution*)

Dans la **tradition chinoise**, le *Tao Te King* dit: *Avant les Temps et de tout temps existait quelque chose existant de par lui-même, éternel, complet, omniprésent. On ne peut lui donner un nom car*

ce serait définir l'indéfinissable. On l'appelle **OU** signifiant néant de forme, informulé; on l'appelle aussi **Tao**. Le Yuan Tchi Lun dit: Lorsque les Souffles (tchi) ne s'étaient pas encore séparés en prenant forme, ils étaient unis (mariés) et ressemblaient à un œuf. Puis les Souffles formèrent un globe de forme parfaite que l'on appelait le Grand Un (Taé I). Le Souffle originel, d'abord pur, monta et forma le Ciel; puis, étant troublé, il descendit et forma la Terre.

Dans les **textes celtes** sacrés, on lit: *Au commencement était l'Unique, la Lumière de la Lumière. Tout était une seule lumière, indicible, sereine et joyeuse, force de vie d'une blancheur infinie, d'une pureté totale, parcourue de grandes ondes blanches et dorées.* Les textes bardiques disent: *Les ténèbres opaques emplissaient l'infini avant que l'Inconnaissable ne prononce son Nom hors de Keugant; de sa **Parole** jaillirent la Lumière et la Vie. Cette Parole forma trois rayons lumineux colorés et sonores: les **Trois Cris**, véhicules de la pensée créatrice qui firent éclater l'Œuf du Monde.* Ces trois cris sont associés à 3 voyelles: I, O, W (ou).

L'évangile **chrétien** de St-Jean dit: *Au Commencement était le **Verbe**. Le Verbe était avec Dieu. Le Verbe était Dieu.* Verbe est une traduction française possible d'un mot qui signifie aussi *Parole*. **Enoch** précise: *Au commencement était le Verbe, cependant le commencement du Verbe se manifesta en un pictogramme lumineux qui prit forme. Provenant des émanations de l'Esprit Divin, les images lumineuses (ou pictogrammes) apparurent; combinées aux géométries des formes créatives, elles produisirent le spectre de toute forme issue de l'alphabet de création. (Le livre de la connaissance; Les clés d'Enoch, Clé 214 J.J. Hurtak).*

Chez **les Hindous et les bouddhistes**, la création est issue de l'énergie primordiale qui est à l'origine de tout. Le principe structurant du chaos d'origine est le son ou mantra **Om** (ou **Aum**). Les sons ont ensuite le rôle de création permanente. *Dans l'Asie et en Inde plus particulièrement, la tradition rapporte que dans un lointain passé, des saints hommes, les Rishis, (littéralement les clairvoyants), auraient perçu dans le silence profond de leur méditation, **une série de sons traduisant les vibrations inhérentes à toute construction atomique des différents éléments de la nature.** Ils donnèrent à cet ensemble de sonorités le nom de SAM-S-KR ce que nous appelons aujourd'hui le Sanskrit... Ils donnèrent à cette nouvelle langue le nom de "langage des dieux" (André Riehl, enseignant en yoga traditionnel).*

Pour les **Mayas Tzutujils**, les dieux ont créé le monde par leurs mots.

*Les lieux, les animaux, les plantes, le temps et tout ce qui compose le monde extérieur sont aussi à l'intérieur de nous, comme un jumeau, et l'ensemble compose une immense série quadridimensionnelle de cubes concentriques: les épaisseurs s'étendent simultanément à l'intérieur et à l'extérieur, pour former la maison du monde, ou corps du monde. Cette structure est faite par les constructeurs, certains propriétaires, ou dieux, **avec leurs sons et leurs paroles.** Ces sons et ces paroles prennent une signification tangible quand on les émet. Chaque parole du dieu construit la maison du monde en se faisant l'écho d'autres paroles. Ces sons du monde des esprits, quand ils sont tous émis ensemble, composent le chant spirituel du monde. Cette combinaison de sons devient vibrante et tangible en atteignant ce monde-ci, et lui donne la forme que nous voyons et que nous sommes. **Ce chant est le système nerveux de l'univers.** (Martin Prechtel, *Les secrets du jaguar*, 1999)*

Quand un homme est malade, cela signifie qu'il a perdu sa symphonie intérieure. Le chaman le soigne en recréant l'harmonie par ses paroles sacrées qu'il récite ou chante sur un rythme précis afin de reproduire les Grands Sons Originels.

***Utilisant les noms secrets** des montagnes, des grottes, des rivières, des vallées, des villages, ainsi que les noms de familles des dieux et de leurs royaumes pour chacun de ces endroits, le chaman restructure les composantes de notre esprit. Si ce rituel, dénommé "se rappeler la Terre", est correctement accompli, les corps malades commencent à résonner de l'écho de la Terre originelle, où toute vie prend sa forme, et ils guérissent. (Martin Prechtel, *Les secrets du jaguar*, 1999)*



À propos des crânes de cristal, qui sont des cristaux traditionnels taillés en forme de crâne, porteurs des informations des origines de l'humanité et retrouvés chez les Mayas, le **chef Navajo Leon Secatero** (décédé en 2008) dit (*voir mon article Codage d'information et énergie*) :

*Vous avez entendu parler de l'appel de la nature? C'est un son que seuls les animaux peuvent entendre, un son puissant qui les ramène vers leur vraie nature. C'est le son des crânes de cristal. Nous vivons dans un vaste océan de sons et de vibrations. Les sons nous entourent, mais c'est à travers ce vaste océan que le son des crânes de cristal peut voyager. C'est un son jamais entendu, un son inaudible pour l'oreille humaine ordinaire. Nous ne pouvons l'écouter qu'avec notre "oreille intérieure". C'est **le son inaudible de la création**. Sans lui, rien ne pourrait vivre, car il est **le son qui anime toute chose**. Une feuille qui pousse au printemps produit ce son. C'est le son qui jaillit, au moment de la création quand une vie nouvelle éclot. C'est le son même qui a retenti quand la Terre est venue à l'existence et quand nous avons reçu notre forme humaine. C'est **ce même son de la création qui est aussi en nous** et c'est un son magnifique. (C. Thomas et C.-I. Morton, *Le mystère des crânes de cristal*, 1999)*

## La substance primordiale et la géométrie sacrée

S'il est vrai que des sons ont créé l'univers, cela impliquerait qu'**il existerait une substance primordiale dans l'univers et que les vibrations de cette substance constituerait le son**. Des ondes stationnaires y auraient créé les formes. Mais quelle serait cette substance?

Les scientifiques décrivent habituellement l'espace comme un vide dans lequel sont disposés des amas de matière (particules, atomes, molécules) comme des objets qui sont éparpillés dans une pièce vide. Par le jeu de leurs influences réciproques d'attraction et de répulsion, des mouvements se transmettent de particule à particule, de molécule à molécule comme le son dans l'air (*voir en annexe, Ondes voyageuses*). Les **pulsations de cette matière cosmique** constituent une sorte de son que les astronomes ont enregistré.

Citons l'exemple des **astronomes de Stanford** (USA) qui surveillent **les sons du soleil** par un capteur installé dans le satellite SOHO. Des vagues parcourent la surface du soleil et en font le tour en 2 heures environ. Cette pulsation est trop lente pour être directement audible par notre oreille qui est sensible à des pulsations de dizaines ou de milliers par seconde. Il faut accélérer les enregistrements solaires par 42000 fois et compresser 40 jours en quelques secondes pour pouvoir les entendre. C'est ce qu'a fait l'un des chercheurs, **A. Kosovichev**. *Ecoutez*.

Toutefois, ces ondes de matière ne font pas appel à l'existence d'une substance primordiale.

La substance primordiale de l'univers à laquelle font référence les traditions est d'une nature plus subtile et répond à d'autres lois. Elle a été désignée et nommée prana, éther, etc. La physique quantique la plus avancée commence à décrire une substance de cette sorte, sous le concept de **matrice universelle ou champ de cohérence unitaire**. Cette matrice a la propriété de recevoir des informations, de les enregistrer et de les transférer instantanément en n'importe quel endroit. (*voir les articles de physique quantique de [www.spirit-science.fr](http://www.spirit-science.fr) et le livre de D. Wilcock, *Investigations sur le champ de conscience unitaire**)

Les sons primordiaux créent des géométries sacrées dans la matrice. Les sons sont en quelque sorte des codes d'information transférés à la matrice, qui les transcrit en formes. Sons et géométries sont deux expressions vibratoires jumelles d'un même schéma directeur.

**La géométrie est le fondement de l'univers dans tous ses aspects. Elle est présente aussi bien au cœur des atomes que dans la construction des molécules, des planètes et des galaxies.**

9 mai 2012

# Chapitre 8

## Ton, tempéraments et intonation juste

### Science des nombres et sensibilité humaine

**Résumé:** Pourquoi les interrogations sur la définition du ton et des intervalles constitutifs des gammes ont-elles préoccupé tant de compositeurs et de musicologues depuis l'antiquité grecque? Le ton, la tierce, la quinte, l'octave sont-ils des données absolues? Non, bien au contraire. Au cours du temps, et cela au moins depuis l'antiquité grecque, les intervalles ont été déterminés sur des bases mathématiques et techniques, en faisant appel à la science des nombres, tout en cherchant à s'adapter aux instruments existants. La gamme tempérée a succédé à d'autres gammes, telles que la gamme pythagoricienne, la gamme de Zarlino, et divers systèmes de tempéraments. Elle est une convention passagère, correspondant à la mentalité d'une époque. L'essentiel réside dans l'effet sonore qui résulte de la gamme, et dans la façon dont elle résonne et agit sur le corps et sur l'âme. Des recherches récentes tentent de trouver une intonation qui soit juste pour le corps et pour l'Être. Mais est-ce possible de façon définitive et universelle?

Dans le chapitre 3 nous avons appris qu'un mode est défini par le placement en hauteur, le long de l'échelle d'une octave, d'un nombre limité de notes, généralement 7, mais typiquement entre 5 et 8. Imaginons ces notes comme des échelons dans l'échelle de l'octave. Ces échelons sont appelés les **degrés**.

Ces 7 (ou autre nombre) degrés **peuvent être placés au choix parmi 11 positions possibles sur les montants de l'échelle** (positions qu'on peut imaginer comme des encoches sur ces montants). **En comptant la position du bas qui est le point de départ, et celle du haut qui est son octave, elles divisent l'octave en 12 demi-tons**. Le chiffre 12, fréquent dans la musique de l'Occident, n'est d'ailleurs pas impératif, et dans certaines musiques, l'octave est divisée en parties plus nombreuses et plus petites. Le choix particulier d'un arrangement de positions définit un mode.

Dans ce chapitre, je me penche de façon plus fine sur la façon dont sont déterminés les emplacements des 12 encoches, autrement dit **comment sont définis précisément les tons, les demi-tons** et en conséquence les autres intervalles. Nous constaterons qu'il y a eu des réponses multiples dans l'histoire de la musique. La façon d'accorder les instruments est le reflet d'une époque, d'un lieu, d'une pensée.

Afin de comprendre cela de façon concrète, je prends pour exemple 3 échelles parmi les plus citées, toutes en mode majeur, mais accordées de 3 façons différentes. Dans notre terminologie contemporaine, elles sont nommées **gamme tempérée, gamme de Zarlino ou naturelle, et gamme de Pythagore**.

L'intention de cet exposé n'est pas une reconstitution historique. Nous nous questionnons sur la démarche qui conduit à élaborer des gammes déterminées. En découvrant de façon détaillée comment sont définis les intervalles de ces gammes, nous pourrions constater leur variété, et nous pourrions mesurer combien nous **sommes conditionnés par des idées reçues sur les gammes et le ton**. Cela nous ouvrira de nouvelles perspectives et nous pourrions choisir plus librement, en tant qu'auditeur ou musicien, la musique qui nous fait le plus de bien par ses résonances.

**NOTE:** Ne vous arrêtez pas sur les tableaux de chiffres si ça ne vous parle pas. Vous pouvez les sauter sans inconvénient. Ils sont seulement là pour décrire les intervalles de façon plus précise afin de montrer la preuve de ce qui est dit.

## Qui décide de la hauteur des notes de la gamme?

Pourquoi les modes sont-ils construits avec 7 degrés, ou 5 ou 8? Et comment la hauteur de ces degrés est-elle fixée de façon exacte? Exemples pratiques: À quelle hauteur un fabricant d'instruments fixe-t-il les notes de ses instruments? Comment procède un accordeur de piano?

Peut-être vous semble-t-il, d'après les enseignements scolaires et les médias, que les gammes majeures et mineures sont fixées de manière universelle et immuable, selon des lois semblables à la loi de la gravité qui régit l'orbite terrestre ou aux lois physiologiques de la circulation sanguine. Effectivement, les hauteurs des notes des gammes sont déterminées par des principes. Mais ces principes sont-ils basés sur **des lois cosmiques** ou **sont-ils seulement des conventions culturelles**, des produits arbitraires de nos esprits?

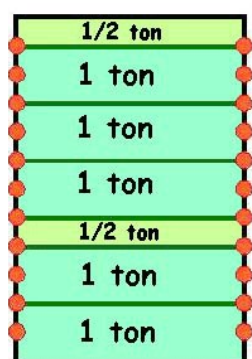
**Les gammes et modes sont les mots d'un langage**, et choisir les hauteurs fines des notes ou **intonation** revient à définir les codes de ce langage. Pourquoi adopter telle grammaire plutôt qu'une autre? Y a-t-il une instance académique internationale qui fixe la définition des notes, comme l'Académie Française définit les mots et leur orthographe?

En réalité, de la même façon que l'humanité nous offre bien des langages très différents, elle nous offre de même des langages musicaux différents, dans lesquels la définition des tons et demi-tons varie beaucoup. Par notre culture occidentale actuelle, essentiellement scolaire, puis "commerciale" et "médiatique" au travers des disques, des diffusions radio et TV, nous sommes conditionnés à écouter de la musique dite "tempérée", dont on verra la définition plus bas. Mais cela n'est le cas ni dans la musique du Moyen Âge, ni dans la musique ethnique, ni dans la pratique réelle du chanteur.

La gamme tempérée semble avoir quelques inconvénients, surtout parce qu'elle ne respecte pas les correspondances harmoniques naturelles avec le corps. Actuellement des chercheurs et des compositeurs développent de nouvelles musiques basées sur les résonances plus naturelles, plus harmoniques, qualité appelée **l'intonation juste**. Qu'est-ce que ça veut dire, *juste*?

Je répondrai à cette question plus loin, mais il nous faut d'abord comprendre ce qu'est précisément la gamme tempérée, la gamme habituelle de notre culture de masse. On découvrira qu'elle est d'un usage assez récent, et qu'auparavant on utilisait d'autres systèmes d'intonation, tels que celui de Pythagore et puis d'autres encore. Et que ces systèmes n'étaient pas tempérés ou pas de la même façon.

## La gamme tempérée, une division mathématique



Pour illustrer notre recherche sur les valeurs fines des intervalles, nous nous restreignons dans cet article au mode majeur, qui imprègne notre culture musicale classique et beaucoup de nos chants populaires.

Reprenons le schéma du chapitre 3 qui nous donne la structure du mode majeur. On part du principe que l'échelle totale représente une octave juste. Cela n'est pas toujours vrai, comme on le constatera avec le **tempérament Cordier**.

Le **mode majeur** est défini par le choix du placement des 7 échelons sur les 11 encoches de l'échelle (ronds rouges) tel qu'il est représenté sur la figure, donc par le placement des deux demi-tons. Le problème de l'intonation concerne la position fine de ces encoches: où positionner exactement chacun de ces ronds?

À votre avis, **comment les emplacements précis des 11 encoches ont-ils été déterminés?**

Peut-être allez-vous répondre que le schéma en suggère la solution puisque nous y voyons une succession de tons et de demi-tons. *Si un ton vaut deux demi-tons*, alors il suffit de diviser l'intervalle d'octave en 12 demi-tons identiques, ce qui fixe la position des encoches.

Cette réponse n'est pas exacte en général, mais elle l'est justement en ce qui concerne la gamme à tempérament égal. Ce choix de 12 demi-tons **égaux** est précisément la définition de la **gamme tempérée** actuelle (*on verra plus bas la signification des termes tempéré et tempérament*).

*Remarque: Si j'emploie le terme de "gamme" majeure, certains vont penser que je ne suis pas rigoureux puisque selon la définition que j'ai donnée des gammes et des modes dans la première partie, je devrais dire un "mode" majeur. Oui, c'est vrai, mais le langage ne se comporte pas comme un être mathématique rigoureux. En réalité le mot "mode" est déjà contenu dans "majeur", et "gamme majeure" signifie "n'importe quelle gamme en mode majeur". D'ailleurs, dans les pratiques musicales historiques, la distinction entre mode et gamme n'est pas aussi évidente que notre définition rigoureuse des temps modernes, et cela est lié au peu d'importance accordée à la hauteur absolue.*

**Dans la gamme à tempérament égal (en raccourci "tempérée), les tons sont tous identiques, le demi-ton vaut exactement la moitié d'un ton, l'octave possède 12 demi-tons rigoureusement égaux.** Le demi-ton est donc la douzième partie d'une octave juste et les encoches sont disposées à intervalles réguliers d'un demi-ton.

Si l'on veut jouer une gamme chromatique ou changer de tonalité, c'est très commode parce qu'il suffit de tout décaler d'un certain nombre de demi-tons. Cette gamme est le type auquel la culture médiatique nous a habitués.

## Comment diviser l'octave en douze demi-tons égaux?

Si l'on mesure les intervalles en unités appelées "**cents**" (*voir chapitre 5*), les **demi-tons** valent **100 cents** par définition du cent, les **tons** valent **200 cents**, et l'**octave** vaut **1200 cents**.

Si l'on mesure les intervalles par les **fréquences** vibratoires des sons, le calcul de leur valeur est un peu plus compliqué. L'**octave** est caractérisée par le nombre **2** qui est le rapport entre les fréquences de deux notes distantes d'une octave. Par exemple, il y a le même intervalle d'une octave entre le son de fréquence 128 Hz et celui de fréquence 256 Hz, ou entre celui de 20 Hz et celui de 40 Hz. Il s'agit d'un rapport, une multiplication par 2 et non une addition.

*Tableau I: Les intervalles de la gamme majeure tempérée par rapport à la note de base*

	En cents	0	200	400	500	700	900	1100	1200
Intervalles par rapport à la tonique	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	$2^{2/12}$	$2^{4/12}$	$2^{5/12}$	$2^{7/12}$	$2^{9/12}$	$2^{11/12}$	2
	En rapport de fréquences (décimal)	1	1,1225	1,2599	1,4167	1,4983	1,6818	1,8877	2
Notes		DO3	RÉ3	MI3	FA3	SOL3	LA3	SI3	DO4
Fréquences des notes en hertz repérées sur LA 440		261,625	293,67	329,63	349,22	391,99	<b>440</b>	493,88	523,25

Pour partager l'octave en douze intervalles égaux, les mathématiques nous apprennent qu'il ne faut pas diviser 2 par 12, mais utiliser la racine douzième: nous obtenons l'intervalle d'**un demi-ton,  $^{12}\sqrt{2}$ , qui s'écrit aussi  $2^{1/12}$ , soit 1,0595**. C'est le nombre par lequel il faut multiplier (et non ajouter) la fréquence d'une note quelconque pour monter d'un demi-ton: par exemple il y a un intervalle d'un demi-ton entre la note 20 Hz et la note 21,19 Hz ou encore de 128 à 135,616.

En montant une deuxième fois d'un demi-ton, on a le rapport  **$2^{2/12}=1,12246$  pour un ton**. Et ainsi de suite, jusqu'à retrouver 2 lorsqu'on a multiplié 12 fois.

Dans le tableau I ci-dessus, j'ai reporté les valeurs des intervalles du mode majeur à tempérament égal par rapport à la note de base de la gamme, la tonique (les 3 premières lignes du tableau). Les deux dernières lignes présentent une application particulière de ce schéma dans laquelle la tonique choisie est le DO3, et la fréquence du LA3 est 440 hertz selon la référence internationale, ce qui détermine la valeur des fréquences des autres notes (*voir chapitre 3 pour la numérotation des octaves*).

## La gamme tempérée, un modèle passager parmi d'autres

Le résultat de ces calculs est flagrant: la gamme tempérée est d'une précision mathématique, claire et sans surprise. Les tons et demi-tons s'y échelonnent de façon régulière en 100 ou 200 cents. Si nous sommes de ceux qui n'ont reçu que quelques cours scolaires pour toute éducation musicale, reconnaissons que notre représentation de la gamme est assez conforme à cette vision: un ton doit toujours avoir la même grandeur quoiqu'il arrive et il est défini par les musiciens et les scientifiques! De plus, lorsque nous voyons un piano avec ses touches équidistantes, nous avons une image qui semble confirmer cette représentation.

De même, mon schéma des 11 ronds rouges sur l'échelle ci-dessus peut laisser croire que leur position est bien déterminée à intervalles réguliers, fixée par quelque autorité compétente. Or cette représentation est due à une habitude, une paresse de l'esprit liée au conditionnement ambiant. En réalité, les intervalles ne sont réguliers que dans le cas de la gamme tempérée à laquelle nous sommes habitués, mais elle est loin d'être la seule construction possible. **Il existe des variations fines des positions des degrés et des écarts subtils dans la définition des tons et des demi-tons. Ainsi, le demi-ton n'est pas forcément la moitié d'un ton.**

Observons que le procédé consistant à définir un ton comme la fraction d'un sixième d'octave dérive plus d'une recherche mentale que d'une sensibilité, même si, comme on le verra [plus loin](#), elle répond à des problèmes pratiques de transposition et de modulation. La gamme tempérée est **utilisée seulement depuis la fin du 18<sup>e</sup> siècle, et généralisée depuis le 19<sup>e</sup>**, après bien des débats et réticences. Elle est le reflet d'une mentalité très moderne de mesure, de normalisation et d'uniformité, qui s'est développée en même temps que la science mécanique et la technique au moment de la "révolution industrielle" du 19<sup>e</sup> siècle.

Il est souvent dit que c'est **J.S. Bach**, en composant son œuvre *Le clavier bien tempéré*, qui a été le promoteur de cette nouvelle gamme, mais cette rumeur est fautive. Car **"bien tempéré" n'a pas le sens de "tempérament égal", mais de tempérament le meilleur**, c'est-à-dire celui qui permet de jouer dans la plupart des 24 tonalités différentes. Les musicologues sont d'avis que Bach s'est opposé à l'usage de la gamme à tempérament égal et qu'il a défendu des systèmes dont le tempérament n'est pas égal (*voir [plus loin](#) la définition d'un tempérament et ceux probablement employés par J.S. Bach*).

Au cours des siècles, beaucoup de recherches ont été conduites sur la définition des intervalles musicaux, par de nombreux musiciens, compositeurs et physiciens, en Occident et aussi en Asie et au Moyen Orient. Même pendant ses heures de gloire, la gamme tempérée a été quelquefois contorsionnée, poussée dans ses retranchements, et ses cadres ont été outrepassés. La musique

contemporaine a abandonné la gamme tempérée et s'est dirigée vers d'autres formes (*voir article chapitre 4*). Et oui, car le monde est vaste, créatif et diversifié. Le tempérament égal n'est pas utilisé dans les musiques extra-européennes, ni, à l'origine, dans les musiques traditionnelles.

En conséquence la gamme tempérée n'est pas un modèle absolu. Elle ne constitue qu'une convention passagère, et ce mot "convention" n'est pas péjoratif. Car elle est à l'origine d'un foisonnement créatif et source d'œuvres magnifiques. Cela témoigne simplement d'une évolution constante de la musique, à l'image de l'être humain et de la vie, évolution parsemée de moments de repos et d'intégration pendant lesquels on profite des nouveaux acquis.

Mais alors, quelles étaient les gammes employées en Europe avant le 19<sup>e</sup> siècle? La musique de la Renaissance (16<sup>e</sup> siècle) s'est beaucoup fondée sur les recherches de **Zarlino** et sur des systèmes de tempéraments inégaux, en particulier le **système mésotonique**. Ils ont eux-mêmes remplacé le système dit "**pythagoricien**" employé au Moyen-Âge.

À titre d'exemple très instructif, étudions la gamme majeure bâtie sur le système de Zarlino. Elle va nous conduire à la notion d'intervalle juste et naturel.

## La gamme selon Zarlino - intervalles naturels

De tout temps, les compositeurs et philosophes érudits se sont interrogés sur les valeurs à attribuer aux intervalles et sur la construction des modes. De nombreux écrits nous sont parvenus, relatant les recherches de quelques-uns d'entre eux depuis l'antiquité grecque jusqu'à nos jours.

**Giuseffo Zarlino** (1517-1590) est l'un d'entre eux. Compositeur italien de la Renaissance, il a mené des études approfondies sur les modes de l'antiquité grecque, issus des enseignements de Pythagore. Il leur reprochait d'avoir des tierces dissonantes et a été amené à proposer un ajustement des intervalles qui assure la justesse des tierces principales. La notion de gamme de 7 notes n'existait pas alors, et il travaillait sur des tétracordes ou hexacordes (4 ou 6 notes successives).

Zarlino se réfère aux travaux de l'astronome grec **Claude Ptolémée** (vers 90 - 168) exposés dans son traité de musicologie *Harmoniká*, dans lequel il défend des intervalles musicaux basés sur des proportions mathématiques.



Portrait de Giuseffo Zarlino, 1599  
Merci à Musée international et bibliothèque de la Musique de Bologne

On ne sait pas si le système de Zarlino a été appliqué en pratique car il est resté surtout théorique, mais il a alimenté réflexions et expérimentations à ce sujet. Au 16<sup>e</sup> siècle, on employait surtout le tempérament mésotonique.

Oublié par la suite, le système de Zarlino a retrouvé de l'intérêt au 19<sup>e</sup> siècle avec le physicien allemand **Hermann von Helmholtz** (1821 - 1894). Celui-ci étudie les lois acoustiques et propose une **gamme naturelle basée sur des intervalles issus des résonances physiques naturelles**, afin de respecter une certaine perfection harmonique dans la justesse des intervalles. C'est le système de Zarlino renouvelé dans une gamme de 7 notes, et conforté par les lois physiques des harmoniques, d'où son nom de **gamme de Zarlino**, qu'il serait plus juste de nommer gamme de Helmholtz.



Hermann von Helmholtz  
Merci à Wikipedia

Lorsqu'une note tenue est émise, le son contient un son fondamental accompagné de résonances physiques naturelles appelées **sons harmoniques** de cette note. Physiquement, les sons harmoniques sont caractérisés par la valeur typique de leur fréquence: elle est un multiple de la fréquence du son de base (*voir chapitre 5*). Du moins en théorie, car en pratique on a mis en évidence un léger phénomène d'**inharmonicité** (écart par rapport à la valeur multiple dans le cas des cordes tendues - *voir plus bas*).

## Harmoniques naturelles de DO

Voici, dans le tableau II ci-dessous, les harmoniques d'un son de base, DO1, fixé soit à 64 Hz, soit à 66 Hz à titre d'exemple. Le nombre de la première ligne indique le numéro d'ordre de l'harmonique, mais il est également le facteur par lequel il faut multiplier la fréquence de base pour obtenir la fréquence de l'harmonique.

*Tableau II: Harmoniques naturelles de DO1. Le nombre de la première ligne indique le numéro d'ordre de l'harmonique, mais il est également le facteur qui donne la fréquence de l'harmonique, en le multipliant par la fréquence de base.*

*On peut repérer l'accord parfait majeur (vert sombre), l'accord parfait mineur (marron) et les 5 notes de la gamme pentatonique (en gras dans l'octave 4).*

<b>Rapport des fréquences</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>Valeur de la fréquence (base DO1=66)</b>	66	132	198	264	330	396	462	528	594	660	726	792	858	924	990	1056	1122	1188
<b>Valeur de la fréquence (base DO1=64)</b>	64	128	192	256	320	384	448	512	576	640	704	768	832	896	960	1024	1088	1152
<b>Nom de la note</b>	<b>DO1</b>	DO2	SOL2	<b>DO3</b>	<b>MI3</b>	<b>SOL3</b>	(sib)	<b>DO4</b>	<b>RÉ4</b>	<b>MI4</b>	(fa#)	<b>SOL4</b>	(sol#)	(sib)	<b>SI4</b>	<b>DO5</b>	(do#)	<b>RÉS</b>

Les sons harmoniques, que l'oreille entend clairement superposés à la note de base, ont depuis longtemps attiré l'attention dans la pratique vocale, instrumentale et spirituelle. Ils sont exploités dans le chant harmonique ou diphonique. Ils sont à la base de l'accordage d'instruments comme le violon ou le piano.

Les **intervalles naturels** sont ceux qui naissent entre les sons harmoniques. La gamme de Zarlino est construite sur la base de ces intervalles. Examinons-les en revenant au tableau II.

***Note de lecture:** Les paragraphes écrits en retrait et en petits caractères comme celui-ci sont des développements techniques que vous pouvez sauter sans inconvénients, pour une lecture plus fluide.*

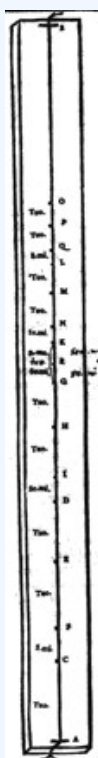
*J'ai donné deux valeurs à la fréquence de DO1, à titre d'exemples. La valeur 66 hertz est très proche de la fréquence 65,4 qui est celle du DO1 dans la gamme tempérée examinée plus haut (251,63/4). La fréquence de l'harmonique 12 est 12 fois plus grande, soit 792 Hz. C'est un SOL4 (4<sup>e</sup> ligne).*

*L'autre valeur de DO1 choisie est 64 Hz (3<sup>e</sup> ligne), qui a eu la faveur de physiciens dès le 18<sup>e</sup> siècle (par exemple **Joseph Sauveur**) et du compositeur **Giuseppe Verdi** au 19<sup>e</sup> siècle, sous prétexte qu'il est une puissance de 2 (2x2x2x2x2x2) et qu'il apparait donc comme plus scientifique (voir chapitre suivant).*

La suite de ces harmoniques inclut des notes qui sont constitutives de la gamme majeure, et

d'autres qui ne le sont pas. Pour ces dernières, la note la plus proche est indiquée entre parenthèses dans le tableau.

## Cents, fréquences et longueurs de corde



Dans le tableau II, j'ai exprimé les intervalles en fréquences et non en cents qui sont pourtant plus parlant dans une gamme! Et bien, je le ferai plus loin.

Toutefois, ce qui vient en premier dans l'étude des intervalles sont les rapports de fréquence, comme il apparaît dans le tableau II des harmoniques. Historiquement, le rapport entre les notes était le seul moyen physique de mesurer les intervalles. Comment les anciens pouvaient-ils mesurer des fréquences sans appareil électronique?

Tout comme ses prédécesseurs grecs, médiévaux et ses contemporains, Zarlino se servait d'instruments à cordes, les **monocordes**, conçus dans ce but. Ils étaient faits d'une corde tendue entre les deux extrémités d'une planchette (voir figure ci-contre). Un chevalet mobile, sorte d'arête, partageait la corde en deux. La hauteur des notes émises par chacune des portions de corde de part et d'autre du chevalet est en relation directe avec leur longueur.

Aussi, **on mesurait un intervalle entre deux notes par le rapport, non pas des fréquences, mais des longueurs de corde correspondantes**. Or, il a été montré plus tard par des physiciens tels que Helmholtz que **le rapport des fréquences est exactement l'inverse des rapports de longueur**. Autrement dit, si vous divisez la longueur de la corde par 2, sa fréquence sonore est multipliée par 2 et vous obtenez l'octave! Dans ses ouvrages, Zarlino rapporte la longueur des cordes et les compare en faisant leur rapport. 1/2 pour l'octave, 2/3 pour la quinte, etc.

*IMAGE: Un monocorde, d'après les écrits de Zarlino*

## La gamme à 5 notes (ou gamme pentatonique)

Dans ce tableau II des harmoniques, on remarque la succession de 5 notes de la gamme de l'octave 4: **DO, RÉ, MI, SOL, SI**.(tableau III)

*De ces notes de l'octave 4, on déduit les mêmes notes à l'octave 3, afin de les comparer avec cette même octave 3 de la gamme tempérée dans le [tableau I](#). Pour cela, on divise les fréquences par 2 (pour obtenir RÉ3 et SI3).*

*Tableau III: Les intervalles de la gamme majeure de Zarlino, par rapport à la note de base*

<b>Intervalles par rapport à la tonique en cents</b>	0	204	<b>386</b>	498	<b>702</b>	884	1088	12
<b>Intervalles par rapport à la tonique en rapport de fréquences (fractionnaire)</b>	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
<b>Notes</b>	<b>DO3</b>	<b>RÉ3</b>	<b>MI3</b>	<b>FA3</b>	<b>SOL3</b>	<b>LA3</b>	<b>SI3</b>	<b>DO4</b>
<b>Fréquences des notes en hertz repère LA 440</b>	264	297	330	352	396	<b>440</b>	495	528
<b>Fréquences des notes en hertz repère DO 256</b>	<b>256</b>	288	320	341,3	384	426,6	480	512

*Calcul des intervalles: Pour calculer l'intervalle entre une note donnée et la note de base DO3, on fait le rapport entre sa fréquence et celle du DO3 (voir le [tableau III](#)). Par exemple, le rapport entre le MI 3 (harmonique 5) et le DO 3 (harmonique 4) est 5/4.*



Remarquons qu'à ce stade, nous avons obtenu seulement 5 notes. Les deux notes manquantes FA et LA ne sont pas des harmoniques du DO. On obtient donc une gamme à 5 notes, dite **pentatonique**.

### DO - RÉ - MI - SOL - SI - (DO)

Puisque les intervalles sont définis par des harmoniques, c'est-à-dire des nombres entiers par rapport au son fondamental, leurs valeurs sont des **fractions de nombres simples**:

**quinte: 3/2** (SOL, harmonique 3 de DO)

**tierce majeure: 5/4** (MI, harmonique 5 de DO)

Le nom de quinte provient de la position de la note correspondante (SOL) au cinquième degré de la gamme. Le nom de tierce indique le troisième degré.

De plus, l'intervalle entre deux harmoniques consécutives est une fraction dont le numérateur est plus grand d'une unité que le dénominateur:  $(2+1)/2$  pour la quinte;  $(4+1)/4$  pour la tierce. C'est ce que les anciens appelaient un rapport **épimore** ou **superparticulaire**. Cette simplicité des nombres est devenue un principe dans la recherche des autres intervalles; en langage moderne, on pourrait dire une sorte d'esthétique.

### Deux accords parfaits majeurs naturels

Si à la tierce majeure et la quinte juste, nous ajoutons la tonique, alors nous obtenons l'**accord parfait majeur**. Il est parfaitement apparent dans la succession des harmoniques du **tableau II**, à l'octave 4 où se succèdent DO<sub>4</sub>, MI<sub>4</sub> et SOL<sub>4</sub>.

Un autre accord parfait majeur est naturellement présent dans cette gamme de 5 notes, celui de SOL (SOL - SI - RÉ), avec les mêmes intervalles naturels.

*Vérifions que cet accord a bien la structure d'un accord parfait majeur:*

**SOL 4**, son fondamental, harmonique 12

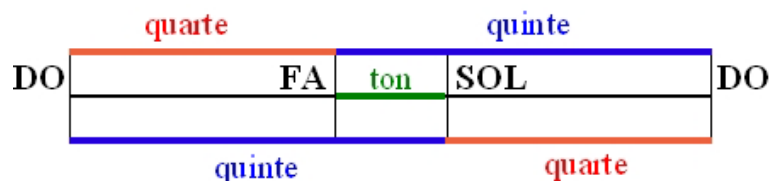
**SI 4**, harmonique 15, soit un intervalle  $15/12=5/4$ , qui est bien la tierce majeure.

**RÉ 5**, harmonique 18, soit un intervalle  $18/12=3/2$ , qui est bien la quinte juste.

Les harmoniques 10, 12 et 15 donnent l'**accord parfait mineur**: MI, SOL, SI.

### La symétrie de la quarte et de la quinte

Si l'on veut disposer d'une gamme majeure à 7 notes, dite **heptatonique**, on doit ajouter à ces 5 notes naturelles une quarte (FA) et une sixte (LA).



*La symétrie de la quinte et de la quarte entre les deux extrémités de l'octave*

Remarquons que la quinte SOL sépare l'octave en deux parties: de DO à SOL (une quinte, intervalle de 5 notes consécutives) et de **SOL à DO** (une quarte, intervalle de 4 notes consécutives). C'est donc là qu'apparaît l'intervalle de **quarte**.

On trouve le **FA** en descendant d'une quinte à partir du DO supérieur. Un même intervalle de quarte se trouve entre DO<sub>3</sub> - FA et entre SOL - DO<sub>4</sub>.

**Calcul de l'intervalle DO – FA:**

*Le DO supérieur a pour valeur 2. Reportons un intervalle de quinte (3/2) en descendant. Nous arrivons à FA dont la hauteur par rapport au DO inférieur est:  $2/(3/2)=4/3$*

**La quarte est définie par sa valeur de  $4/3$**  qui, remarquons-le, est également un intervalle épimore:  $(3+1)/3$ .

Pour obtenir le **LA** (sixte de DO), on construit un troisième accord parfait majeur sur la base du FA (FA, LA, DO).

**Calcul de l'intervalle DO – LA:**

**FA**, son fondamental:  $4/3$

**LA**, tierce de FA:  $(4/3) \times (5/4) = 5/3$

**DO**, quinte de FA:  $(4/3) \times (3/2) = 2$

Après la quinte ( $3/2$ ), la tierce ( $5/4$ ) et la quarte ( $4/3$ ), on trouve que **la sixte est définie par le rapport  $5/3$**  (tableau III).

## La gamme naturelle complète

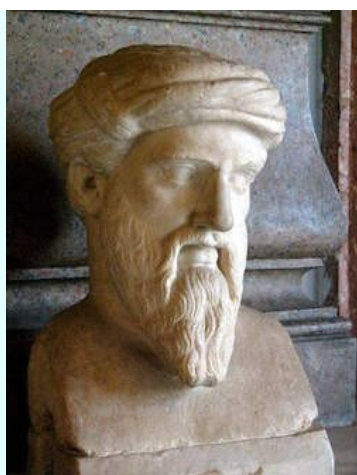
Nous disposons à présent de toutes les notes de la gamme majeure naturelle de Helmholtz/Zarlino. Il résulte de cette recherche que **la gamme de Zarlino est entièrement générée par les harmoniques 3 et 5**. Le 3 engendre la quinte, puis la quarte par renversement de la quinte, et le 5 engendre la tierce et la sixte.

Alors nous pouvons nous poser la question: en quoi cette gamme diffère-t-elle de la gamme tempérée?

Pour faciliter la comparaison de ces nouveaux intervalles, il est judicieux de convertir les valeurs fractionnaires en cents (voir le tableau III). On constate immédiatement des différences dans la définition du **ton**: de valeur 200 cents dans la gamme tempérée, il passe à **204 cents** dans la gamme de Zarlino. Quant à la quinte SOL, elle est de **702 cents** au lieu des 700 cents de la gamme tempérée. La tierce majeure est beaucoup plus petite, **386 cents** au lieu de 400.

Cela a-t-il une incidence sur la **justesse** de l'intonation vocale et instrumentale? Je reporte cette discussion un peu plus loin, afin de lui inclure la gamme dite de Pythagore qu'il est temps de présenter ci-dessous.

## La gamme d'après Pythagore : science des nombres et du cosmos



*Buste de Pythagore  
Musée du Capitole, Rome  
Photo Galilea, Merci à  
Wikipedia*

### Pythagore, sage initié de la Grèce antique

Les compositeurs, du Moyen-Âge au 16<sup>e</sup> siècle, utilisaient les modes liturgiques reposant sur un système d'intervalles dérivé des études de Pythagore.

**Pythagore** a vécu en Grèce au 6<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ (vers 580 av.J.C. - vers 495 av.J.C.). Les collégiens connaissent bien le théorème de Pythagore sur les triangles rectangles, mais ce qu'ils ignorent, ainsi que la plupart de leurs professeurs, c'est qui était réellement Pythagore, et pourquoi il s'est impliqué dans l'étude des triangles et dans celle des gammes. Or il mérite d'être plus amplement connu, aussi vais-je donner quelques informations à son sujet.

Pythagore, sage et initié, a fondé une école des mystères qui accueillait de nombreux disciples à Crotoné dans le Sud de l'Italie, qui faisait alors

partie de la Grande Grèce. Auparavant il avait voyagé et passé 22 ans de sa vie en Égypte où il avait été accueilli par le pharaon Amosis et initié aux connaissances égyptiennes par les prêtres. Au moment de l'invasion de l'Égypte par les Perses, il fut fait prisonnier et emmené à Babylone où il passa une douzaine d'années au contact de la philosophie de Zoroastre. De ces formations, il a retiré sa propre doctrine et ses connaissances sur l'être humain, l'âme, le cosmos, la géométrie, les nombres.

## Pythagore et les nombres

À ses disciples, Pythagore enseignait que le nombre n'est pas une quantité abstraite comme le considéraient les profanes, mais un principe vivant et sacré, issu de l'harmonie cosmique. Les nombres représentent les forces divines en action dans le monde, dans l'être humain et dans la musique. La tradition rapporte que le cosmos est engendré par **quatre nombres essentiels: de 1 à 4**. En les additionnant ou les multipliant, on retrouve tous les autres. D'autres chiffres ont une grande importance: **le 7, le 10 et le 12**.

Le **1** est le nombre de l'origine, l'Unité primordiale, l'Essence de Dieu, la Monade. Le monde, malgré sa diversité, n'est qu'une unité. Toute action d'un individu réagit sur l'Univers entier, de même qu'un individu subit les influences de l'Univers entier. L'Être humain n'est pas séparé de l'Univers, de même que la goutte d'eau est une partie de l'océan. L'être humain se présente selon différentes facettes, certaines qu'il aime et d'autres qu'il déteste, mais s'il veut évoluer, il doit s'élever dans une vision globale et réunir ses facettes bonnes et mauvaises en une seule unité (*voir aussi l'article [L'enfant intérieur et le langage des émotions](#)*).

Le **2** exprime la dualité qui consiste à se dédoubler pour se voir, se contempler. C'est la Dyade qui représente nos polarités, en premier la polarité masculin/féminin, qui est la faculté créatrice et régénératrice (*voir article [Masculin et féminin](#)*). En eux-mêmes, les chiffres pairs portent une tonalité féminine. Se dédoubler, c'est prendre de la distance par rapport à soi, mais on reste soi. **Le 2 engendre l'octave**, qui n'est que la même note répétée à un autre niveau. Pour en sortir, le 2 doit être fécondé par le 3, premier nombre impair, de tonalité masculine.

Le **3** exprime la manifestation, la création, le monde réel. C'est la Triade ou Trinité, le père, la mère et le fils, que l'on trouve non seulement dans la doctrine chrétienne (le Saint-Esprit est l'aspect féminin, la sève de Dieu qui coule dans le corps, bien que cela n'ait pas été conservé comme tel par l'église), mais également dans les théogonies indienne, chinoise, égyptienne, celte. C'est la constitution ternaire de l'être humain, corps physique, âme et esprit. **Le 3 engendre la quinte**. C'est la première note qui se distingue de la note de base, et qui, comme on va le voir, engendre à elle seule les 7 degrés de la gamme et les 12 notes chromatiques.

Le **7** est un développement de la manifestation qui exprime la loi de l'évolution, la réalisation complète, l'union du 3 et du 4, de l'homme et de son aspect divin. Le **7** a été projeté dans les 7 jours de la semaine, les 7 couleurs de l'arc-en-ciel qui sont en fait la représentation symbolique des 7 rayons créateurs de l'univers (*voir article [La couleur](#)*), **les 7 notes de la gamme et le 7 modes de Pythagore**.

Le **10** représente la Décade sacrée, les dix doigts de la main, la perfection.

Un aspect plus évolué de l'univers et de l'être humain repose sur la structure du **12**. On le trouve dans les 12 mois de l'année, les 12 constellations zodiacales, et **les 12 degrés chromatiques**. La somme  $3+7+12=22$  est également un nombre sacré, représenté dans les 22 lames du tarot, elles-mêmes traduisant les couches que l'être humain doit traverser et intégrer pour devenir un initié.

Ces nombres apparaissent également dans le nombre de chakras actifs dans l'être humain, traditionnellement 7, mais qui deviennent progressivement 8, puis 12, puis 22 au fur et à mesure du développement spirituel du disciple (*voir article [Les corps subtils et les chakras](#)*).

## De la Grèce antique au Moyen-Âge et à la musique arabe contemporaine

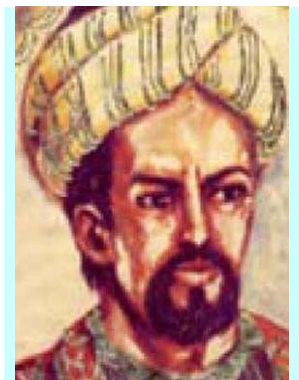
À l'époque de Pythagore et au Moyen-Âge, on ne parlait pas de gamme, notion qui était inconnue, mais de tétracordes et d'hexacordes. On ne sait pas jusqu'à quel point Pythagore a lui-même poussé son étude des intervalles. Beaucoup parmi ses disciples se sont emparé du problème et ont cherché à condenser les lois cosmiques des nombres dans la gamme, même plusieurs siècles après. De nombreux écrits rapportent leurs tentatives et leurs résultats: ceux de Platon, de Boèce, d'Euclide. Or dans ces écrits, plusieurs systèmes s'affrontent.

Le pythagoricien *Archytas* retient les intervalles de la forme  $2/1$  (octave),  $3/2$  (quinte),  $4/3$  (quarte) que nous avons rencontrés plus haut dans cet article. Il les étend à tous les intervalles de rapports **épimores**  $(n+1)/n$ , autrement dit du rapport de 2 chiffres qui se suivent:  $5/4$  (tierce majeure),  $6/5$  et  $7/6$  (tierces mineures). On va aussi trouver des tons de plusieurs grandeurs:  $9/8$ ,  $10/9$  et  $16/15$ , plusieurs demi-tons tels que  $16/15$  et  $25/24$  et enfin des intervalles plus petits ou micro-intervalles.

Le **quart de ton** (attention, ce n'est pas le quart d'un ton!) était utilisé dans certaines échelles de la musique grecque antique. Il était appelé *diesis*. Son étendue varie selon les théoriciens:  $36/35$ ,  $28/27$ ,  $39/38$ ,  $40/39$ ,  $31/30$ ,  $32/31$ . Zarlino a appuyé sa théorie sur ce système.

Un autre disciple, *Philolaos*, s'appuyait sur les quintes. Il semble que c'est ce système, explicité 6 siècles après la période de Pythagore par *Nicomaque de Gérase*, qui constitue ce qu'on appelle dorénavant le système diatonique pythagoricien.

Les deux théories des pythagoriciens (épimores et quintes) ont diffusé à partir de la Grèce, et ont été reprises, étudiées, transformées, complétées en Turquie, Perse, Asie centrale. Elles sont une des sources des musiques qu'on appelle maintenant arabes. Par exemple, le grand musicien persan **Ziryab** (789 - 857) les aurait connues. En quittant Bagdad pour s'installer en Andalousie, il est à l'origine de la musique arabo-andalouse, la Nouba.



Abu Hassan Ali ben Nafi dit Ziryab  
Merci à Abdallah Bouchenak Khelladi

### Le cycle des quintes

La gamme élaborée au Moyen-Âge d'après Pythagore est bâtie, comme celle de Zarlino, sur les résonances physiques naturelles, les harmoniques. Mais elle ne retient que les deux premières harmoniques, 2 (octave) et 3 (quinte), et non l'harmonique 5 (tierce) comme Zarlino le fera plus tard. **Les deux nombres 2 et 3 ont une importance fondamentale, ainsi que leurs combinaisons qui vont générer tous les intervalles. En premier lieu l'intervalle  $3/2$  qui est la quinte.**

Notons en passant combien ces gammes qualifiées de naturelles reposent sur des études réfléchies et élaborées.

Tableau IV: Suite des quintes à partir de DO

Numéro d'ordre	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Rapport	$(2/3)^2 = 4/9$	$2/3$	1	$3/2$	$(3/2)^2 = 9/4$	$(3/2)^3 = 27/8$	$(3/2)^4 = 81/16$	$(3/2)^5 = 243/32$	$(3/2)^6 = 729/64$
Note	SI <sup>b</sup> 1	FA <sup>2</sup>	DO <sup>3</sup>	SOL <sup>3</sup>	RÉ <sup>4</sup>	LA <sup>4</sup>	MI <sup>5</sup>	SI <sup>5</sup>	FA <sup>#</sup>

Si l'on part de DO3 en position 0, on monte de quinte en quinte en multipliant par 3/2, et on descend en divisant par 3/2, c'est-à-dire en multipliant par 2/3, ce qui donne:

On obtient la gamme majeure pythagoricienne en rassemblant les 7 notes de -1 à 5 dans la même octave (tableau V).

*Tableau V: Les intervalles de la gamme majeure pythagoricienne par rapport à la note de base*

Intervalles par rapport à la tonique	En cents	0	204	<b>408</b>	498	<b>702</b>	906	1110	1200
	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	9/8	81/64	4/3	3/2	27/16	243/128	2
Notes		<b>DO3</b>	<b>RÉ3</b>	<b>MI3</b>	<b>FA3</b>	<b>SOL3</b>	<b>LA3</b>	<b>SI3</b>	<b>DO4</b>
Fréquences des notes en hertz repère LA 440		260,74	293,33	330	347,65	391,11	<b>440</b>	495	521,48

*Calcul des notes de la gamme: FA3 vient de FA2 en multipliant par 2, ce qui élève d'une octave: de 2/3 à 4/3. RÉ3 vient de RÉ4 en divisant par 2, ce qui abaisse d'une octave: de 9/4 à 9/8. MI3 vient de MI5 en divisant par 4, soit de 81/16 à 81/64. SI3 vient de SI5 en divisant par 4, soit 243/128.*

## Comparaison des 3 gammes majeures et de leurs intervalles

Nous sommes maintenant en mesure de comparer ces gammes, d'évaluer leurs différences, leur importance et leur intérêt, en rassemblant les tableaux I, III et V en un seul tableau récapitulatif synthétique, complété (tableau VI).

*Les chiffres et vous: Ne vous laissez pas effrayer par la complexité du tableau et l'abondance de chiffres, car ceux-ci ne sont pas indispensables pour en comprendre les conclusions. Je les rapporte pour ne pas en priver ceux qui ont cette culture des chiffres et qui peuvent les utiliser dans leurs propres recherches et applications.*

» Ceux qui sont rebutés par cet aspect peuvent se rendre immédiatement à la section la gamme et la sensibilité humaine.

*Quant à ceux qui veulent comprendre la démarche sans entrer dans le détail des chiffres, je les guiderai à travers ce tableau en prenant seulement quelques exemples caractéristiques, au fur et à mesure de l'article. Voici pour commencer une présentation du tableau:*

**Explications pour lire le tableau:** Il est divisé en trois sections correspondant à chacune des gammes (tempérée, Helmholtz/Zarlino, Pythagore). Sur les premières lignes de chacune des sections, on retrouve les données des tableaux I, III, et V dans un ordre un peu différent:

- **Nom des notes:** Sur la première ligne de chacune des sections, lignes 1, 11, 21.
- **Lignes 2, 12, 22:** Fréquences de ces notes pour chacune des gammes. Je les ai calées sur le repère international du LA3 de **440 hertz**. Ces fréquences peuvent être utiles à ceux qui veulent générer des sons électroniques.
- **Lignes 3, 13, 23:** Autres valeurs de fréquences. Je le ai calées sur **DO 264**. J'ai pris comme référence un DO et non un LA, car cela est peut-être plus instructif pour l'oreille de comparer les différentes gammes avec comme référence commune la tonique DO. Avec un DO à 264 Hz, cela donne un LA proche de 440 dans la gamme tempérée. Dans le cas de la gamme de Zarlino, ces deux lignes (12 calée sur LA 440 et 13 calée sur DO 264) sont

identiques.

- **Lignes 4, 14 et 24.** Les fréquences sont calées sur **DO 256**, le diapason choisi par certains physiciens et compositeurs comme plus "scientifique".
- **Lignes 5, 15, 25:** les valeurs des intervalles par rapport à la tonique exprimées en fraction.
- **Lignes 6, 16, 26:** les mêmes valeurs exprimées sous forme décimale, afin de les comparer plus facilement.
- **Lignes 7, 17, 27.** Enfin, les valeurs des intervalles en cents, telles qu'elles ont été présentées dans les tableaux précédents, seront probablement bien plus parlantes encore.
- Les lignes suivantes seront expliquées plus loin.

**Note mathématique. Comment passer d'une valeur fractionnaire à une valeur en cents**

Si les fréquences de 2 sons sont  $f_1$  et  $f_2$ , leur intervalle a pour mesure le rapport  $f_1/f_2$ , exprimé soit en valeur fractionnaire, soit en valeur décimale en effectuant le calcul de la fraction.

Le même intervalle peut être exprimé en cents (une octave = 1200 cents). Pour cela, il faut utiliser la fonction **logarithme** qui permet de transformer des rapports qu'on multiplie et divise, en intervalles qu'on ajoute ou retranche. L'intervalle entre  $f_1$  et  $f_2$  se calcule par la formule

$I(\text{cents}) = \log\left(\frac{f_1}{f_2}\right) \times \frac{1200}{\log 2}$ , où 1200 et  $\log 2$  sont des coefficients d'échelle qui permettent de garantir que l'intervalle d'octave, de rapport  $f_1/f_2=2$ , fait bien 1200 cents.

Tableau VI: Tableau récapitulatif des 3 gammes majeures et de leurs intervalles

Gamme tempérée										
1	Notes	DO3	RÉ3	MI3	FA3	SOL3	LA3	SI3	DO4	
2	Fréquences des notes, base LA 440	261,626	293,665	329,628	349,218	391,994	<b>440</b>	493,884	523,252	
3	Fréquences des notes, base DO 264	<b>264</b>	296,329	332,619	352,387	395,55	443,992	498,366	528	
4	Fréquences des notes, base DO 256	<b>256</b>	287,350	322,540	341,709	383,565	430,538	483,264	512	
5	Intervalles par rapport à la tonique	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	$2^{2/12}$	$2^{4/12}$	$2^{5/12}$	$2^{7/12}$	$2^{9/12}$	$2^{11/12}$	2
6		En rapport de fréquences (décimal)	1	1,12246	<b>1,25992</b>	1,3348	<b>1,49830</b>	1,68179	1,88775	2
7		En cents	0	200	<b>400</b>	500	<b>700</b>	900	1100	1200
9	Intervalles par rapport à la note précédente	En rapport de fréquences (décimal)	1	1,1225	1,1225	1,0595	1,1225	1,1225	1,1225	1,0595
10		En cents	0	200	200	100	200	200	200	100

<i>Gamme de Helmholtz/Zarlino</i>										
11	Notes	DO3	RÉ3	MI3	FA3	SOL3	LA3	SI3	DO4	
12	Fréquences des notes, base LA 440	264	297	330	352	396	<b>440</b>	495	528	
13	Fréquences des notes, base DO 264	<b>264</b>	297	330	352	396	440	495	528	
14	Fréquences des notes, base DO 256	<b>256</b>	288	320	341,325	384	426,650	480	512	
15	Intervalles par rapport à la tonique	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
16		En rapport de fréquences (décimal)	1	1,1250	<b>1,2500</b>	1,3333	<b>1,5000</b>	1,6666	1,8750	2
17		En cents	0	204	<b>386</b>	498	<b>702</b>	884	1088	1200
18	Intervalles par rapport à la note précédente	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15
19		En rapport de fréquences (décimal)	1	1,1250	1,1111	1,0666	1,1250	1,1111	1,1250	1,0666
20		En cents	0	204	182	112	204	182	204	112

<i>Gamme d'après Pythagore</i>										
21	Notes	DO3	RÉ3	MI3	FA3	SOL3	LA3	SI3	DO4	
22	Fréquences des notes, base LA 440	260,74	293,33	330	347,65	391,11	<b>440</b>	495	521,48	
23	Fréquences des notes, base DO 264	<b>264</b>	297	334,125	352	396	445,5	501,188	528	
24	Fréquences des notes, base DO 256	<b>256</b>	288	323,994	341,325	384	432	485,990	512	
25	Intervalles par rapport à la tonique	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	$\frac{3^2}{2^3}$ 9/8	$\frac{3^4}{2^6}$ 81/64	$\frac{2^2}{3}$ 4/3	3/2	$\frac{3^3}{2^4}$ 27/16	$\frac{3^5}{2^7}$ 243/128	2
26		En rapport de fréquences (décimal)	1	1,1250	<b>1,2656</b>	1,3333	<b>1,5000</b>	1,6875	1,8984	2
27		En cents	0	204	<b>408</b>	498	<b>702</b>	906	1110	1200
28	Intervalles par rapport à la note précédente	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	$\frac{3^2}{2^3}$ 9/8	9/8	$\frac{2^8}{3^5}$ 256/243	9/8	9/8	9/8	256/243
29		En rapport de fréquences (décimal)	1	1,1250	1,1250	1,0535	1,1250	1,1250	1,1250	1,0535
30		En cents	0	204	204	90	204	204	204	90

## Intervalles entre notes successives

Au lieu de considérer l'intervalle d'une note par rapport au DO de base, donc entre DO et RÉ, puis DO-MI, DO-FA, il est instructif de comparer les intervalles de ces trois gammes entre notes successives DO-RÉ, RÉ-MI, MI-FA etc. On les trouve dans les lignes inférieures du tableau pour chacune des gammes:

- Lignes 18 et 28: en rapports fractionnaires (sans objet pour la gamme tempérée).
- Lignes 9, 19 et 29, en valeur décimale.
- Lignes 10, 20 et 30, les mêmes en **cents**. Remarquons que si on ajoute les valeurs des intervalles successifs en cents, on obtient bien les valeurs des intervalles par rapport à DO: la ligne 10 donne la 7. La ligne 20 donne la 17 et la ligne 30 donne la 27.

## Les tons et demi-tons variables et le comma syntonique

Bien que dans toutes les gammes, les notes consécutives sont séparées par des tons et des demi-tons selon un schéma fixe qui est la définition même de la gamme majeure, on peut constater que **les tons et les demi-tons ont des valeurs différentes selon les gammes**.

Dans une **gamme tempérée**, les demi-tons sont obtenus par la division de l'octave en 12 parties égales. **Un demi-ton vaut 100 cents et un ton vaut 2 demi-tons, soit 200 cents**. C'est mathématique et inexorable.

Dans la **gamme pythagoricienne**, la ligne 30 du tableau montre clairement les **deux sortes d'intervalles, le ton de 204 cents (ou 9/8), dit ton diatonique, et le demi-ton de 90 cents (256/243)**. En conséquence, on note que contrairement à la gamme tempérée, le demi-ton est plus petit que la moitié du ton. Il ne faut pas se laisser influencer par la terminologie.

Dans la **gamme de Zarlino**, ça se complique. La ligne 20 du tableau fait apparaître, non plus deux mais **trois types d'intervalles**.

Une seule valeur pour le **demi-ton: 112 cents ou 16/15**, nettement plus grand que celui de la gamme pythagoricienne (90 cents) et que celui de la gamme tempérée (100 cents).

Le ton peut prendre deux valeurs:

- le grand ton de **204 cents ou 9/8** est le **ton majeur**. "Majeur" ne signifie pas autre chose que grand ton, je le noterai **T**. Il est le même que le ton diatonique de la gamme pythagoricienne.
- Le petit ton de **182 cents ou 10/9** est dit "**ton mineur**" (noté **t**).

La différence entre les deux tons est  $(10/9)/(9/8)=80/81$  ou **21,5 cents**. Elle est nommée un **comma syntonique** (ne pas confondre avec le comma pythagoricien entre DO# et RÉ<sup>b</sup> examiné plus bas).

Au-delà des chiffres, les différences de tons et demi-tons d'une gamme à l'autre semblent minimes. Sont-elles perceptibles à l'oreille? Oui, plus ou moins selon la sensibilité de l'auditeur et son entraînement. S'il est difficile de percevoir un intervalle de 4 cents, 10 cents sont déjà tout à fait audibles.

## Quintes et quartes

Les différences de tons et demi-tons se répercutent dans les autres intervalles, en particulier dans la quinte, la quarte et la tierce qui jouent des rôles majeurs dans le rendu sonore des mélodies.

Rappelons qu'il existe une symétrie de la quarte et de la quinte insérées dans l'octave. Un ton central (FA-SOL) y est encadré de deux quartes.



Dans la gamme tempérée, le ton de **200 cents** est encadré de deux **quartes** de **500 cents**, soit le schéma:

$500 \text{ (quarte)} - 200 \text{ (ton)} - 500 \text{ (quarte)} = 1200$

Cela donne une **quinte** de **700 cents**.

Dans les systèmes de Zarlino et Pythagore, on a exactement le même schéma:

$498 + 204 + 498 = 1200$

La quinte vaut **702 cents**.

## Tierces

### Tierce majeure

La tierce majeure DO-MI de deux tons vaut **400 cents** dans la gamme tempérée, et **408 cents** ou **81/64** dans la gamme pythagoricienne et **386 cents** ou **5/4** dans la gamme de Zarlino. Cette dernière est nettement plus petite que les précédentes, **-14 cents** par rapport à la gamme tempérée et **-22 cents** par rapport à la gamme pythagoricienne.

**C'est l'une des différences les plus importantes avec la gamme de Pythagore et la raison essentielle des modifications de Zarlino.** Zarlino tenait au rapport 5/4 pour la tierce, qui la distingue de la tierce pythagoricienne (81/64) et, notons-le, de la tierce tempérée.

### Tierce mineure

La tierce mineure est l'intervalle MI-SOL, un ton + un demi. Elle vaut: **300 cents** dans la gamme tempérée ; **294 cents** ou **32/27** dans la gamme pythagoricienne et **316 cents** ou **6/5** dans la gamme de Zarlino. À l'inverse de la tierce majeure elle est plus grande de **+16 cents** par rapport à la gamme tempérée et **+ 22 cents** par rapport à la gamme pythagoricienne.

*Pour apprécier la différence entre les tierces, le mieux est d'écouter: successivement la tierce majeure de Zarlino dite juste (386 cents), la tierce majeure tempérée (400), plus grande, et la tierce pythagoricienne (408) :*

*Tierces majeures*

Qu'avez-vous perçu? Vous me direz peut-être qu'il n'y a pas là de quoi en faire tout un article.

Cependant, pour estimer cette différence à sa juste importance, il faut tenir compte de deux phénomènes. Le premier est que la sensibilité de l'oreille a été émoussée par l'habitude d'écouter de la musique tempérée, et peut-être encore plus par une protection instinctive contre le monde bruyant dans lequel nous vivons.

Le deuxième est que ces différences sont amplifiées par des battements (variations régulières du volume sonore) qui surviennent lorsqu'on produit ensemble des notes qui ne sont pas dans un rapport harmonique. Sous ce point de vue, et selon l'opinion de certains, la gamme tempérée est fautive. Aussi, nous sommes à nouveau dans une période de recherche de **l'intonation juste, c'est-à-dire qui respecte le plus possible les intervalles naturels basés sur les harmoniques.**

Dans la pratique vocale et instrumentale, ces différences ont des implications que je vais tenter d'examiner. Toutefois, dans le souci d'être complet et d'expliquer certaines notions sur les demi-tons, je fais un passage par la gamme chromatique.

# Les demi-tons de la gamme chromatique et le comma pythagoricien

Nous avons défini les 7 notes de la gamme majeure. Il reste à définir les 5 autres notes sur les 12 que comporte l'échelle chromatique. Les mélodies ne restent pas figées sur les 7 notes de base et passent par des modulations où elles s'aventurent dans les chromatismes. Ces autres notes sont DO#, RÉ#, FA#, SOL# et LA# ou leurs équivalents avec les bémols.

Pour cela, il suffit d'étendre le procédé employé pour définir les 7 notes de base, ce qui va donner des réponses différentes pour chacune des gammes.

## Gamme tempérée: tous égaux

Dans le cas de la gamme tempérée, rien de plus simple. Un demi-ton est strictement un demi-ton de 100 cents. De cette manière, on place les notes intermédiaires bien au centre du ton. Le DO# et le RÉ $\flat$  sont identiques et placés à mi-chemin entre le DO et le RÉ (tableau VII).

## Gamme pythagoricienne: 2 demi-tons inégaux

La logique du cycle des quintes qui est à la base de la gamme de Pythagore fournit également les notes chromatiques.

### Le cycle des dièses

En continuant à monter de quinte en quinte au-delà du SI5, on génère FA#, DO#, SOL#, RÉ#, LA#.

Le premier dièse apparaît avec la 6<sup>e</sup> quinte construite à partir du DO3. C'est le **FA#** (voir plus haut le tableau des quintes). Le FA# sépare le ton FA-SOL en **2 demi-tons inégaux**, FA-FA# et FA#-SOL. Les résultats qui suivent sont synthétisés sur le tableau VII.

*Calcul du FA#:* Le FA#6 a pour valeur  $3^6/2^6 = 729/64$  (tableau IV). En le ramenant à l'octave 3, on génère le **FA#3**:  $3^6/2^9 = 729/512$

*Calcul de l'intervalle FA-FA#:* C'est le rapport des valeurs de FA# ( $3^6/2^9$ ) et de FA ( $2^2/3$ ), soit: **FA-FA#**:  $3^7/2^{11}$  ou  $(729/512)/(4/3) = 2187/2048 = 1,0679$  ou encore 114 cents.

L'intervalle FA-FA# est le plus grand. Il vaut **114 cents**. C'est le **demi-ton chromatique**. Situé entre 2 notes de même nom (FA et FA#), il est appelé **chromatique** comme si le dièse ajoute une couleur à la note.

La valeur de FA#-SOL est plus petite et vaut **90 cents**. C'est le **demi-ton diatonique**, qui se trouve déjà dans la même gamme entre MI et FA, ou SI et DO. Dans le mot *diatonique* il y a *dia-* qui signifie 2, donc "distinct", car il est situé entre deux notes de noms différents (FA# et SOL). Toutefois, l'origine du mot remonte à la distinction entre le système de Pythagore appelé diatonique et celui de Zarlino appelé syntonique.

**Ainsi le ton pythagoricien de 204 cents est la somme d'un demi-ton chromatique de 114 cents et d'un demi-ton diatonique de 90 cents.**

### Le cycle des bémols

De façon symétrique, en descendant de quinte en quinte, on génère SI $\flat$ , MI $\flat$ , LA $\flat$ , RÉ $\flat$ , SOL $\flat$ . Le **SI $\flat$**  se positionne entre LA et SI en créant 2 demi-tons inégaux. L'intervalle entre SI $\flat$  et SI est également un demi-ton chromatique (grand) et l'intervalle entre LA et SI $\flat$  est diatonique (petit).

*Calcul de l'intervalle SI $\flat$ -SI:* SI $\flat$  1 vaut:  $(2/3)^2 = 4/9$  (tableau IV) donc **SI $\flat$  3** vaut 16/9. L'intervalle entre SI $\flat$  3 et SI3 ( $243/128$ ) sera:  $(243/128)/(16/9) = 2187/2048$  ou  $3^7/2^{11}$

Tableau VII: Gamme chromatique, valeur des demi-tons

Gamme tempérée									
Notes		Do	Réb=Do#	Ré	Mib=Ré#	Mi	Fa	Solb=Fa#	Sol
Intervalle par rapport à la tonique	En rapport de fréquences (décimal)	1	<b>1,0595</b>	1,12246	1,18921	1,25992	1,3348	1,41421	1,49830
	En cents	0	<b>100</b>	200	<b>300</b>	400	500	<b>600</b>	700
Intervalles par rapport à la note précédente	En rapport de fréquences (décimal)	1	1,0595	1,0595	1,0595	1,0595	1,0595	1,0595	1,0595
	En cents	0	100	100	100	100	100	100	100

Gamme d'après Pythagore												
Notes		Do	Réb	Do#	Ré	Mib	Ré#	Mi	Fa	Solb	Fa#	Sol
Intervalle par rapport à la tonique	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1	$2^8/3^5$ 256/243	$3^7/2^{11}$ 2187/2048	$3^2/2^3$ 9/8	$2^5/3^3$ 32/27	$3^9/2^{14}$ 19683/16384	$3^4/2^6$ 81/64	$2^2/3$ 4/3	$2^{10}/3^6$ 1024/729	$3^6/2^9$ 729/512	$3/2$
	En cents	0	<b>90</b>	<b>114</b>	204	294	318	408	498	588	612	702
Par rapport à la note précédente	En rapport de fréquences (fractionnaire)	1		$3^7/2^{11}$	$2^8/3^5$		$3^7/2^{11}$	$2^8/3^5$		$2^8/3^5$	$3^7/2^{11}$	$2^8/3^5$
	En cents	0	90	<b>24</b>	90	90	24	90	90	90	<b>24</b>	90

### Intervalle SOL $\flat$ - FA#, le comma pythagorien

Des notes diésées et des notes bémolisées se trouvent intercalées dans le même ton à des endroits différents. Par exemple, entre le FA et le SOL, on a le FA# et le SOL  $\flat$ . Ces deux notes sont très proches, mais ne se superposent pas. Le SOL  $\flat$  est le plus bas et le FA# est plus haut d'un tout petit intervalle appelé **comma pythagorien**.

**Le comma pythagorien vaut  $3^{12}/2^{19} = 23,45$  cents.** C'est la différence entre le demi-ton chromatique et le demi-ton diatonique.

*Calcul de l'intervalle SOL $\flat$ -FA# : On connaît FA#3 :  $3^6/2^9 = 729/512$ . Pour déterminer SOL $\flat$ 3, on descend de quinte en quinte à partir de FA2 : Sib1, Mib1, Lab-1, Réb-1, puis SOL $\flat$ -2, qui a pour rapport de fréquence  $(2/3)^6 = 64/729$ . Pour SOL $\flat$ 3 on remonte de 4 octaves en multipliant par  $2^4$ . Une autre façon est de descendre le SOL (3/2) d'un demi-ton chromatique ( $3^7/2^{11}$ ). Dans les deux cas, on obtient le même résultat : **SOL $\flat$  :  $2^{10}/3^6 = 1,4047$ .** En faisant le rapport des deux  $(3^6/2^9)/(2^{10}/3^6)$ , on obtient  $3^{12}/2^{19}$ .*

### Gamme de Zarlino: 3 demi-tons inégaux

La gamme de Zarlino comportant un demi-ton de 112 cents entre SI et DO, il est possible de le reporter dans le ton pour le partager en deux demi-tons inégaux. Cependant, comme il y a deux sortes de tons, l'un majeur (DO-RE) et l'autre mineur (RE-MI), il y aura deux façons d'effectuer ce partage.

Le **grand ton** de 204 cents se partage en **112 + 92**

Pour le **petit ton** de 182 cents se partage en **112 + 70**  
On y voit donc 3 demi-tons différents, de 70, 92 et 112 cents.

Avec ses deux tons et trois demi-tons, cette gamme est complexe. Historiquement, elle a été abandonnée au profit des systèmes de tempéraments mésotoniques.

## Les tempéraments : un compromis entre sonorité vivante et lutherie

### La gamme et la sensibilité humaine

Au premier abord, ces préoccupations sur la définition des intervalles paraissent bien cérébrales et loin de l'interprétation musicale. Pourquoi tous ces calculs? Le musicien qui joue sa gamme ne s'imagine généralement pas que la définition des notes suscite tant de questionnements. Rendons-nous donc sur le terrain de la sensibilité musicale et de la beauté sonore pour découvrir si ces définitions d'intervalles peuvent intervenir, où et dans quelles circonstances.

Voici ce qu'a écrit le pédagogue E. Willems (*voir chapitre 2 sur L'éducation musicale*):

*Plusieurs théoriciens ont cru pouvoir expliquer la gamme par un seul système, celui de la quinte par exemple. Mais tous ceux qui ont un tant soit peu approfondi les multiples problèmes de la vie se rendent compte que la gamme est un ensemble très complexe d'éléments divers. Il ne suffit donc pas d'avoir recours exclusivement aux gammes grecques, à des calculs sur les vibrations sonores ou à un rapport unique de quinte pour expliquer sa formation... Lorsque l'être humain **chante la gamme**, il met à contribution des éléments de trois domaines nettement différents et cela simultanément: 1) la sensibilité physique par laquelle il sent les consonances, les dissonances et les écarts quantitatifs des intervalles; 2) la sensibilité affective, émotive qui lui révèle la valeur qualitative et expressive des intervalles; 3) l'intelligence, l'esprit d'analyse et de synthèse qui lui donne le sens harmonique (extrait de *L'oreille musicale*).*

Lorsque l'artiste chante, il emploie souvent d'instinct une justesse expressive, différente de la justesse naturelle (celle de la gamme naturelle ou de la gamme de Pythagore) et de la justesse tempérée (gamme tempérée). *La justesse expressive accentue le caractère attractif, appellatif (ou résolutif) de la note naturelle afin de lui donner une valeur caractéristique bien déterminée, mais variable selon les cas* (E. Willems).

Ainsi de SI à DO, le demi-ton se réduit parfois à un quart de ton dans certains contextes expressifs, soit parce que le SI est attiré par le DO en DO majeur, soit parce que le DO est attiré par le SI, en LA mineur.

### Recherche de perfection musicale

**La question de la définition précise des intervalles ne se pose que lorsqu'on envisage de fabriquer des instruments et de les accorder.** Comment régler les cordes d'un luth ou d'un piano? Comment ajuster les tuyaux des orgues au moment de leur construction? Comment placer les trous d'une flûte ou d'un saxophone? Il faut bien se déterminer! Selon quel critère?

Le réglage est choisi afin de servir au mieux les intentions des compositeurs et des interprètes. Mais celles-ci varient et reflètent la mentalité de leur époque.

Il y a, comme dans le cas de Pythagore, l'aspiration à être en **harmonie avec le cosmos**, ou avec les lois divines, ou encore avec celles de la nature.

Au Moyen-Âge, l'adoption du système de Pythagore basé sur les quintes correspond à la musique de ce temps, car elle emploie essentiellement des **quintes** et des **quartes**. Ce sont des intervalles justes, c'est-à-dire, comme on l'a vu, dans un rapport harmonique (ou épimore).

Lorsque se répand l'usage de la polyphonie au 16<sup>e</sup> siècle, les compositeurs donnent une plus grande importance à la **tierce** majeure (par exemple DO - MI). Celle de la gamme pythagoricienne est trop grande. Lorsqu'on veut jouer les deux notes ensemble, des battements gênants du volume sonore se produisent. Aussi, dans la gamme de Zarlino, la tierce majeure DO-MI est réduite pour être ajustée.

Qu'est-ce qui a conduit ensuite à l'adoption de la **gamme à tempérament égal** dans notre civilisation des 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> siècles? Réponse: des considérations techniques de lutherie en lien avec l'évolution tonale de la musique.

## Les changements de tonalités et leurs contraintes instrumentales

Changer de tonalité, pour un mode donné, par exemple le mode majeur, c'est changer la hauteur à laquelle on le produit. Par exemple, pour une mélodie qui commence par DO en DO majeur, on la monte en commençant par un RÉ et on passe en RÉ majeur. Pour les instruments à sons fixes comme le piano, cela pose un problème concret.

Si le piano est accordé selon le système de la **gamme tempérée**, transposer la mélodie revient seulement à un glissement des intervalles. Il est relativement facile de décaler les mélodies d'un nombre quelconque de tons et demi-tons vers le haut ou vers le bas. On retrouve exactement le même air et tout va bien. C'est pourquoi ce système est bien adapté aux musiques des 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> siècles qui ont abondamment utilisé les changements de tonalité au point même de faire perdre la notion de tonalité dans la musique contemporaine (*voir chapitre 4, Évolution de l'expression musicale occidentale*).

Cela ne se passe pas aussi simplement dans les autres systèmes de gammes puisque les demi-tons n'y sont pas égaux. Pour le démontrer, examinons ce qui se passe dans le cas de la gamme de Zarlino lorsqu'on transpose une mélodie de DO majeur à, par exemple, une tonalité de LA majeur.

Soit une mélodie qui commence par une quarte DO - FA (au hasard, *La Marseillaise!*, en FA majeur). Que se passe-t-il si je veux la jouer plus haut, à partir de MI ou de LA par exemple?

Les intervalles de **quartes** comportent **deux tons et demi**, mais dans la gamme de Zarlino il y a des grandes quartes et des petites quartes selon que les tons sont petits ou grands. L'intervalle de quarte DO-FA, qui vaut  $4/3=1,333$ , est fait d'un grand ton T, d'un petit ton t et d'un demi-ton d (**tableau VI**). À partir des autres degrés du mode, je trouve de même  $4/3$  pour RÉ-SOL, MI-LA, SOL-DO, SI-MI. Donc le début de ma mélodie ne changera pas si je la joue à partir d'un MI. Mais si je la joue à partir d'un LA, la quarte LA-RÉ sera plus grande, car elle est **faite de 2 grands tons et d'un demi-ton Ttd** (1,350). Donc si je joue *La Marseillaise* à partir d'un DO puis d'un LA sur un piano accordé selon les valeurs de Zarlino, elle ne sonnera pas pareil dans les deux cas.

C'est pourquoi, si je veux transposer la quarte sur le LA (LA - RÉ) en conservant la même sonorité que sur le DO (DO - FA), je dois disposer d'**une deuxième touche pour le RÉ, plus basse que la touche normale**. Il faudra un clavier qui comporte deux touches pour le RÉ.

Or je n'ai considéré pour le moment que les quartes. Imaginez ce que ce sera si on considère tous les intervalles. C'est colossal! Examinons les **quintes** (voir **tableau VI**). La quinte DO à SOL est faite de **Ttd** de valeur **1,5**, alors que la quarte RÉ-LA est plus petite avec **Ttd** de valeur **1,48**. Il me faudrait donc également 2 touches pour le LA. Examiner les tierces serait également instructif. Je vous en laisse le soin.

À partir du 16<sup>e</sup> siècle, on a tenté de construire des instruments à clavier qui avaient un nombre

plus important de touches, avec des touches dédoublées pour les notes proches l'une de l'autre d'un comma, par exemple un DO# et un RÉ $\flat$ . L'archicembalo de **Nicola Vicentino** (compositeur italien, 1511 - 1575) comportait 36 touches dans l'octave qui produisaient 32 notes différentes. Mais cela complique beaucoup le jeu de l'interprète, et cela n'a pas perduré.



*Décaphone Surak-Nat-Buzurg de Jacques Dudon (1997) pour le guitariste Didier Aschour*

Toutefois, à cause du besoin actuel de retrouver une intonation juste, cette recherche est à nouveau bien vivante, avec une approche différente et une technologie plus puissante. Ainsi, le guitariste D. Aschour joue sur une guitare dont le manche possède des frettes interchangeables.

L'autre solution est de **faire des compromis**: abandonner l'idée de touches multiples et ne conserver que 12 notes dans la gamme chromatique, donc confondre DO# et RÉ $\flat$ . C'est accepter de jouer avec une intonation moins juste.

## Tempérament égal et tempéraments inégaux

Or si j'attribue à deux notes très proches la même touche, à quelle valeur vais-je l'accorder? Je vais choisir une moyenne entre ces notes. **Les différentes façons de choisir cette moyenne pour chacune des 12 notes d'une gamme constituent les tempéraments.**

On doit s'arranger pour que la modification d'intervalle lors d'une transposition soit la moins perceptible possible. Comment conserver sa valeur dans toutes les tonalités? Le problème est que si on conserve cette valeur pour les intervalles d'octave, on ne pourra pas le réaliser simultanément pour les quintes, encore moins pour les tierces. Il faut choisir ce qu'on met en priorité et cela dépend du style de musique.

Le dilemme entre le respect de la justesse des octaves et celui de la justesse des quintes se pose mathématiquement de la façon suivante. Si on monte de quinte en quinte, comme on l'a fait dans la gamme pythagoricienne, en conservant le même intervalle de quinte juste ( $3/2$ ), on génère les 12 notes chromatiques. Par exemple, en partant du Mi  $\flat$ , on arrive au SOL#. En avançant d'une quinte supplémentaire, on génère la 13<sup>e</sup> note qui est RÉ#. C'est donc la même que la première, Mi  $\flat$ , 7 octaves plus haut... mais pas tout-à-fait. Car le RÉ# est très légèrement plus haut que le Mi  $\flat$ .

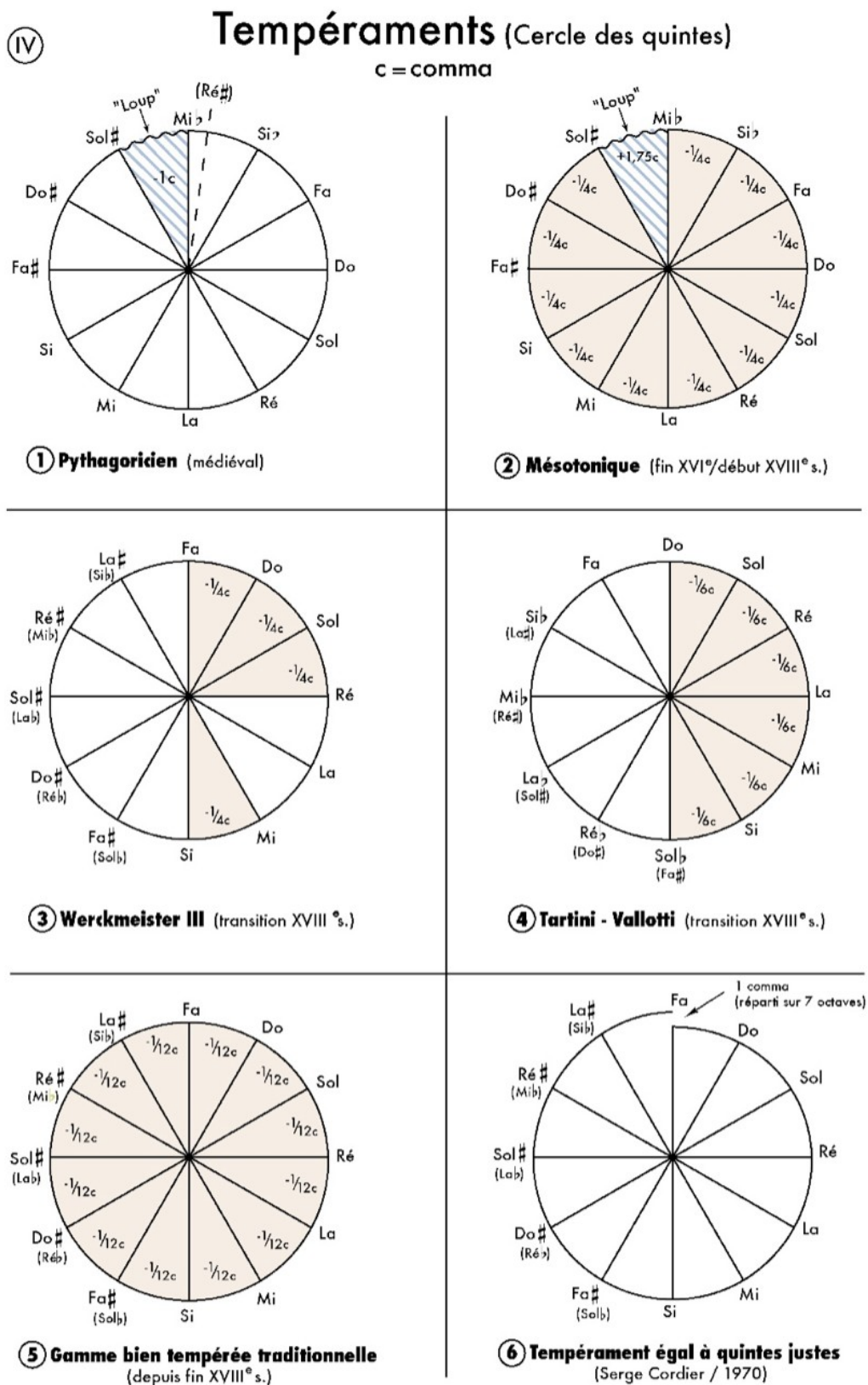
En effet, la douzième quinte nous amène à la valeur  $(3/2)^{12} = 129,75$  pour le RÉ#, alors que la septième octave nous amène à  $2^7 = 128$  pour le Mi  $\flat$ . Le cycle des quintes nous mène un peu plus haut que le cycle des octaves. L'intervalle Mi  $\flat$ -RÉ# vaut donc  $3^{12}/2^{19}$  en rapport de fréquences. C'est le **comma pythagoricien** que nous avons rencontré plus haut. En fait, c'est l'origine de ce comma, son acte de naissance.

Le douzième quinte, l'intervalle SOL# - Mi  $\flat$  est une quinte raccourcie par rapport à SOL# - RÉ#, donc fautive à l'oreille, qui pour cette raison a été nommée quinte du loup.

Comment concilier ces deux cycles dans l'accord d'instruments à sons fixes où le nombre de touches est limité à 12? Il existe plusieurs types de réponses, qui définissent plusieurs types de tempéraments.

Qu'est-ce donc qu'un tempérament? **Le tempérament, c'est la manière de répartir cette différence d'un comma sur l'ensemble des notes, de façon équilibrée sur tous ou partie des intervalles, de sorte que les octaves restent justes et que les quintes, puis les tierces, puis les intervalles d'harmoniques supérieures, le soient le plus possible.** Nous

verrons qu'on peut aussi partir des quintes justes ou des douzièmes justes et adapter l'octave en conséquence.



*Tableau du cycle des quintes dans les différents tempéraments historiques.  
Extrait de [Tempérament, Glossaire](#), par Serge Cordier*

Dans **le système à tempérament égal** qui prévaut actuellement depuis la fin du 18<sup>e</sup> siècle, le comma est réparti de façon égale sur toutes les notes. La quinte s'en trouve donc diminuée de 1/12<sup>e</sup> de comma soit environ 2 cents, et la tierce augmentée, comme on l'a vu dans le [tableau récapitulatif](#).

Toutefois, rien n'impose que cette répartition soit homogène. Plus d'une centaine de types de **tempérament inégal** ont été proposés depuis le 11<sup>e</sup> siècle et jusqu'à aujourd'hui. C'est dire combien cette question a préoccupé les compositeurs et facteurs d'instruments, sans commune mesure, par exemple, avec le choix d'un diapason qui agite certaines franges de notre société actuelle (*voir chapitre suivant*)

Dans les tempéraments inégaux, le comma de trop est réparti sur 4 ou 6 notes, au lieu des 12 du tempérament égal (voir le tableau page précédente). Le tempérament qui prévalait au 16<sup>e</sup> siècle, le **tempérament mésotonique**, mettait l'accent sur la tierce. La tierce DO - MI apparaît comme la succession de 4 quintes. Afin qu'elle sonne juste, ces quintes ont été abaissées de 1/4 de comma.

Ainsi, lorsque Bach écrivait pour le clavecin "bien tempéré", il ne parlait pas de tempérament égal, mais de tempéraments inégaux qui permettaient de jouer dans de nombreuses tonalités et qui avaient sa faveur (*pour les spécialistes: les discussions sont actives à ce sujet, mais elles convergent pour proposer les systèmes de Werckmeister III ou Kirnberger II ou proches d'eux*).

Puisque les quintes et les tierces, dans un tempérament inégal, sont inégales, des airs sonnent différemment selon qu'ils sont interprétés dans une tonalité ou une autre. Cela explique qu'**on attribue à chaque tonalité un caractère, une ambiance différente** (l'éthos). Ce n'est pas le cas avec une gamme tempérée où toutes les tonalités sont identiques. Toutefois certains, rares, affirment qu'ils distinguent des ambiances différentes selon les tonalités, même en tempérament égal, mais on ne comprend pas pourquoi.

*Pour plus de détails sur les différentes sortes de tempéraments, se reporter à des articles plus techniques, par exemple: [La justesse musicale](#), conférence de Serge Cordier, 1991; [Les tempéraments](#) par Marc Texier, consulté aout 2016; [Musique et tempéraments](#) par Didier Guiraud de Willot; [Gammes et tempéraments](#), Wikipedia*

À la fin du 18<sup>e</sup> siècle, la gamme à tempérament égal a supplanté les tempéraments inégaux comme une solution (il y en aurait d'autres possibles) pour répondre au problème pratique de changement de tonalité qui devenait crucial pour les instruments à clavier. C'est l'époque du succès de la modulation, de la transposition et de la polyphonie instrumentale. Elle évite d'ajouter des touches aux 12 courantes tout en faisant en sorte que les quintes ne soient pas trop diminuées pour que cela soit directement perceptible.

## Précisions sur la justesse des intervalles

À ce stade de notre exposé, il est nécessaire d'introduire 3 nouveaux éléments qui interviennent pour apprécier la justesse d'un intervalle de deux notes. L'un est l'existence de battements, l'autre celle de partiels et le dernier l'imprécision de nos perceptions auditives.

### À propos de battements

Le son est physiquement une onde qui se propage dans l'air. Aussi lorsque nous émettons simultanément deux sons de fréquences définies différentes, les ondes vont se combiner, se renforcer en certains points, s'atténuer à d'autres. **Lorsque les fréquences des ondes ont des valeurs proches, elles interfèrent et il se crée des battements**. Le volume du son passe périodiquement par des forts et des faibles qui sont bien perceptibles à l'oreille. On calcule que le nombre de battements par seconde est égal à la différence des fréquences des deux ondes. Si les



fréquences des 2 ondes diffèrent de 1 Hz (1 vibration/s), le battement créé se répète toutes les secondes. Donc plus les deux fréquences se distancient et plus les battements deviennent rapides.

Or une note émise par un instrument n'est pas composée seulement d'une seule fréquence (par exemple un Do<sub>2</sub> de 130 Hz). Elle est la superposition de la fréquence fondamentale et de ses **harmoniques**, double, triple, quadruple, quintuple, etc (harmonique 2 à 260 Hz - DO<sub>3</sub>, harmonique 3 à 390 - SOL<sub>3</sub>, harmonique 4 à 520 - DO<sub>4</sub>, harmonique 5 à 650 Hz - MI<sub>4</sub>...).

Par conséquent, lorsque deux notes sont émises simultanément par un instrument qui le permet (claviers, guitare, luths), **les interférences se produisent non seulement entre leurs fréquences fondamentales, mais également entre les harmoniques de l'une et le fondamental et les harmoniques de l'autre.**

Ainsi si nous jouons un DO<sub>3</sub> et un SOL<sub>3</sub>, l'harmonique 3 du DO<sub>3</sub> (SOL<sub>4</sub>) interfère avec l'harmonique 2 du SOL<sub>3</sub> (le même SOL<sub>4</sub>). Si l'harmonique 2 du SOL<sub>3</sub> a exactement la valeur de l'harmonique 3 du DO<sub>3</sub>, on dit que **l'intervalle est pur**. On ne perçoit (en principe) pas de battements. *Pur* signifie que l'intervalle a exactement la proportion mathématique harmonique. Si les deux SOL<sub>4</sub> sont ajustés plus haut ou plus bas, alors des battements se produisent.

Pour un musicien, **ces battements peuvent être gênants s'ils sont trop marqués. Mais s'ils sont lents, ils peuvent au contraire donner du relief au son.** Par exemple, une octave telle que DO<sub>3</sub> de 130 Hz à DO<sub>4</sub> de 262 est agrandie de 2 Hz par rapport à l'octave pure. Mais elle peut sembler tout à fait juste à l'oreille et plus agréable que l'octave pure.

### **Inharmonicité et partiels**

Or, **dans le cas des instruments à cordes** (piano, violon, guitare), les harmoniques émises par une corde vibrante ne sont pas exactement harmoniques, car **leurs fréquences sont un peu plus que le double, le triple ou autre multiple de la fréquence fondamentale**. Cela est dû au fait qu'une corde matérielle a une épaisseur et une rigidité. C'est le phénomène d'**inharmonicité**, mis en évidence il y a quelques dizaines d'années, après l'invention d'appareils qui permettent des mesures précises des fréquences. Les harmoniques qui n'en sont plus vraiment reçoivent le nom de **partiels**. L'inharmonicité du piano est surtout sensible dans les aigus, faible dans le médium, et perceptible dans les basses.

En conséquence, dans le cas du piano par exemple, l'explication précédente sur le phénomène de battements doit être corrigée en remplaçant les harmoniques par les partiels, légèrement plus hauts que les harmoniques. Un accordeur de piano accorde les cordes en écoutant les battements entre les partiels réels et non entre des harmoniques théoriques. De ce fait, lorsque l'octave sonne sans battement, elle est un peu dilatée par rapport à l'octave pure, tout en sonnant parfaitement juste.

### **Imprécision de la perception auditive et tolérance sur les intervalles**

On évalue la précision d'un intervalle à l'oreille ou avec des instruments de mesure. Dans les deux cas, la précision n'est pas absolue. Toute mesure dans la matière, que ce soient une distance, un poids, un temps, est réalisée à une certaine tolérance près. Ainsi vous évaluerez un temps de trajet en voiture en heures et en minutes mais vous omettez les secondes. Et si vous évaluez la durée d'une vidéo en minutes et secondes, vous omettez les millièmes de secondes.

Dans le cas de l'oreille, intervient de plus sa limite de perception. Si des battements sont trop rapides, vous ne percevez plus chacun des battements, mais un ronflement continu. S'ils sont trop lents, on ne les perçoit plus non plus. C'est pourquoi, lorsqu'un accordeur se fie aux battements des partiels pour réaliser ses accords, il le fait à une toute petite tolérance près. La sensation de battement s'annule en effet en dessous de 0,3 battements par seconde dans le médium.

## Le tempérament égal à quintes justes

Tous les tempéraments exposés précédemment, inégaux ou égal, restent accrochés à la définition d'un intervalle d'octave pure. L'octave fait partie de la nature, donc elle semble intouchable, définitivement attachée au chiffre 2 connu depuis l'antiquité.



*Serge Cordier, inventeur du tempérament égal à quintes justes.  
Merci au site web [Tempérament Cordier](#)*

À l'opposé, il revient à l'accordeur et théoricien **Serge Cordier** (1933 - 2005) d'avoir proposé en 1972 de conserver la justesse de la quinte et de relâcher la contrainte du 2 pour l'octave. De longues études et expérimentations l'ont amené à inventer le **tempérament égal à quintes justes** pour l'accord des pianos et des claviers.

Puisque la 7<sup>e</sup> octave est plus basse d'un comma que la 12<sup>e</sup> quinte, il suffit d'**augmenter chaque octave de 1/7<sup>e</sup> de comma, soit 3,35 cents**, pour être en accord avec les quintes justes. C'est ce que fait Cordier, puis il égalise les 7 demi-tons contenus dans une quinte (tempérament égal).

L'idée de ce tempérament lui est venu à la suite de ses analyses des pratiques des accordeurs de piano. De même, les violonistes règlent leurs instruments par quintes justes, car les cordes sont espacées de quintes: SOL - RÉ - LA - MI. Autrement dit, Cordier, comme il le disait lui-même, a découvert ce qui existait déjà et l'a théorisé, développé, en a exploré les qualités et a montré ses avantages sonores par rapport au tempérament égal à octaves justes.

Il s'est aperçu que l'oreille non seulement n'est pas dérangée par la dilatation minime de l'octave, mais que de plus elle l'appréciait. Pour le musicien, cette dilatation est parfois musicalement plus juste que l'octave physique naturelle. La tendance spontanée des musiciens qui sont libres de la hauteur de leurs notes est souvent d'agrandir légèrement certains intervalles, surtout dans l'aigu. Les octaves supérieures, lorsqu'elles respectent la mathématique du 2, paraissent plutôt trop basses. Il semble que ce soit dû à la fois à une influence culturelle et au fonctionnement perceptif de l'oreille qui n'est pas linéaire. Autrement dit la justesse expressive musicale ne se confond pas avec la justesse naturelle.

Cela rejoint les résultats de recherches en acoustique musicale des scientifiques français **Émile Leipp** (1913 - 1986, Laboratoire d'Acoustique Musicale) et **Jean-Claude Risset** (1938 - 2016, IRCAM) qui est également compositeur. Ils ont montré indépendamment que la sensation de hauteur des notes et d'intervalles n'était pas directement liée à la physique, mais dépendait de façon complexe de facteurs psycho-affectifs. Les mesures effectuées sur la pratique vivante des musiciens révélèrent que les intervalles réels produits sont différents des intervalles supposés de la théorie physique. Ils se raccourcissent ou s'agrandissent selon le contexte musical et la sensibilité de l'acteur. Pour l'accord des pianos, Leipp rapporte que *Les notes de l'octave la plus grave étaient "trop basses" d'un bon quart de ton; les notes les plus aiguës [...] trop hautes d'un demi-ton.* (Réunion du GAM, décembre 1978), du moins en comparaison des valeurs pures théoriques.

Cordier a reçu des témoignages élogieux sur son accordage de piano, quelquefois de la part de musiciens célèbres, dont **Yehudi Menuhin**. Les musiciens ont fait part de leur satisfaction car le son est plus pur, plus rond, plus vivant et gagne en luminosité.

*Plus de détails sur Internet: [Le tempérament Cordier, un nouvel accord des pianos](#). Voir en particulier la conférence de 1991 [La justesse musicale, le glossaire](#).*

Toutefois, ces qualités sont perçues surtout dans la mélodie, c'est-à-dire lorsque les notes sont jouées successivement. Lorsqu'on les joue simultanément, dans des accords plaqués, des inconvénients acoustiques peuvent apparaître (battements trop marqués) pour des notes distantes

de 2 ou 3 octaves. Pour atténuer ou éliminer cet inconvénient, d'autres systèmes ont été recherchés, intermédiaires entre le tempérament égal d'octave et celui de quinte.

## Les tempéraments optimisés récents

Je suis redevable aux études approfondies d'**André Calvet**, accordeur et technicien de piano, enseignant à l'**Institut technologique européen des métiers de la musique** au Mans (ITEMM), pour les informations de cette partie et des précisions sur les parties précédentes (voir son ouvrage, *Le clavier bien obtempéré*). Calvet attire l'attention sur l'intérêt du tempérament égal à 12<sup>e</sup> pures de Bernhard Stopper et du Circular Harmonic System d'Alfredo Capurso. Il propose lui-même un tempérament de son cru, le Clavier Bien Obtempéré (CBO).

**Bernhard Stopper**, pianiste et facteur de piano allemand, né en 1961, propose son tempérament dès 1988. Il s'appuie sur l'intervalle de **douzième pure**, addition d'une octave et d'une quinte. Il est divisé en 19 demi-tons égaux. Stopper a développé un logiciel pour l'accord du piano (Tunic OnlyPure).

**Alfredo Capurso** est un technicien et accordeur de piano italien vivant à Londres. À partir de 2007, il a développé un tempérament personnel, le **Circular Harmonic System ou C.h.a.s.**, adapté au piano pour tenir compte des partiels (de l'inharmonicité) de façon flexible. Il est proche du précédent tout en se rapprochant du tempérament égal. Les octaves en sont donc étirées. Tous les intervalles sont calculés pour avoir une tension satisfaisante à l'oreille. A. Calvet affirme avoir été séduit par le son obtenu avec ce tempérament lors d'une démonstration à l'ITEMM (ampleur, chaleur, richesse sonore).

*Plus de détails sur Internet: [Piano Stopper Tübingen](#). On y trouve une publication théorique, [Tuning The Stopper Equal Temperament With The Tunic PDA Software, 2008](#). Exemple sonore joué par Grigory Sokolo [Piano Technicians Guild Convention 2011](#); [vidéo explicative du système d'accord](#) un [texte explicatif](#) de la pratique de l'accord en C.H.a.s; la [publication de base](#); un [cours en anglais](#) sur les intonations*

**André Calvet** (son [site web](#) expose ses recherches et ses publications dans une variété de domaines) a été amené à élaborer une nouvelle pratique de l'accord du piano qui repose sur la sensibilité de l'écoute et non sur des rapports mathématiques précis. C'est donc plutôt une méthodologie, qu'il nomme lui-même une **prathéorie**, autrement dit une théorie qui se modifie selon la pratique réelle, incluant le piano, l'accordeur et le concertiste. Elle est fondée sur l'écoute des battements des intervalles entre partiels. Elle inclut donc la tolérance d'environ 0,3 battements en-dessous de laquelle l'oreille ne les perçoit plus (dans le médium).

A. Calvet a malicieusement nommé cette *prathéorie* le **Clavier Bien Optempéré** (CBO) qu'il a traduit en anglais par Well Optimized Keyboard ou WOK.

Elle se situe entre le tempérament égal à octaves pures, souvent jugé plat, et le tempérament égal à quintes justes, qui est perçu comme trop tendu. La différence principale est que les battements d'octave, de douzième et de quinte ne sont pas déterminés à l'avance, car les battements réels peuvent varier d'un piano à l'autre. L'accord respecte les caractéristiques de l'instrument, la personnalité de l'accordeur, et les vœux éventuels du commanditaire.

*En ne faisant pas coïncider à la perfection les partiels concernés [par les octaves et les quintes], nous éprouvons à l'écoute de ces deux intervalles une sensation de pur, enrichie par un caractère plus chaleureux, moins strict, plus libre.* (A. Calvet, communication privée)



*André Calvet  
Photo reproduite de son site*

Je signale également une réalisation informatique intéressante qui permet de « matérialiser » sous forme sonore de nombreuses échelles et tempéraments : c'est le clavier numérique ci-contre, nommé **Sémantic Danielou-53**, mis au point par **Jacques Dudon**, en collaboration avec Arnaud Sicard et Christian Braut., téléchargeable gratuitement sur le [site](#).

Selon leurs auteurs, *le but est de rendre accessible au plus grand nombre l'expérience de l'intonation juste à travers de nombreux modes pré-programmés issus de l'échelle globale du Semantic : ragas indiens, échelles de diverses cultures musicales, démonstration des différents commas, tempéraments schismatiques, linéaires et fractals reliés au système Semantic*. Cela passe donc par un système de fréquences électroniques ajustables, calculées précisément selon la valeur des intervalles en fraction.



## L'intonation juste - Recherche de la meilleure harmonie

Finalement, l'enjeu de tout cela n'est-il qu'un problème pratique de lutherie? Non. La question bien plus cruciale est que l'utilisation de la gamme tempérée a habitué notre oreille à cette intonation, au point que des musiques exécutées dans d'autres systèmes peuvent nous sembler fausses.

Le problème est donc plus profond que la mise au point de dispositions pratiques concernant la fabrication des instruments. Il est relié à notre sensibilité auditive vis-à-vis des subtilités des intervalles. Il est dans le **choix d'un univers sonore**. Il est dans la question de **l'incidence de cet univers sur notre bien-être**.

### L'oreille exercée est sensible aux variations subtiles des intervalles

Le physicien Helmholtz, promoteur de la gamme naturelle de Zarlino, indiquait combien la musique ancienne était altérée par la gamme tempérée. *Les particularités de la gamme naturelle se manifestent surtout dans l'ancienne musique italienne de Palestrina, Vittoria, Gabrieli et leurs contemporains. Ces œuvres réclament les consonances les plus justes parce qu'elles n'obtiennent les nuances les plus délicates de l'harmonie que par le renversement des accords, l'alternance des accords majeurs et mineurs, et un petit nombre de dissonances formées par des retards. Exécutées dans la gamme tempérée, elles perdent tout sens et toute expression, tandis que, grâce à l'emploi de la gamme naturelle, elles produisent sur l'harmonium un bon effet (Helmholtz, cité par O. Bettens).*

On pourrait penser que l'interprétation dans la gamme tempérée ne concerne pas le chanteur, qui peut ajuster sa voix à toutes sortes d'intervalles à volonté. Il peut commencer sa mélodie sur n'importe quelle note et conserver tous ses intervalles justes par glissement. Il en est de même pour les instruments à cordes sans frettes tels que les violons. Toutefois, les interprètes sont plongés dans la culture de la gamme tempérée, sont accompagnés d'instruments à sons fixes, et leurs oreilles sont conditionnées. Aussi, continue **O. Bettens**, *Helmholtz ajoute que les chanteurs sont incapables de chanter "de manière à donner à l'auditeur ce bien-être complet qui résulte*

*d'une parfaite harmonie", ce qu'il attribue à l'influence néfaste des pianos accordés au tempérament égal avec lesquels ils s'exercent.*

De son côté, au cours de ses recherches sur l'interprétation du chant chrétien antique, le chercheur et musicien **Iégor Reznikoff** a fait l'expérience d'un déconditionnement total de l'oreille. *D'excellents musiciens restent perplexes quand on leur dit que l'accord actuel du piano est faux, et qu'on le leur fait entendre. J'en ai fait personnellement l'expérience quand je me suis mis à travailler la musique antique et le répertoire occidental ancien. Pour mieux approcher cette musique, j'ai non seulement arrêté de jouer du piano et de faire des concerts de musique de chambre ou de chanter dans des chorales, mais pendant longtemps je me suis abstenu d'écouter de la musique occidentale, n'écoutant que des musiques dont on peut être sûr quant à la rigueur de la transmission orale, de la musique sacrée au sens strict du terme et remontant aux traditions les plus anciennes - la nuit des temps - et sur lesquelles, en tout cas, aucune musique récente n'avait eu d'influence. Je n'écoutais que de ces musiques et ne travaillais que la résonance harmonique d'une corde. Alors peu à peu, au bout de neuf mois de cette ascèse, l'oreille se déconditionne, une physiologie plus fine réapparaît, un nuage se lève, on peut entonner des intervalles justes, les varier d'un comma... Ce fut avec la très célèbre Symphonie en sol mineur n°40 de Mozart que je repris contact avec la musique occidentale. Expérience inoubliable, tout me parut faux d'un bout à l'autre..." (I. Reznikoff, *Entrer dans la résonance*).*

## **Le choix d'un univers sonore**

La musique contemporaine s'est complètement affranchie de la définition classique d'un mode. Il devient permis de sélectionner n'importe quel son du continuum sonore et d'inventer tous les intervalles possibles (*voir chapitre 4*). C'est comme si les échelons, auparavant bien marqués sur l'échelle de l'octave évoquée au début de l'article, avaient été remplacés par des crochets coulissants qu'on peut insérer où l'on veut et avec le nombre qu'on veut. Cette recherche est très facilitée par des appareillages électroniques où les caractéristiques des sons, hauteur, volume, timbre, dynamique, sont ajustables à volonté.

Nous ne sommes pas contraints à l'emploi de la gamme tempérée et nous pouvons libérer notre esprit des habitudes et des idées toutes faites. Il était probablement nécessaire que les compositeurs poussent la recherche et l'audace jusqu'à l'éclatement de la gamme tempérée, afin de faire germer une nouvelle connaissance et une conscience accrue du monde sonore.

Cependant, à cette phase d'acquisition de liberté, en succède une autre, celle du choix. Faire éclater les coquilles de l'ancien, d'accord, mais pour construire quel monde?

*Le choix d'un tempérament n'est pas réductible au problème d'accord instrumental qui lui a donné naissance. Le choix d'un tempérament est le choix d'une échelle sonore. C'est l'acte primordial par lequel les musiciens établissent une collection de sons discontinus prélevés dans un continuum sonore qui nous entoure, ensemble de sons que régit une loi mathématique. C'est le premier moment de l'organisation musicale, l'instauration d'un paradigme harmonique, dont toute la musique ensuite est dérivée (M. Texier).*

*Un exemple quasi-général de confusion a comme origine **les micro-intervalles générés par différentes coïncidences** naturelles inévitables entre les harmoniques, de type comma... Avec les notes doubles qu'ils mettent en valeur, il importe de pouvoir en discerner l'existence, la place et le rôle dans toute échelle musicale. La négation de ces commas recherchée pour **limiter le nombre de notes par octave d'un système** simplifie les instruments et le jeu instrumental, mais a pour effet un **appauvrissement harmonique du modèle naturel et une perte de son sens et de sa résonance...** La confusion ici ne vient pas des musiques, mais de l'incapacité de certains **théoriciens**, à certaines époques, à rendre compte des réelles pratiques des **musiciens** ou à saisir la complexité naturelle des relations harmoniques entre les sons, enfin des **luthiers** à*

*faire des instruments nécessaires pour créer de meilleures situations d'écoute et de transmission... Il ne peut y avoir en même temps simplification de la division de l'octave et consonance, c'est-à-dire simplicité harmonique. **Tout système d'intonation propose un choix.** C'est l'éternel débat entre les pythagoriciens et les aristoxéniens, entre le son et la forme, la justesse et l'orchestration, la modalité et la modulation, le timbre et la virtuosité, la tampa et le clavier, l'Orient et l'Occident... Là où il y a confusion, c'est aussi parce qu'il existe des passerelles entre différents mondes, et donc une harmonie potentielle.. (J. Dudon: La confusion des genres: tentatives de résolution, Colloque "Autour de l'harmonie", Carcès, France, 15-16/10/2004).*

## Résonances corporelles et harmonisation

Lorsqu'elle fait l'expérience du silence, l'oreille retrouve une sensibilité accrue qui lui permet d'entrer dans des mondes plus subtils. Il est alors plus facile de sentir et de discerner ce qui fait du bien ou ce qui agresse et dérange. Et l'on peut constater que parfois, **lorsque les êtres humains se sont coupés de leur nature profonde, et qu'ils ne sont plus reliés au cœur et au corps comme cela se produit dans la civilisation occidentale contemporaine matérialiste, l'expérimentation peut accoucher de monstruosité.** Certaines musiques morcellent et détruisent les personnes. D'autres musiques harmonisent et réunifient l'être. Elles sont **accordées aux lois physiologiques et psychiques** qui ne dépendent pas de la culture, mais sont inscrites profondément dans la constitution de l'être humain, elle-même construite selon des lois cosmiques (*voir article [Les corps subtils et les chakras](#)*).

La vérité est dans la résonance intérieure. **La résonance avec notre cœur, notre âme, et notre corps.**

Lorsqu'un théoricien propose un nouveau monde sonore, celui-ci ne se développe et ne se répand que s'il plaît, s'il procure une jouissance, autrement dit s'il résonne avec notre être intérieur. Or il n'y a pas que l'oreille qui perçoive les sons, car le corps les reçoit, les enregistre et réagit même si l'oreille ne perçoit pas. Dans l'eau, on entend parfaitement les sons même en se bouchant les oreilles, expérience que propose **F. Louche** dans sa recherche sur l'écoute active. Or ces sons s'étagent à des endroits précis du corps et agissent sur les circuits nerveux et les organes.

Certains, tels Pythagore, Platon, Képler ou le Rig Veda indien, ont démontré les rapports de la musique avec le cosmos. Leur quête était de **créer une musique qui soit en accord avec l'être humain (le microcosme) et l'univers (le macrocosme)**. Le cosmos comme l'être humain sont bâtis selon des rapports privilégiés qui fondent ce qu'on appelle la géométrie sacrée (*voir article [Aspects géométriques de l'univers](#)*). C'est pourquoi l'homme se sent intuitivement relié à la nature, aux étoiles, à l'ordre universel.

Au siècle dernier, des théoriciens ont tenté de retrouver cette correspondance entre les notes et le cosmos de façon très concrète en utilisant les connaissances métriques de l'astronomie. Par exemple **Derénéaz** a étudié les distances des planètes au soleil (en prenant la moyenne entre le périhélie et l'aphélie) et leurs correspondances avec les fréquences des notes de la gamme majeure (*dans [La gamme, ce problème cosmique](#)*). Exemple: si l'on prend une corde sonore comme unité de longueur représentant la distance Soleil-Terre, et que l'on y place un chevalet correspondant aux distances Neptune-Uranus, Uranus-Saturne et Saturne-Jupiter, on obtient les intervalles DO-RÉ, MI-FA (*plus de précisions dans le document [Harmonie des Sphères](#)*). Cette correspondance me semble très mentale et alambiquée. Par exemple comment et pourquoi prendre la moyenne, pourquoi le périhélie et l'aphélie? Toutefois, il est probable que l'harmonie des sphères existe bel et bien, mais n'est plus perçue dans sa vraie dimension, qui se trouve à un autre niveau, plus vibratoire, plus symbolique. Ainsi certains yogis entendent des sons intérieurs, tout en ayant la sensation d'être unis au jeu de l'univers. On trouve l'univers en soi.

Oui, nous éprouvons le besoin de retrouver un nouvel espace harmonique, basé sur les résonances naturelles. Depuis quelques années, on revient à l'écoute des gammes naturelles. Le succès de la musique baroque reconstituée dans son authenticité, et celui des musiques extra-européennes y ont beaucoup contribué. Ce mouvement a également bénéficié de la vulgarisation du chant diphonique qui exploite le renforcement sonore des sons harmoniques et par les études dans l'interprétation musicale et vocale de pionniers tels que Iégor Reznikoff et Jacques Dudon:

*Parlant de l'intonation juste, Paul Hindemith disait - affirmation remarquable pour un musicien du XX<sup>e</sup> siècle - que celui qui a le sens de cette intonation possède une dimension supplémentaire, et donc une compréhension autre de la Musique... Cette approche suppose une écoute autre, une perception fine que seules l'intonation et la consonance justes permettent. Il se passe alors des phénomènes à un niveau subtil dans la mesure où le son agit en des points précis du corps, sur des centres essentiels et sur la conscience profonde, suivant des circuits énergétiques à la perception desquels nous ne sommes pas habitués normalement (I. Reznikoff, L'intonation juste).*

*Le chant sacré - en rapport donc avec le monde de l'Esprit - dans toute sa vérité modale antique est bâti sur les principes de résonance naturelle et d'action des syllabes sur divers lieux du corps évoqués plus haut et développe ces principes de façon rigoureuse afin d'agir sur le son, science profonde, en transmettant, par leurs caractéristiques et impression sonore propres, des états de concentration, de contemplation, de prière, des états de paix, d'appel à Dieu, de joie de la Présence Divine, d'attente... suivant le temps et le moment liturgiques (I. Reznikoff, Musique grecque antique, byzantine et traditionnelle).*

Willems synthétise l'ensemble de ces considérations:

*Notre gamme diatonique reste un mystère, malgré toutes les explications données. La raison en est qu'elle touche à la fois à des éléments cosmiques et humains. Voici les principaux facteurs qui ont influencé la constitution de la gamme:*

- 1. certaines lois physiques du son, particulièrement celle des harmoniques*
- 2. les instruments tels que le piano, l'orgue, le clavecin qui ont poussé l'être humain à rechercher des normes (gamme tempérée) permettant de jouer dans toutes les tonalités*
- 3. la voix humaine qui a choisi l'intervalle d'un ton comme premier pas dans la succession des sons chantés*
- 4. les tendances affectives qui ont poussé au choix de certains intervalles comme la tierce mineure, la septième majeure*
- 5. les calculs mathématiques*
- 6. les considérations astronomiques et cosmiques*
- 7. l'influence de l'harmonie qui, à partir du XVI<sup>e</sup> siècle, s'est imposée à l'ensemble des sons choisis pour notre gamme" (E. Willems, L'oreille musicale).*

17 janvier 2006 (révision aout 2017)

# Chapitre 9

## Les aléas historiques de la fréquence du LA

### Résumé:

*Depuis 1953, une norme internationale recommande d'accorder les instruments de musique à la fréquence de 440 hertz pour le LA. C'est une volonté récente, car dans le passé, on ne s'intéressait qu'aux intervalles entre les notes et on ne savait pas mesurer leur fréquence.*

*Fixer un diapason à 1 Hz près a un sens purement technique car musicalement, les notes émises par les instruments sont fluctuantes et varient avec la température et le souffle. Lorsque vous entonnez une chanson, vous ne vous souciez pas du diapason. La nécessité d'un diapason commun est apparue pour des motifs pratiques et commerciaux, afin de faciliter la musique professionnelle d'ensemble et la fabrication des instruments.*

*Au moins jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, le diapason des instruments variait d'un endroit à l'autre, d'une époque à l'autre et d'un instrument à l'autre. Puis des tentatives de normalisation ont été effectuées, mais le choix des valeurs retenues a suscité des controverses, qui ne se sont pas éteintes avec la normalisation internationale de 1953.*

*Le choix d'un diapason plus haut ou plus bas peut affecter le rendu sonore et la performance vocale des chanteurs lorsqu'il s'agit d'interpréter des œuvres écrites dans le passé. L'essentiel est l'impact émotionnel et physique de la musique sur l'auditeur. Il résulte de paramètres complexes qui dépassent de loin la question du diapason.*

Dans les chapitres précédents, nous avons constaté que l'identité d'un mode musical repose sur la valeur des **intervalles** entre les notes qui le constituent, autrement dit sur les **rappports** que les notes ont entre elles. Nous indiquons par exemple que deux notes sont distantes d'une tierce ou d'une quinte. Nous avons également précisé qu'il y avait plusieurs valeurs possibles de la grandeur de cette tierce ou de cette quinte, selon le système d'intonation choisi, gamme tempérée ou autre.

Cela dit, à aucun moment nous n'avons défini une hauteur pour une note seule, isolée, un LA ou un DO par exemple, sans la relier à une autre. Autrement dit, nous n'avons pas porté d'attention à la **hauteur absolue des notes. Elle n'est pas intervenue dans les définitions et les choix des modes musicaux.**

Cette absence de référence à une hauteur fixe était de mise dans la pratique musicale du passé jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, qui ne considérait que les intervalles entre les notes. Mais il est apparu récemment le **besoin pratique de fixer la hauteur d'une note de référence, hauteur nommée le diapason**, d'abord le DO puis le LA.

De nos jours, tout chœur, avant d'exécuter une œuvre, prend le ton, c'est-à-dire que le chef entonne la première note qui sera chantée par chacune des voix, **en se référant au diapason admis**. De même, les musiciens d'un orchestre règlent leurs instruments afin que leur LA ait la hauteur assignée.

Nous sommes tellement habitués à faire référence au diapason de fréquence **440 Hz**, fréquence produite par l'objet métallique en forme de fourche nommé également *diapason*, ou par son homologue électronique, que nous ne nous demandons plus pourquoi et comment cette valeur a été déterminée. Il nous semble que cela fait partie des choses normales qu'on ne discute pas.

Or c'est faux. **Le diapason, au contraire, a été beaucoup discuté au moment où il est apparu dans l'histoire et il se discute encore maintenant.**



La normalisation du LA à 440 Hz est une recommandation internationale récente qui n'est pas obligatoire et n'est pas forcément respectée. C'est pourquoi, dans le monde, les fréquences du LA adoptées par les **orchestres** s'étalent sur une certaine plage. Elles sont souvent plus hautes que 440, par exemple 442 ou 444 Hz (*voir le site de [Franz Nistl](#), accordleur de piano*).

En contraste avec cette normalisation, l'accordage des **instruments anciens** au cours des 15<sup>e</sup> à 19<sup>e</sup> siècles s'étalait sur une plage d'environ 3 tons.

Depuis deux siècles environ, certains musiciens ont milité, ou militent actuellement, en faveur d'une valeur bien particulière du diapason. Les uns réclament un LA de 432 Hz, d'autres un DO de 256 Hz, d'autres un MI de 528 Hz, etc., chacun estimant qu'il prône la meilleure valeur pour des raisons très éclectiques, parfois étayées, parfois circonstanciées, parfois étranges ou imaginaires.

Cette situation nous amène à nous poser quelques questions:

- Comment est apparu le besoin d'une normalisation du diapason?
- Qu'est-ce qui a présidé au choix de la valeur de 440 Hz pour le LA? À partir de quelles données et de quels critères?
- Cette valeur est-elle judicieuse, a-t-elle un fondement musical ou humain?
- Devons-nous suivre cette recommandation, ou choisir une autre valeur?
- Est-il même souhaitable d'imposer une quelconque norme de diapason?

C'est ce que j'explore dans ce chapitre. Je ne donne pas de réponse définitive sur le choix d'une valeur ou d'une autre. Je montre essentiellement la réalité de la pratique musicale et son rapport avec les aspirations des êtres humains. Le reste est affaire de gout personnel et de circonstances.



## Les différents sens du mot *diapason*

La **hauteur de la note choisie comme référence** (actuellement LA, anciennement DO ou FA) est appelée le **diapason** (en anglais *concert pitch*, en allemand *Kammerton*).

Ce sens récent dérive de sens anciens bien différents. Dans son *Encyclopédie*, **Denis Diderot** (écrivain et philosophe français, 1713 - 1784) relate en **1780**:

*DIAPASON: Intervalle de l'octave selon les anciens.*

Il ajoute deux autres sens qui ne se réfèrent pas du tout à une hauteur fixe:

*Tables dont se servent les facteurs d'instruments de musique.*

*Étendue des sons convenable à une voix ou à un instrument.*

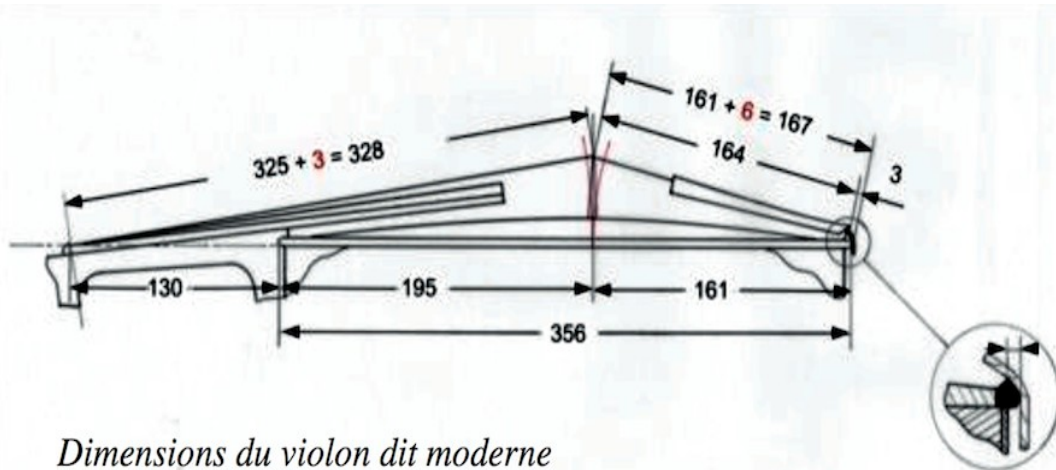
Pour disposer d'un repère pour cette "étendue convenable", les chanteurs et instrumentistes se sont servi d'instruments qui font entendre une note témoin et qui ont été nommés diapason.

L'instrument - que j'appellerai *diapason-fourche* - est constitué d'une fourche en métal qui vibre et émet ce son lorsqu'on la frappe. La hauteur du son peut être ajustée en modifiant la hauteur des branches. Son invention est attribuée au trompettiste et luthiste anglais **John Shore** (1662-1752) en **1711**. Le son émis est faible et pour mieux l'entendre, on doit poser l'instrument sur un résonateur, par exemple un petit caisson en bois, ou tout simplement sur le dessus d'un meuble.

*Par dérivation, [la note témoin] étant habituellement le LA 3, on en est venu à parler du « la du diapason », puis de « diapason » tout court. (Jacques Chailley, *Encyclopédia Universalis*)*

Ces instruments mécaniques sont de plus en plus remplacés par des appareils électroniques et d'excellentes "applis" pour téléphones mobiles qui produisent les fréquences sonores désirées.

Le mot *diapason* est également employé **pour les instruments à corde comme le violon ou la guitare** pour désigner la **longueur de la partie vibrante de la corde** à vide. Ainsi pour le violon, le diapason est la longueur depuis le chevalet de la table jusqu'au sillet de la tête de manche, qu'on divise en deux parties, du chevalet jusqu'au rebord de la table et de ce rebord jusqu'au sillet.



*Dimensions du violon dit moderne*

*Dessin de Christian Urbita, luthier à Cordes sur Ciel.*

*Reproduit de: Quelle longueur de corde vibrante pour le violon d'aujourd'hui ?*

## La mesure des intervalles par les longueurs de corde

Puisque la hauteur de la note LA est fixée par sa **fréquence**, il serait bon de s'interroger sur le sens musical de ce mot. Parler de la *fréquence d'un son musical* semble banal, mais c'est historiquement très récent. Cette notion a été introduite par les physiciens, plus exactement les acousticiens, à partir du 17<sup>e</sup> siècle. Elle s'est répandue plus tard chez les musiciens par l'usage d'instruments de mesure modernes, surtout électroniques. *(Pour plus de détails, voir le chapitre suivant)*

**Traditionnellement, en musique, on ne parlait pas de la hauteur absolue d'un seul son, mais de la différence de hauteur entre deux sons (hauteur relative),** autrement dit de la grandeur des **intervalles** entre sons.

On exprime la grandeur de ces intervalles en **tons** et en demi-tons, ou encore en *comma*, qui vaut environ 1/9<sup>e</sup> de ton ou 22 cents. Le **cent** est par définition 1/100<sup>e</sup> de demi-ton, et il y a 1200 cents dans une octave.

*Lorsqu'on a été capable de mesurer des fréquences, on a déterminé que le demi-ton, dans le système de tempérament égal, équivaut à un rapport de fréquences de **1,0595** et que le ton équivaut à un rapport de **1,1225**.*

### Le monocorde

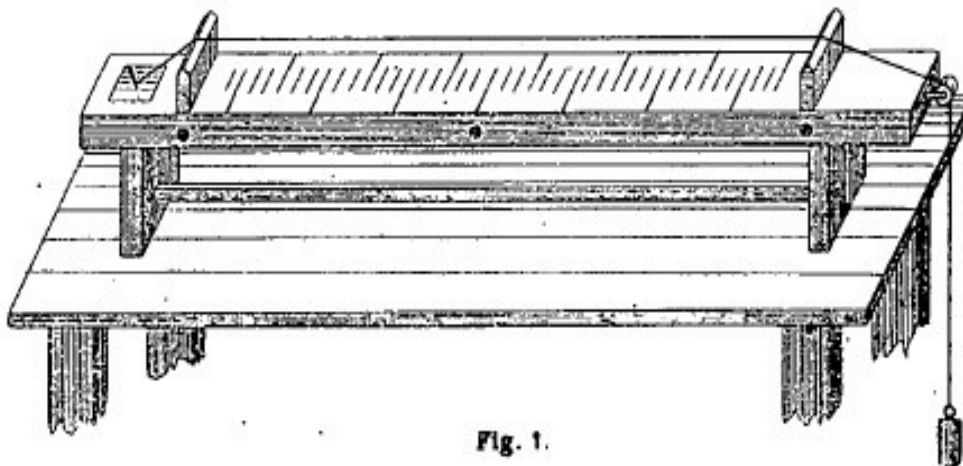
Puisqu'on ne savait pas mesurer des fréquences, comment les musiciens déterminaient-ils la valeur des intervalles entre les notes? Par exemple comment le philosophe grec **Pythagore** (vers 580 - vers 495 av.J.C.) pouvait-il définir les quintes, les tons et le comma?

Pythagore étudiait les sons musicaux à l'aide d'un instrument qu'il avait construit. Dans un ouvrage de 1706 intitulé *La Vie de Pythagore, ses symboles, ses vers dorez et la vie d'Hiéroclès*, **André**

**Dacier** écrivait: [Pythagore] *fit un instrument de la muraille de la chambre, avec des pieux qui tenaient lieu de chevilles et des cordes d'égale longueur, au bout desquelles il attacha différents poids, et en frappant plusieurs de ces cordes ensemble, il en formait différents accords et s'instruisait par là des raisons de cette différente harmonie, et des intervalles qui la causaient; et pour cela il fit le célèbre canon d'une seule corde, qui fut appelée **le canon de Pythagore**, où il marqua toutes les proportions harmoniques.* (kanon en grec = la loi, la règle)

Le canon est aussi appelé **monocorde**. **C'est en mesurant la longueur de la partie vibrante de la corde qu'on pouvait déterminer des intervalles avec précision.**

Au Moyen-Âge et à la Renaissance, on étudiait les sons avec un monocorde, variante de celui de Pythagore. **Boèce**, philosophe et homme politique romain (vers 480 - 524), dans son traité *De institutione musica*, transmet de nombreux éléments théoriques et pratiques sur son utilisation.



*Un exemple de monocorde*

*Extrait de: La musique et les musiciens, Albert Lavignac, 1938, p.7, édition numérique Gallica  
Merci à Metronimo*

**Guido d'Arezzo**, moine bénédictin italien (992 - apr. 1033) en étendit l'usage et trouva des procédures plus simples pour déterminer les intervalles, qu'il décrit dans son traité *Micrologus de disciplina artis musicæ*.

Selon **Denis Diderot** dans son *Encyclopédie* de 1765, *Le monocorde ancien était composé d'une règle divisée et subdivisée en plusieurs parties sur laquelle il y avait une corde de boyau ou de métal médiocrement tendue sur deux chevalets par les extrémités; au milieu de ces deux chevalets, il y en avait un autre mobile par le moyen duquel, en l'appliquant aux différentes divisions de la ligne, on trouvait en quel rapport les tons étaient avec les longueurs des cordes qui le rendaient. [...]*

*Lorsque la corde est divisée en deux parties égales, de façon que les parties soient comme 1 à 1, on les appelle **unisson**; si elles sont comme 2 à 1, on les nomme **octave** ou **diapason**; comme 1 à 3 **quinte** ou diapente; comme 4 à 3, **quarte** ou diatesseron; comme 5 à 4, diton ou **tierce majeure**; comme 6 à 5, demi-diton ou **tierce mineure**; enfin comme 14 à 25, demi-diton ou **dièse**.*

### **Le son de la corde libre**

Dans le monocorde, la hauteur du son émis par la corde entière en vibration n'est pas fixe. Elle dépend de plusieurs paramètres.

**La hauteur du son de la corde libre dépend de la longueur** entre les deux chevalets extrêmes (longueur de corde vibrante). Plus courte est la corde, plus haut est le son.

La hauteur dépend aussi de **la grosseur de la corde**. Dans les instruments où l'on a plusieurs cordes, la grosseur peut varier d'une corde à l'autre et la comparaison des sons ne peut être faite que par les longueurs mesurées sur une même corde.

Enfin, la hauteur dépend de **la tension de la corde**. La corde du monocorde est tendue au moyen d'un poids de valeur donnée. La tension change d'un jour à l'autre ou d'un moment à l'autre en fonction des fluctuations des caractéristiques physiques de la corde sous l'effet de la température et de l'humidité. Le son produit change donc pareillement.

**La corde ne fournit donc pas de son fixe de référence.**

### La corde divisée

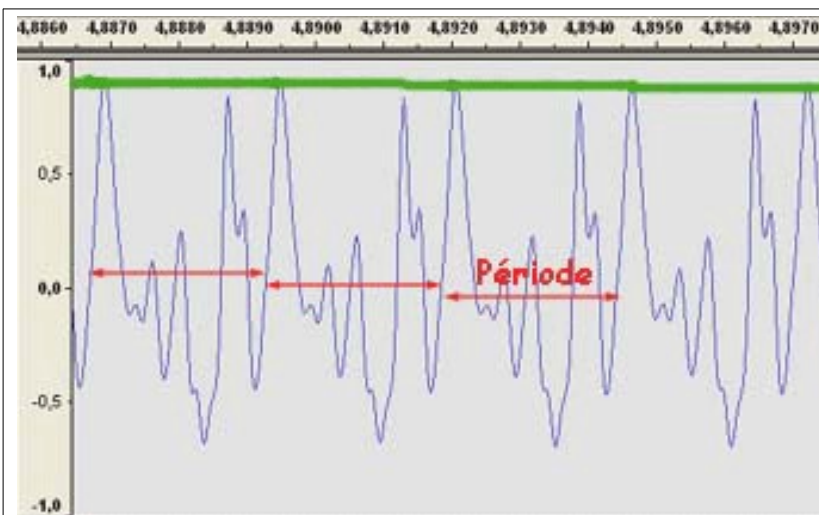
Dans leurs expérimentations, ces érudits inséraient un chevalet mobile pour partager la corde en fractions simples. La position du chevalet mobile était repérée sur une règle graduée au moyen de lettres (qui deviendront bien plus tard les noms des clés), et on comparait le son émis par les deux fractions de corde en fonction du rapport de leurs longueurs.

Comme le dit Diderot, diviser la corde en 3 parties en plaçant le chevalet au  $\frac{1}{3}$  ou  $\frac{2}{3}$  de sa longueur produit la *quinte*. La diviser en 5 produit la *tierce*. La tierce n'était pas prise en considération par Pythagore qui n'utilisait que les quintes et le rapport  $\frac{2}{3}$  dans l'élaboration de ses modes. La tierce juste avec son rapport  $\frac{4}{5}$  sera introduite dans la gamme par **Giuseppe Tartini**, compositeur italien de la Renaissance (1517-1590) (*voir chapitre précédent*).

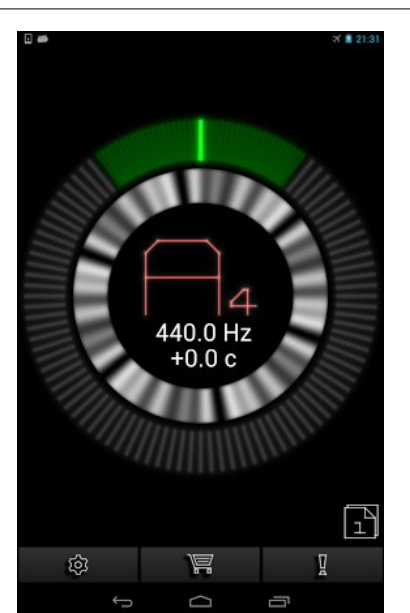
**Dans toutes les études rapportées depuis Pythagore jusqu'à la Renaissance, il n'est nullement question de sons fixes de référence.**

On ne mentionne que des rapports de longueur de corde. La hauteur de la corde à vide était fluctuante selon le moment. La notion de hauteur absolue était étrangère à la mentalité des musiciens. La notion de fréquence n'existait pas encore.

### La mesure des fréquences sonores



*Courbe de variation de la pression d'une onde sonore à l'échelle des millièmes de seconde. Elle montre sa répétition périodique (fréquence). Réalisé avec le logiciel Audacity*



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

Les études scientifiques du 19<sup>e</sup> siècle ont démontré et précisé les caractéristiques vibratoires du

son. La découverte de l'électricité a suscité l'invention d'appareils d'enregistrement et de mesure (microphone, oscilloscope...) qui affichent et donnent toutes les caractéristiques physiques du son.

Les notions d'ondes sonores, de fréquences et d'harmoniques ont été diffusées par les physiciens. Elles font maintenant partie de notre enseignement scolaire et de notre culture commune. Actuellement, n'importe quel ordinateur domestique ou smartphone peuvent enregistrer des sons et les analyser, avec un logiciel adéquat.

Les musiciens ont donc pris l'habitude d'exprimer la hauteur des sons en fréquence pour accorder leurs instruments. Ils utilisent pour cela des diapasons électroniques qui sont mis à leur disposition. Les musiciens peuvent ainsi régler la fréquence de leur LA avec une grande précision.

Toutefois, cette pratique d'accord de fréquence au diapason international issue de l'appareillage disponible ne doit pas nous dispenser de nous interroger sur son sens et son intérêt musical.

Les musiciens ont donc pris l'habitude d'exprimer la hauteur des sons en fréquence pour accorder leurs instruments. Ils utilisent pour cela des diapasons électroniques qui sont mis à leur disposition. Les musiciens peuvent ainsi régler la fréquence de leur LA avec une grande précision.

Toutefois, cette pratique d'accord de fréquence au diapason international issue de l'appareillage disponible ne doit pas nous dispenser de nous interroger sur son sens et son intérêt musical.

**Mesurer la fréquence des sons avec une précision de 0,1 Hz signifie-t-il pour autant que cela soit nécessaire ou utile dans la pratique musicale? Et que l'esthétique musicale en tire avantage?** La suite de cette étude va nous permettre de nous rendre compte que tout est affaire de circonstances.

## La plasticité des notes instrumentales

La rigueur mathématique de la valeur du diapason exprimée en hertz, typiquement 440 Hz, contraste avec la réalité concrète de l'émission sonore des instruments. Examinons dans quelle mesure une **précision de 1 Hz** peut avoir un sens musical pour les notes produites par un instrument?

Elle ne peut avoir un sens que si l'instrument produit des sons dont la fréquence reste fixe à 1 Hz près. C'est effectivement le cas des **instruments à synthèse électronique (synthétiseurs, pianos électroniques)** dont toutes les caractéristiques sonores (fréquence, timbre, volume) sont contrôlées. Cela ne concerne donc que ce type d'instruments d'existence très récente.

Mais en ce qui concerne les autres instruments, la hauteur de leur émission fluctue. Elle n'est pas le résultat d'un processus strictement mécanique. **Le son naît de l'action, de l'énergie et de la pensée d'un instrumentiste en symbiose vivante avec son instrument.** En particulier, la hauteur du son d'une note varie avec la pression de l'air exercée et avec la température de l'instrument.

### La pression du souffle

Émettre une note fixe tenue en soufflant dans un instrument à vent ne produit pas un son fixe. Il s'étend sur une certaine fourchette de fréquences liée à la façon dont on souffle (le jeu). **Si on souffle plus fort, le son peut monter ou baisser.**

Interrogé sur cette question, **René Caussé**, directeur de l'équipe de recherche en acoustique musicale à l'**IRCAM** de Paris (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique), m'a précisé: *La fréquence [d'un instrument] peut varier avec la nuance de jeu. Par exemple pour la clarinette, lorsque l'on joue plus fort, la fréquence de jeu diminue. Si l'on remplace le musicien par*

une bouche artificielle et que l'on agit uniquement sur la pression dans la bouche, on remarque que c'est le contraire qui se produit, la fréquence augmente avec la pression dans la bouche. En fait le musicien pour jouer plus fort va agir sur plusieurs paramètres de contrôle: la pression dans la bouche, la force d'appui de la lèvre sur l'anche et éventuellement la position de l'application de cette force.



Cornet à bouquin  
Merci à APEMUTAM

Selon les études du professeur **Émile Leipp** (1913 - 1986) et de **Michèle Castellengo** (Groupe d'Acoustique Musicale) effectuées dans les années 1970 - 80 avec des flutes traversières, le ton varie d'environ 4 à 6 Hz selon la façon de positionner la bouche.

Prenons le cas d'un instrument ancien comme **le cornet à bouquin**. C'est un instrument à vent en bois de forme allongée généralement courbe. Il résulte de l'évolution d'un instrument plus ancien fait d'une simple corne animale percée de trous. Son corps est constitué de deux parties en bois, creusées en demi-perce conique, puis assemblées et collées. Il est ensuite taillé extérieurement en 8 pans ou arrondi, et percé de 6 ou 7 trous.

On ajoute une embouchure séparée, en forme d'entonnoir. Enfin, il est entouré d'une gaine en cuir ou en parchemin. Le cornet à bouquin apparaît en Italie au 15<sup>e</sup> siècle, et se répand dans toute l'Europe. Il était très utilisé au 17<sup>e</sup> siècle.

Interrogé, le facteur de cornets **Damien Bardonnet** m'a répondu ceci: *Le diapason (au sens moderne du terme) est une notion floue pour un cornet... Un même instrument, joué avec différentes embouchures, ou différents musiciens, peut sonner à des diapasons variant de plus d'un quart de ton [...] Un même musicien [...] muni du même matériel vous dira que le diapason change selon qu'il a mangé du poireau ou bu la veille... C'est dire si cette notion est vague ! Une simple mesure du LA [avec nos instruments scientifiques actuels], note flexible s'il en est, [...] est donc assez aléatoire !*

Pourtant, sur le marché, des cornets de fabrication récente sont labellisés aux diapasons bien précis de 392, 415, 440, 465, 490, ou 520 Hz. Damien Bardonnet explique qu'il ne s'agit pas là de la valeur précise de leur LA, mais d'une nomenclature pour désigner le type de l'instrument. Un cornet en 440 permet de jouer avec les doigtés standards en accord avec un clavecin accordé à 440 Hz.

Afin de préparer le lecteur à la multiplicité des diapasons que j'évoquerai plus loin, il faut préciser que le hautboïste **Bruce Haynes**, chercheur minutieux sur les instruments anciens et leur diapason, (1994) rapporte ceci: *Un joueur chevronné, Douglas Kirk, me fit la démonstration d'embouchures de différentes tailles et différentes formes. L'écart de fréquences obtenu en touchant l'embouchure avec la paume atteignait une quinte. Toutefois, sur l'instrument, et dans les conditions réelles [identiques] de la représentation, [les joueurs professionnels] jouent exactement au même diapason. De sorte qu'on peut définir un ton de cornet.*

Des variations de fréquence d'émission ont lieu aussi avec les instruments à cordes. Selon l'enquête fouillée du même Bruce Haynes (2002), quand un violoniste joue dans la nuance *forte*, le son est 5 Hz plus haut que lorsqu'il joue *piano*.

Quant aux chanteurs, leur voix oscille sur un intervalle de 5 à 7 Hz dans leurs vibratos.

Ce que l'on peut en déduire, c'est que **les sons vivants, émis par des individus sensibles, sont malléables, plastiques**, et n'ont rien à faire avec des considérations mathématiques.

## La température ambiante

Les instruments à vent, que ce soient des cornets, des hautbois, ou des orgues, sont sensibles à la température et à l'hygrométrie de l'air.

Selon des données fournies par l'IRCAM, calculées avec le logiciel RESONANS (*citées par le site web [papiermusique](#)*), le diapason d'un instrument à vent qui est de 440 Hz à 20°C, descend à 436 Hz à 15°C, et à 433 Hz à 10°C. Il monte à 444 Hz à 25°C et à 447 à 30°C. En Angleterre, dans les églises non chauffées, la variation de hauteur entre hiver et été peut aller jusqu'à 18 Hz.

*Note de physique: Les fréquences sont proportionnelles à la racine carrée de la température absolue. Définition de la température absolue: voir mon article [L'éther de la physique quantique](#).*

Inversement, le diapason des instruments à cordes (clavecins, luths, violons) baisse lorsque la température ambiante augmente.

La température d'un instrument à vent dépend non seulement de la température ambiante, mais aussi du souffle qui le traverse. Pendant un concert, les instruments à vent chauffent. À propos des cuivres, René Causse précise que *généralement on considère que le musicien souffle un air plus chaud [que la température ambiante], de l'ordre de 28,5°C, ce qui fait une différence [de hauteur] de l'ordre de 16 cents (100 cents représentent 1/2 ton). On peut rajouter aussi à ces variations l'influence de l'air soufflé qui est plus chargé en CO2 et une concentration importante de CO2 fait baisser la fréquence de jeu.*

Dans un orgue, de surcroît, la température n'est pas homogène dans les tuyaux, et l'équilibre thermique est sans cesse mouvant.

Lorsqu'on cherche à mesurer la valeur du diapason d'un instrument ancien, les appareils fournissent des résultats en Hz, par exemple 415 Hz. Mais en réalité, à cause des fluctuations, c'est une moyenne qui sous-entend des variations entre 410 et 420 Hz.

Émile Leipp et Michèle Castellengo ont effectué des mesures pendant des concerts de l'opéra de Paris dans les années 1970. Ils ont relevé des fluctuations du LA de l'ordre de 10 Hz. Ni les musiciens, ni les auditeurs ne sont conscients de cette variation au cours de l'interprétation.

Contraindre une note à rester à un niveau fixe est une préoccupation récente qui est apparue avec les pratiques modernes d'accordage influencées par les apports de la physique et de l'électronique.

## Quel est l'intérêt de fixer un diapason?

Si les sons sont "plastiques", comment expliquer le besoin moderne de définir un diapason très précis?

Nous allons nous transporter dans des contextes musicaux divers afin de nous rendre compte dans quelles circonstances apparaît l'intérêt ou la nécessité de définir un son commun de référence. Un son commun de référence n'implique pas forcément qu'il soit normalisé universellement. Il peut être limité à une circonstance locale et éphémère.

## Je chante seul

Vous êtes seul(e) et l'envie vous vient de chanter spontanément *Hallelujah* de Leonard Cohen. Vous entonnez cette chanson à la hauteur qui vous vient naturellement. La hauteur de la note de départ détermine toutes les autres. Même si vous chantez la chanson plus haut ou plus bas que Leonard Cohen, *Hallelujah* reste *Hallelujah*, et les personnes qui vous environnent la reconnaissent et pourraient la chanter avec vous. Le diapason n'intervient pas dans l'identité de la chanson. Bien

que le compositeur contemporain l'ait écrite dans un certain registre, la hauteur est secondaire.

<https://youtu.be/1H0ou7FvNJY>

*Question:* lorsque vous avez entonné la chanson, vous êtes-vous soucieux de la valeur du diapason?

Probablement pas. **Vous vous êtes peut-être soucieux de la prendre ni trop haut, ni trop bas, pour qu'elle corresponde à votre registre vocal.** Cette hauteur de départ peut varier selon votre état, différente si vous chantez le matin ou le soir, un jour ou un autre. Elle correspond à ce que vous êtes.

## Le chanteur au Moyen-Âge

C'est exactement l'esprit dans lequel les chanteurs choisissaient leur hauteur chez les Grecs et au Moyen-Âge.

Au Moyen-Âge, avant que ne se répande l'usage des instruments à clavier, la musique sacrée et la musique profane étaient uniquement chantées. **Le chantre prenait la hauteur qui correspondait à sa voix**, en rapport avec l'étendue musicale (la *tessiture*) de la pièce à chanter.

La notion de diapason était complètement étrangère à la musique occidentale antérieure au 16<sup>e</sup> siècle. Il est vrai qu'une hauteur était parfois indiquée sur la "partition". Mais c'était, comme l'écrit *Ludovico Zacconi* à Venise en 1596 dans *Prattica di Musica*, *pour avoir des égards pour ceux qui chanteront, afin qu'ils soient à leur aise avec la hauteur, ni trop haut ni trop bas.* (cité par *Dolmetsch Online*)

Il y a donc bien l'indication d'un **ordre de grandeur de la hauteur**. Mais elle reste indéterminée dans une certaine fourchette, favorable à la voix du chanteur.

## La solmisation

Cette indétermination se reflète dans la pratique de la **solmisation**. Elle consiste à chanter les notes avec des syllabes.

Actuellement, nous solmisons avec les syllabes *do, ré, mi, fa, sol, la, si*. Pour nous, chacun de ces noms est associé à une hauteur parfaitement définie. Or cela résulte d'une évolution récente. Auparavant, **ces syllabes**, qui se limitaient à *ut, ré, mi, fa, sol, la* **ne désignaient que des hauteurs relatives**. N'importe quel nom de note pouvait être associé à n'importe quelle hauteur. Ils appartenaient à des hexacordes, groupes de 6 notes définis par leurs intervalles, comme nos modes contemporains à 7 notes. (voir en annexe *Hexacordes et solmisation*)

En pratique, des chantres à la voix grave chantaient plus bas que ceux à la voix plus aigüe, **sans pour autant changer le nom des notes**. Si la chanson commençait par un SOL, défini par son appartenance à un hexacorde, on chantait SOL, quelle que soit la hauteur de la chanson. **Les noms des notes définissaient des intervalles, pas des hauteurs absolues** (principe modal).

Cette solmisation qui emploie les noms de notes *do, ré, mi*, etc. pour désigner des hauteurs relatives mobiles a été défendue en France par Pierre Galin (1786 - 1821) et ses idées ont été propagées par Aimé Paris et Émile Chev  (Méthode Galin - Paris - Chev , 1862).

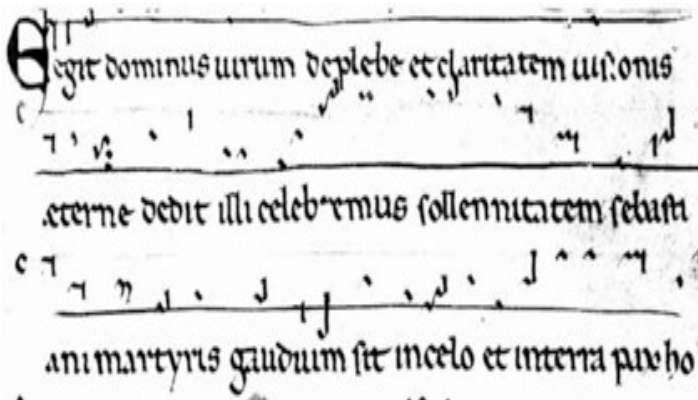
La solmisation est pratiquée encore actuellement dans les pays anglophones avec les noms *do, re, mi, fa, so, la, ti*, qui indiquent les degrés de la gamme, tandis que la hauteur absolue est désignée par les lettres A à G. C'est le système *Tonic Sol-Fa* inventé par l'enseignante anglaise **Sarah Anna Glover** (1785 - 1867), élargi par **John Curwen** (1816–1880). En Hongrie, la méthode d'éducation musicale développée par le compositeur **Zoltán Kodály** (1882-1967) inclut également ce système.

<https://youtu.be/pLm07s8fnzM>



## La notation moyenâgeuse n'indique que des intervalles

L'attention qu'apportaient les musiciens aux **intervalles** entre les notes (hauteur relative) et leur indifférence vis-à-vis de la hauteur absolue se reflètent dans la notation musicale écrite employée à partir du 9<sup>e</sup> siècle et plus tard.



*Notation musicale en neumes avec une ligne de repère au 11<sup>e</sup> siècle  
Merci à [symphozik.info](http://symphozik.info)*



*Notation musicale en neumes carrés sur 5 lignes vers 1300  
Manuscrit espagnol. Merci à [Wikipedia](https://en.wikipedia.org/)*

Celle-ci consistait en signes courbes ou carrés appelés **neumes**. Initialement, il n'existait pas de portée comme actuellement. Puis une ligne horizontale a été introduite comme repère d'un son de base. Mais sa hauteur n'était pas déterminée. Puis on employa deux lignes, puis 4, avant d'en arriver à 5. Dans tous les cas, elles n'indiquaient que des hauteurs relatives.

Actuellement, la notation sur une portée est fondamentalement relative. Elle ne devient absolue que lorsqu'on inscrit une clé au début de la portée (clé de SOL, de FA ou d'UT). La clé détermine le nom des notes en fonction de leur position sur les lignes et interlignes.

## Je chante en groupe

Vous êtes maintenant en groupe, à une fête d'anniversaire par exemple, ou en randonnée, et vous voulez chanter tous ensemble. Quelqu'un entonne donc *Hallelujah* et votre voix se joint à la sienne. Vous chantez avec lui sur le même ton, vous êtes en accord, même si ce n'est pas forcément la hauteur que vous auriez prise spontanément.

*Question:* La personne qui a initié le chant a-t-elle sorti un diapason de sa poche pour déterminer à quelle hauteur le groupe devait chanter la mélodie? À moins qu'elle ne soit un professionnel, ou un amateur avancé, cela arrive rarement. Vous avez pris spontanément le ton qu'elle a donné.

**Donner le ton**, c'est fixer la hauteur de la note de départ. Peu importe quelle hauteur, il est seulement recommandé que **la personne la choisisse de telle sorte que les hauteurs extrêmes de la mélodie restent accessibles à tout le monde sans forcer la voix.**

Cette pratique est employée dans des groupes populaires qui n'ont pas reçu d'éducation en solfège. C'est le cas dans les groupes de chant *Sacred Harp* en Amérique du Nord. Des amateurs se rassemblent en se disposant en carré (sans harpe ni autre instrument) et chantent a capella des chants répertoriés dans le livre *Sacred Harp* (d'où leur nom), publié d'abord en 1844 par B.F. White et E. J. King. Ils mènent un chant chacun à leur tour. Pour commencer le meneur donne le ton, choisi pour que le groupe soit à l'aise dans toute l'étendue en hauteur de ce chant particulier.

<https://youtu.be/EqWd0912bQ0>

## Je chante en étant accompagné par un instrument

Si vous chantez, seul ou en chœur, en étant accompagné par un instrument, le choix d'un ton initial se complique.

Lorsque vous entonnez une chanson, l'instrumentiste détermine sur quelle note vous démarrez, et vous suivra, à condition qu'il puisse accorder son instrument sur votre voix.

Or la hauteur des notes de l'instrument est plus ou moins fixée par sa construction, et le musicien ne peut l'ajuster que dans une certaine étendue qui varie avec le type d'instrument. Si vous êtes en harmonie avec aucune de ses notes, c'est-à-dire si vous êtes un peu décalé vers le haut ou vers le bas, il vous demandera de vous ajuster à son diapason.

### Accordages

Quel est donc son diapason? Tout dépend de l'instrument.

Imaginez que vous êtes accompagné à la **guitare**. Le guitariste a la possibilité d'ajuster rapidement chacune de ses cordes, tout comme un violon ou d'autres instruments à cordes. Il peut donc choisir le diapason qu'il veut, par exemple en choisissant le MI de la première corde. Ce qui est essentiel, c'est qu'une fois fixé ce MI, les intervalles avec les autres cordes soient justes. Avec cette condition, vous vous régalerez de chanter même si vous n'êtes pas réglés sur la norme internationale.

Dans l'histoire occidentale, cela se passait à peu près comme je viens de le décrire lorsqu'un chanteur ou une chanteuse étaient accompagnés par un instrument tel que le **luth**. Le chanteur choisissait le ton adapté à sa voix, et l'instrument se calait sur la voix du chanteur.

### Transposition

Par contre, l'accordage d'un **piano** est une opération longue et délicate. Il faut faire intervenir un accordeur de métier et le pianiste espère que cet accordage va durer suffisamment longtemps.

Toutefois, sans modifier son accordage, le pianiste a la possibilité de décaler la hauteur de la mélodie par degrés multiples d'un demi-ton.

Un **demi-ton**, c'est le plus petit intervalle entre deux notes voisines de la gamme, par exemple entre le SOL# et le LA (soit entre 415 Hz et 440 Hz selon les normes actuelles).

Lorsque le pianiste se décale de cette façon, il change la tonalité dans laquelle il joue. Par exemple il effectue un décalage d'un ton en passant de la gamme de DO majeur à RÉ majeur. C'est ce qu'on appelle **transposer**.

Il en était de même avec les **orgues** d'église. L'organiste se calait sur la voix du chanteur en transposant.

### Les ensembles de musiciens

Les contraintes pratiques se font plus fortes lorsque plusieurs instrumentistes se rencontrent. Ils doivent prendre un peu de temps pour s'accorder afin de jouer ensemble dans le même ton. Mais lequel choisir?

A priori ils n'ont pas besoin de se référer à une norme internationale. D'ailleurs une telle norme a longtemps été inexistante. **Il suffit de prendre l'un des instruments présents comme la référence, et les autres le suivent.** L'instrument référent choisi est celui qui est le plus difficile à accorder et qu'on évite de modifier.

La guitare ou le violon peuvent rapidement être accordés à volonté en modifiant la tension des

cordes. Par contre, la hauteur sonore des bois ou des cuivres est fixée par le fabricant dès leur construction. Toutefois, ils bénéficient de la possibilité de régler légèrement leur hauteur en déplaçant le bec ou l'embouchure. Enfin, si l'ensemble instrumental comprend un instrument comme le piano, les autres s'accordent sur lui.

C'est exactement ce qui se passait autrefois, alors qu'on n'avait pas de norme, ni internationale, ni nationale, ni locale.

## Accordage instrumental à la Renaissance et à l'époque baroque

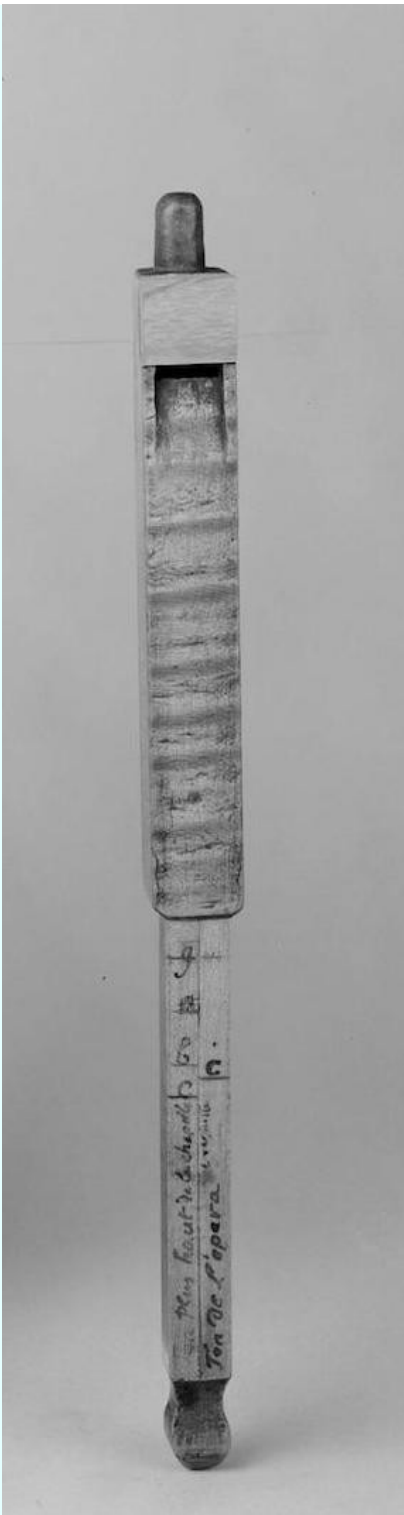
Jusqu'à la Renaissance, les ensembles de musiciens étaient composés d'instruments d'un même type, par exemple des ensembles de **flutes**. Lorsqu'elles étaient fabriquées par le même facteur, elles étaient accordées de la même façon par construction. Mais ces diapasons de facture variaient largement d'un facteur à l'autre, selon les endroits. Ils variaient aussi selon les instruments. On peut dire qu'**il a existé des diapasons de toutes les hauteurs dans un large intervalle de plus d'un quart (2 tons et demi)**.

À la fin de la **Renaissance** (16<sup>e</sup> siècle) et au cours de la **période baroque** qui lui a succédé (1600 à 1750 environ, variable selon les pays), la musique instrumentale changea de rôle et de style. D'accompagnante des voix, elle prit son indépendance et créa ses propres structures musicales, adaptées aux possibilités techniques des instruments. Des compositeurs écrivirent spécifiquement pour des ensembles instrumentaux: en Italie **Claudio Monteverdi** (1567-1643), en Allemagne **Johann Sebastian Bach** (1685 - 1750), **Georg Philipp Telemann** (1681-1767), en Angleterre **Georg Friedrich Haendel** (1685 - 1759), en France **Jean-Philippe Rameau** (1683-1764), etc.

Dans les ensembles orchestraux, des instruments de types différents se rencontraient, par exemple des cordes et des vents. De nouveaux instruments à vent étaient inventés. Certains avaient des diapason hauts, d'autres bas. Et malgré cela, ils devaient jouer en accord.

L'ensemble contemporain *Douce Mémoire*, qui ressuscite la musique de la Renaissance avec une grande recherche d'authenticité, nous apprend que: *Dans la grande écriture à six voix, les deux parties de dessus sont tenues par le cornet et le dessus de hautbois appelé aussi chalémie, et les autres parties par deux hautbois contralto, la sacqueboute et la basse de hautbois. Le diapason extrêmement haut de ces instruments, 520 hertz, soit une tierce mineure au-dessus de notre diapason moderne, confère à cette bande une sonorité puissante.* (livret d'accompagnement de l'album *Grand Bal à la Cour d'Henri IV*)

Les instruments s'accordaient sur l'un d'eux choisi comme référence, tel que le cornet à bouquin. Personne ne se



Diapason à pompe, 18<sup>e</sup> siècle. Tons de l'Opéra et ton de Chapelle de Versailles.

Ancienne collection Louis Clapisson. Musée de la musique, Paris. Photo Jean-Claude Billing. Merci à Cité de la Musique

préoccupait d'avoir un diapason universel. Par exemple, le diapason choisi pour la musique d'église était celui de l'orgue local.

La note de référence n'était généralement pas le LA comme maintenant, mais plutôt l'UT, ou le FA. L'UT correspond à la corde grave à vide du violoncelle, et au tuyau d'orgue de 8 pieds. Ce n'est qu'à la fin du 19<sup>e</sup> siècle que l'on a choisi le LA, car il correspond à la troisième corde à vide du violon.

À la fin du 17<sup>e</sup> siècle, les musiciens confièrent parfois le rôle de référence à un instrument entièrement dédié à cette fonction. C'était une flute sans trous appelée **flute d'accord** ou **diapason à piston**. Le facteur d'orgue **Dom Bedos**, moine bénédictin (1709 - 1779), auteur du traité *L'art du facteur d'orgues*, recommande cet instrument, dérivé de la flute de saule qui est fabriquée avec une tige de saule. On peut aussi la fabriquer avec une [tige de frêne](#). En séparant le cœur du pourtour, on crée une partie coulissante, le piston. Dom Bedos conseille de marquer sur le piston *les tons que l'on prendra sur un orgue parfaitement d'accord et bien au ton*.

## La transposition entre instruments

Comment faire en sorte que des instruments de facture et de diapasons différents puissent jouer ensemble?

Tout simplement, les fabricants s'arrangeaient pour que **le décalage de diapason entre instruments soit un multiple de demi-tons**. Il était fréquent d'avoir des différences de diapason de 1 ton, 1,5 tons (une tierce mineure) ou 2,5 tons (une quarte). Les instrumentistes savaient transposer d'une tonalité à l'autre. Cela faisait partie des talents de tout musicien expérimenté, tout particulièrement des organistes. Concrètement, si un instrument joue un DO, et qu'un deuxième a un diapason plus bas d'un ton, il doit jouer un RÉ pour sonner à la même hauteur.

Une survivance de cette pratique réside dans l'existence actuelle d'**instruments dits transpositeurs**, comme la clarinette. La clarinette la plus courante est dite en SI bémol, car son LA (392 Hz) est plus bas d'un ton que la norme. Donc lorsque le clarinettiste émet un son avec le doigté de DO, le son émis est en réalité un SI bémol. Pour transposer, le musicien lit une partition adaptée à son instrument, ou bien il lit la partition d'origine en changeant la clé, par exemple la clé d'UT à la place de la clé de SOL ou de FA.

## Le besoin pratique de consensus

Lorsque les musiciens se sont déplacés de place en place, ils rencontraient d'autres musiciens jouant du même instrument souvent accordé différemment. Cela soulevait des difficultés d'accordage sévères. Y remédier entraînait des dépenses car, **pour les instruments à vent, il était impossible de modifier le diapason au-delà d'un petit ajustement, il fallait refaire un instrument neuf**.

C'est de ces inconvénients qu'est née peu à peu l'idée d'instituer des normes pratiques. Le compositeur prussien **Johann Joachim Quantz** (1697 - 1773) écrit en 1752: *La diversité des diapasons utilisés pour l'accord est des plus défavorables à la musique en général. En musique vocale, il a l'inconvénient que les chanteurs se produisant en un endroit où on a un diapason bas peuvent difficilement interpréter des arias écrites pour eux en un endroit où le diapason est haut, et vice-versa. Pour cette raison, on espère beaucoup que soit introduit un seul diapason pour tous les endroits.* (Cité par Bruce Haynes)

À la période de l'industrialisation du 19<sup>e</sup> siècle, les facteurs d'instruments étaient particulièrement troublés. Ils distribuaient leurs instruments en série et non plus à l'unité, et desservaient des

régions de plus en plus vastes. Fallait-il en fabriquer pour tous les diapasons possibles? La tâche devenait compliquée. **Instituer un diapason commun pourrait permettre d'uniformiser la production artisanale.**

## L'accordage des instruments anciens

Étant donné que nous sommes capables de mesurer des fréquences seulement depuis quelques 200 ans, comment les musicologues peuvent-ils avoir accès aux valeurs des diapasons anciens? Par quel moyen connaissons-nous la fréquence à laquelle un facteur accordait son instrument au moment de sa fabrication? Comment ces diapasons variaient-ils selon les lieux, les époques et les instruments? C'est ce que nous allons découvrir.

### Les méthodes de relevé des diapasons anciens

Deux types de sources peuvent nous donner des indications plus ou moins précises sur la valeur des diapasons de facture instrumentale.

L'une est **l'étude d'instruments d'époques qui ont survécu** (orgues, instruments à vent et à cordes). Il est possible de les analyser avec nos appareils électroniques modernes et de mesurer à quelle fréquence ils sonnaient.

Il faut toutefois garder à l'esprit que nos critères de mesure correspondent à des questionnements actuels qui n'habitaient pas les esprits musicaux de l'époque. Alors que le choix des tempéraments des échelles musicales a suscité de nombreux débats et controverses, il n'en est rien en ce qui concerne la disparité des diapasons. Aussi mesurer la valeur du diapason d'un instrument ancien nous apprend seulement le choix qu'en a fait son fabricant.

Nos appareils de mesure électroniques nous fournissent des résultats en fréquences précises à 1 Hz près. Cette précision n'a qu'un sens tout relatif. La mesure est faite dans des conditions expérimentales données de température et d'hygrométrie qui ne correspondent pas forcément aux conditions anciennes. En réalité **la fréquence peut fluctuer plus ou moins largement autour de cette valeur**, selon la façon de jouer de l'instrument ou selon la température.

C'est pourquoi **le nombre relevé est une moyenne**. Si l'on relève une valeur de 440 Hz, on peut juste en déduire que la musique était jouée entre 430 Hz et 450 Hz selon qu'il faisait plus ou moins froid.

Une deuxième façon de recueillir des renseignements sur le diapason des instruments anciens est de **se reporter aux écrits, récits, ou traités musicaux des auteurs anciens et des éditeurs**, tels ceux de **Marin Mersenne** (*voir chapitre suivant*) et d'autres comme **Thoinot Arbeau** (1519 – 1595) et **Michael Praetorius** (1571 - 1621).

À partir de la description d'un instrument et des planches de dessins, par exemple dans *L'Harmonie Universelle* de Mersenne, on peut calculer son diapason probable en relevant ses dimensions. Pour les orgues, on peut calculer la fréquence d'une note émise par un tuyau en connaissant sa longueur. Son diamètre et la pression de l'air qui le traverse influent aussi mais relativement peu.

Dans les traités et rapports, il est aussi question des différences de diapason entre les instruments et entre différents types de musiques. Ces différences ne sont évidemment pas notées en fréquence, mais **en intervalles de demi-tons**.

Quelques auteurs ont associé ces deux aspects (les descriptions anciennes et les mesures

contemporaines) dans leurs recherches. Il en est résulté un extraordinaire tableau de détails, que d'autres ont enrichi, précisé ou corrigé par la suite. L'un d'eux est **Alexander Ellis** (*On The History Of Musical Pitch, 1877*), qui a fourni de nombreuses données précises de diapason. Malheureusement, il n'indique pas les conditions de température dans lesquelles les mesures ont été faites, ce qui les rend approximatives.

Les travaux pionniers de **Émile Leipp** dans les années 70 (*voir plus haut*) ont apporté des compréhensions importantes sur l'acoustique musicale dans le cadre du GAM (Groupe d'Acoustique Musicale).

Plus récemment **Bruce Haynes** (*A history of performing pitch - The story of A, 2002*) a effectué un travail remarquable très minutieux sur l'évolution du diapason par époque, région et instrument.

Ces auteurs ont montré que le diapason variait à la fois selon le type d'instrument, selon les lieux, et selon les époques.

Ainsi Leipp, en analysant les écrits de Praetorius, a estimé qu'à son époque le ton moyen de base était de 435 Hz environ, avec de nombreux autres tons différents qui s'épandaient sur une amplitude de 327 à 488, en tenant compte des écarts probables de température (*conférence du GAM n°40, 1970*).

Sur la période allant du 16<sup>e</sup> au 19<sup>e</sup> siècle, **le diapason du LA3 s'étageait entre 330 et 560 Hz**, ce qui constitue une grande amplitude de 5 tons environ.

## Un ton pour l'église, un autre pour l'orchestre, un autre pour l'opéra

Au 16<sup>e</sup> siècle et jusqu'au 19<sup>e</sup>, **plusieurs diapasons se côtoyaient dans même lieu au même moment**. Chacun était employé pour un genre de musique approprié ou par un instrument approprié.

L'un était destiné à la musique vocale et adapté aux chœurs. Comme cette musique était pratiquée à l'église, ce diapason était nommé en France le **ton d'église** ou plus souvent **ton de chapelle** (en anglais *church pitch* ou *Quire pitch*, en allemand *Chorton*, en italien *tuono chorista*).

Le ton de chapelle variait dans une marge importante selon les endroits et les époques. Il était assez bas, en moyenne 392 Hz, un ton plus bas que le ton actuel,. Nous le noterons LA-2 [demi-tons].

*Notations: Si nous notons par LA le diapason actuel de 440 Hz, suivant la notation de Haynes qui procède par demi-tons, nous noterons LA-2 un diapason situé un ton plus bas, soit deux demi-tons. La notation par demi-tons est suffisamment souple pour ne pas fixer une fréquence précise qui n'existait pas.*

Les orchestres adoptaient un ton autre que le ton de chapelle. C'était le **ton de chambre** ou **ton d'écurie** (en anglais *chamber pitch*, en allemand *Kammerton*).

Du temps de Praetorius (début 17<sup>e</sup> siècle) le ton de chambre était un ton plus haut que celui de chapelle (chœur). En France, au 17<sup>e</sup> siècle, il était 1,5 ton plus haut. Au 18<sup>e</sup> siècle, en Allemagne, c'était l'inverse, le Kammerton (chambre) est descendu aux alentours de 415 Hz tandis que le Chorton (orgues et cuivres) est monté vers 465 Hz.

Les opéras avaient leur ton propre, le **ton d'opéra** (*opera pitch*). Il était parfois le même que le ton de chambre (orchestral), parfois plus haut, parfois plus bas.

Le philosophe et musicien genevois **Jean-Jacques Rousseau** (1712 - 1778) écrit dans son *Dictionnaire de musique* au mot TON: *Dans les églises, il y a le ton du chœur pour le plain-chant. Il y a pour la musique le ton de chapelle et le ton d'opéra. Ce dernier n'a rien de fixe; mais en France, il est ordinairement plus bas que l'autre.*

Dans son [ouvrage](#) *Nouveau manuel complet du facteur d'orgues: ou traité théorique et pratique de l'art de construire les orgues*, 1849, p.49, Monsieur **Marie-Pierre Hamel** (1786-1879) écrit:

*Dans le XVII<sup>e</sup> siècle, on accordait les orgues, en Allemagne, au **ton de chambre**, qui était celui des orchestres de ce temps, ou au **ton de chœur**, qui était d'un ton plus élevé. Ce dernier exigeant des tuyaux moins longs, était le plus fréquemment employé à cause de l'économie qu'il procurait. Cependant comme la musique d'église se trouve quelquefois accompagnée par des instruments d'orchestre, qui ne peuvent point facilement transposer ni changer leur diapason, on mettait dans les orgues des jeux accordés au ton d'orchestre et devant leur nom on mettait celui de Kammer: ainsi Kammer floete voulait dire flûte au ton de chambre ou d'orchestre. Il est évident que ces jeux ne pouvaient point se mélanger avec ceux qui étaient accordés au ton de chœur, et qu'ils formaient réellement un orgue à part.*

*En France, **le ton d'orchestre**, quoiqu'il n'ait rien de bien fixe, est celui dont le LA est produit par 864 vibrations dans une seconde [432 Hz] (il est le même à Francfort-sur-le-Mein), et **le ton de chapelle** est de trois grands quarts de ton ou près d'un ton plus bas. Ainsi le ton de chœur chez les Allemands est le plus élevé; le ton de chapelle, chez nous, est de près de deux tons plus bas, et le diapason d'orchestre tient le milieu.*

*Maintenant c'est à ce dernier ton que l'on accorde tous les orgues neufs en France et en Allemagne.*

*Mais comme il est encore beaucoup d'orgues au ton de chapelle, on a imaginé un moyen pour les jouer à l'unisson des instruments d'orchestre sans être obligé de transposer, et cela au moyen d'un clavier qui peut se mouvoir à droite ou à gauche, selon qu'on veut hausser ou baisser le ton. Ce mécanisme, quoiqu'il soit souvent assez difficile de l'adapter à un orgue qui a plusieurs claviers, est cependant plus simple et plus efficace que le moyen qu'on employait en mettant dans l'orgue des jeux au ton de chambre, et d'autres au ton de chœur.*

## Variations entre instruments

Avoir un ton d'orchestre n'implique pas que les instruments étaient tous fabriqués à ce diapason, mais seulement qu'ils jouaient dans ce ton. En effet, ils pouvaient être accordés par fabrication à 1 ton, 1,5 tons, ou une quarte de différence avec le ton d'orchestre. Pour jouer dans le ton d'orchestre, ils transposaient.

Selon Haynes, les instruments du 17<sup>e</sup> siècle étaient répartis en trois catégories selon la hauteur de leur diapason. Il y avait ceux dont les diapasons étaient "naturels" (*coristi* en italien), d'autres à un diapason bas et la troisième catégorie à diapason haut.

Les **violons**, les **flutes à bec**, les **cromornes** étaient dans la catégorie haute, tandis que les flutes traversières de la Renaissance étaient dans la basse (environ 405).

Les **cornets** se trouvaient dans la catégorie haute. Partout en Europe, ils venaient principalement des facteurs de Venise, ce qui a conduit à une certaine uniformisation du diapason de cornet. Ce ton faisait référence sous le nom de **ton de cornet** ou Cornet-ton, et s'est identifié d'abord au ton de chambre, puis plus tard au ton de chœur. Il est estimé à environ 471 Hz. On pouvait le changer de 462 à 481 environ en ajoutant ou enlevant des bagues intermédiaires entre le corps et l'embouchure. D'autres cornets, moins nombreux, étaient fabriqués à 443 et à 484.

Selon Praetorius, vers 1600, les **chalémies** (hautbois anciens) sonnaient un ton plus haut que les cornets et les **sacqueboutes** (trombones anciens) soit environ 518, alors que les **cornemuses** sonnaient un ton plus bas que les cornets.

Au 18<sup>e</sup> siècle, les trompettes et autres instruments en cuivre sont généralement accordés un ton plus haut que les autres instruments.

Les **clavecins** et les **pianofortes**, ancêtres du piano, étaient accordés de façon différente selon le facteur. Dans les périodes baroque et classique, ils étaient accordés à un diapason bas, aux alentours de 420 à 430.

Les **orgues** ont souvent été modifiées, dégradées, réparées, restaurées, de sorte que leur diapason a changé. On en relève une grande variété.

En **Allemagne**, au Moyen-Âge, le diapason de l'orgue primitif était de 567; 507 à Halberstad en 1361 et 506 en 1495; 377 à Heidelberg en 1511; 481 à Hambourg en 1543, 489 en 1688 et 407 en 1762. Au 18<sup>e</sup> siècle, ils suivent le ton de cornet.

En **France**, 390 à l'abbaye de Valloires en 1750 et 395 à Versailles en 1789.

En **Angleterre**, 474 à Durham en 1683, à Londres la même valeur en 1708 et 444 en 1877.

En **Italie**, selon Antonio Barcotto (1652), les orgues de Venise sont parmi les plus hauts utilisés dans cet État, au ton de cornet. Les orgues de chambre à Venise, Padoue, et autres cités, sont accordés un ton plus bas, celui de *corristi*.

## Évolution selon les époques

En un même lieu, **le diapason a beaucoup changé au cours des temps**.

**Avant 1670**, le ton de chapelle en Allemagne (Chorton) et en Italie (chorista) est proche du LA-1, tandis que le ton d'orchestre (Cammerton ou mezzo punto) est proche du LA+1, soit environ 464 Hz.

**Vers 1670 et jusqu'en 1700**, le style musical passe de la Renaissance à la musique baroque. L'orchestre se détache de son rôle d'accompagnant de musique vocale. Son diapason n'est plus lié aux contraintes de la voix et prend sa liberté. Les instruments sont modifiés.

En Allemagne et en Italie du Nord, chorton et cammerton sont inversés; le chorton devient donc le plus haut à LA+1, équivalent du cornet-ton. En France au contraire, c'est le ton de chambre qui est à cette hauteur, tandis que le ton d'opéra est à LA-2.

**Après 1700**, les déplacements et les échanges contribuent à faire évoluer chacun des tons vers une plage consensuelle. En Europe, la marge est de 1,5 tons et va de deux demi-tons en-dessous de notre LA actuel (LA-2) jusqu'à un demi-ton au-dessus (LA+1). En Allemagne, le Cammerton ordinaire se double d'un Cammerton bas.

**Après 1730**, les consensus se regroupent autour de 430 Hz. Le ton a tendance à monter dans certaines villes. À Vienne en 1780, il est proche de 440, comme notre LA actuel (Ton de Vienne, Wienerton). Les trombones accordés plus haut à LA+1 sont modifiés et convertis en instruments transpositeurs.

**Le 19<sup>e</sup> siècle** voit le développement de la musique romantique, qui s'accompagne de la montée du diapason. À l'Opéra de Paris, le diapason passe de 405 en 1704 à 440 en 1830 et 448 en 1858. En Angleterre, le London Philharmonic Society, avait un diapason de 424 au moment de sa création en 1813. Il passe à 433 en 1820, 453 à partir de 1846. À Rome, l'Accademia di Santa Cecilia adopte un LA de 450. Aux États-Unis, en 1875, de nombreuses institutions sont accordées à 461.

On constate la même tendance sur les pianos: à Paris, 425 sur un piano de 1829, 446 en 1859 sur un piano Pleyel, et 455 chez Erard en 1879. En Angleterre, 446 chez Broadwoods de 1849 à 1854, montant à 455 en 1874; 450 chez Collard en 1877; 456 chez Chappell en 1877. C'était 455 chez Steinway en 1879, alors qu'au même moment à New-York, Steinway utilisait 458. Également aux États-Unis, à Boston on avait 435 chez Chickering.

Cette tendance à la montée n'impliquait pas qu'elle soit générale. Divers diapasons se côtoyaient et la pratique d'instruments transpositeurs était courante.



**Tableau B.**

*Tableau constatant l'élévation progressive du diapason dans divers pays.*

NOMS DES OBSERVATEURS.	ANNÉES.	NOMBRE de vibrations.	DISTANCES au diapason actuel de chaque pays en fractions de ton moyen.
PARIS (GRAND-OPÉRA).			
Sauveur.....	1699	808	— 0,845
	1700	808	— 0,845
	1704	810,6	— 0,820
	1713	811,7	— 0,809
Drouet.....	1810	846	— 0,480
Fischer.....	1823	862,7	— 0,320
Drouet.....	1830	871,5	— 0,235
Delezenne.....	1836	882	— 0,134
	à		
Lissajous.....	1839		
	1858	896	
BERLIN.			
Marpurg.....	1752	843,75	— 0,574
	1806		
Wieprecht.....	à	861	— 0,408
	1814		
Fischer.....	1823	874,64	— 0,277
Wieprecht.....	1830	880	— 0,225
Scheidler.....	1834	883,25	— 0,194
Wieprecht.....	1858	903,5	
SAINT-PÉTERSBOURG.			
Sarti.....	1796	872	— 0,298
Lissajous.....	1858	903	
TURIN.			
Delezenne.....	1845	880	— 0,091
Lissajous.....	1858	889,5	
MILAN.			
Delezenne.....	1845	893,14	— 0,072
Lissajous.....	1856	900,6	

*Diapasons utilisés en Europe entre 1699 et 1858. . Ces valeurs sont exprimées en "vibrations simples", soit le double de leur valeur en hertz.. Extrait de L'Année Musicale ou la Revue Annuelle des théâtres lyriques et des concerts des publications littéraires relatives à la musique, P. Scudo, 1859. Cité par Marie-Brigitte Duvernoy, [Le diapason](#), site [Piano & Sons](#)*

## Plus haut?

La montée du diapason inquiétait les facteurs d'instruments et les instrumentistes, car les anciens instruments ne convenaient plus. Il fallait en fabriquer et en acheter de nouveaux, et cela revenait cher.

Mais pourquoi certains compositeurs et interprètes préféraient-ils des diapasons plus haut?

À l'époque romantique, les compositeurs et interprètes cherchent à exprimer leur état d'âme personnel, en opposition par exemple au chant grégorien. La musique s'achemine vers la mise en valeur de la virtuosité de solistes et des effets émotionnels et sensoriels (*voir chapitre 4*).

Aussi avaient-ils tendance à vouloir une plus grande brillance sonore. En s'accordant légèrement au-dessus de l'accompagnateur, les solistes ressortent mieux, et se donnent une impression de brillance qui les flattent. Mais l'orchestre a tendance à les rattraper, d'où un enchaînement de montée.

Par rapport au temps de Mozart où les représentations avaient lieu devant un petit nombre de personnes, les concerts du 19<sup>e</sup> siècle sont donnés dans de grandes salles pour un public plus nombreux. Les orchestres sont plus grands et jouent plus fort. Cela renforçait le besoin d'un volume sonore plus éclatant, même pour les musiques antérieures du 18<sup>e</sup> siècle. Hausser le diapason était un moyen de l'obtenir. Ainsi, le compositeur italien **Gioacchino Rossini** (1792 - 1868) était insatisfait du ton de l'Opéra de Paris qu'il trouvait trop bas.

L'évolution technique des instruments contribuait à satisfaire ce besoin. Les cordes des instruments en boyau sont remplacées par de l'acier et supportent des tensions plus grandes. Des soupapes sont ajoutées aux cuivres.

Toutefois, monter le diapason n'est pas forcément favorable à la sonorité. À la fin du 17<sup>e</sup> siècle, le compositeur allemand **Georg Muffat** (1653 - 1704) écrit: *Le diapason sur lequel les Français règlent ordinairement leurs instruments est plus bas d'un ton entier que l'allemand (appelé ton de cornet), et même, dans les opéras, un ton et demi plus bas. Ils trouvent que le ton allemand est trop haut, trop criard, trop forcé.* (cité par B. Haynes)

## Vers un diapason international unique

Dès le 18<sup>e</sup> siècle, des musiciens proposaient de choisir un diapason commun pour tous afin de faciliter les rencontres musicales. Avec la montée du diapason, d'autres voix se joignirent pour réclamer de le maintenir à un niveau bas.

Mais si l'on est bien d'accord pour fixer un diapason, reste la question de savoir à quelle valeur. L'histoire est pleine de tentatives et de rebonds dus aux envies et revendications des uns et des autres. Plus haut? Plus bas? Scientifiquement?

## Tentatives de normalisation

**Tableau A.**

Tableau des diapasons usités dans les principales villes de France et dans divers pays d'Europe, d'après les types reçus par le ministère d'État.

ORIGINE.	NOMBRE de vibrations par seconde.	DISTANCES au diapason de l'Opéra de Paris	
		mesurées en vibrations.	mesurées en fractions de ton moyen.
FRANCE.			
Lille.....	904	+ 8,0	+ 0,077
Paris. { Grand-Opéra.....	896		
{ Théâtre-Italien ..	896		
Marseille.....	894	- 2,0	- 0,019
Bordeaux.....	886	- 10,0	- 0,096
Toulouse (Théâtre).....	885	- 11,0	- 0,106
Toulouse (Conservatoire)...	874	- 22,0	- 0,210
PAYS ÉTRANGERS.			
Bruxelles (Mus. des guiles)	911	+ 15,0	+ 0,144
Londres. { N° 3.....	910,4	+ 14,4	+ 0,138
{ N° 2.....	905	+ 9,0	+ 0,087
Berlin.....	903,5	+ 7,5	+ 0,072
Saint-Petersbourg.....	903	+ 7,0	+ 0,067
Prague.....	899,5	+ 3,5	+ 0,034
Leipsick.....	897,5	+ 1,5	+ 0,014
Munich.....	896,2	+ 0,2	+ 0,002
La Haye.....	892,3	- 3,7	- 0,035
Pesth.....	892	- 4,0	- 0,038
Turin.....			
Wurtemberg.....	889,5	- 6,5	- 0,062
Weymar.....			
Brunswick.....	887	- 9,0	- 0,086
Gotha.....	886,5	- 9,5	- 0,091
Stuttgart.....	886	- 10,0	- 0,096
Dresde.....	882	- 14,0	- 0,134
Carlsruhe.....	870	- 26,0	- 0,250
Londres (N° 1).....	868	- 28,0	- 8,269

Diapasons utilisés en Europe en 1858. Les valeurs sont exprimées en "vibrations simples", soit le double de leur valeur en hertz. Extrait de *L'Année Musicale ou la Revue Annuelle des théâtres lyriques et des concerts des publications littéraires relatives à la musique*, P. Scudo, 1859. Cité par Marie-Brigitte Duvernoy, *Le diapason*, site [Piano & Sons](#)

## 1834, Allemagne, congrès de Stuttgart, 440 Hz

En 1834, le congrès des Chercheurs naturalistes et Médecins allemands réunis à Stuttgart propose de normaliser le LA à 440 Hz. Ce choix vient des recommandations de **Johann Scheibler** qui mesura le ton des différents diapasons d'Europe avec son tonomètre (*voir chapitre suivant*), et reconnut que le ton moyen était d'environ 880 "vibrations simples" par seconde (440 Hz). *Après avoir mené plusieurs expériences avec des diapasons variés utilisés à Paris, Berlin et Vienne, Scheibler décida de choisir son LA à 440 comme milieu des extrêmes entre lesquels le diapason des pianos viennois montent et descendent à cause du changement de température. Le diapason des pianos fut déterminé par un monocorde, et le diapason 440 cps fut vérifié par son tonomètre.* (Trevor Pinch, Karin Bijsterveld, *The Oxford Handbook of Sound Studies*, 2012)

**Note:** À cette époque, **on parlait de vibrations doubles et non de cycle**, une vibration double étant composée de 2 vibrations simples. Si nous nous référons à l'image du balancier, une vibration simple est l'aller simple, une vibration double est l'aller et retour. Aussi les valeurs indiquées dans les rapports de Scheibler et des autres savants et enquêteurs sont-elles le double de leur valeur en hertz.

## 1858-59, France, arrêté ministériel, 435 Hz

Le gouvernement français réunit une commission chargée d'examiner la possibilité de fixer un diapason pour prévenir la montée du diapason des dernières années, surtout dans l'opéra (*voir La Maîtrise, Joseph d'Ortigue, Question de diapason, 1858*). Menée par deux physiciens (Jules Antoine Lissajous et César Despretz), elle comprenait aussi des musiciens, dont Hector Berlioz et Gioachino Rossini).

La commission mena une enquête internationale pour faire l'état des valeurs des diapasons. Elle révéla un écart de plus d'un ton entre les LA, échelonnés de 434 (Londres) à 455,5 (Bruxelles). En France, de 437 au Conservatoire de Toulouse à 452 à Lille.

Sur proposition de Lissajous et des résultats de la commission, un arrêté fut promulgué par le gouvernement en 1859, **fixant le LA à 435 Hz, pour tous les établissements musicaux d'état**. Il est connu sous le nom de "**diapason normal**".

C'est la première normalisation à l'échelle d'une nation.

## Réactions en Europe

Des institutions étrangères suivent le mouvement impulsé par la France et adoptent le "diapason normal". En Italie, c'est le cas de l'Instituto Musicale di Firenze (Institut musical de Florence) et du Teatro San Carlo (Théâtre Saint-Charles) de Naples.

En Grande-Bretagne, la *Philharmonic Society* l'adopte d'abord, puis le modifie légèrement en 1896 pour un diapason de 439 (*New Philharmonic Pitch*), soit disant pour tenir compte des températures plus froides en Angleterre. Mais pendant ce temps, subsistait le diapason ancien élevé de 452 Hz, conservé par les ensembles militaires, les orchestres provinciaux, mais aussi par les orgues pour des raisons économiques. En effet, ils avaient déjà été réajustés quelques temps avant à 452 et on ne voulait pas renouveler l'opération. Cette situation double dura plus ou moins jusque vers 1920 et même plus tard pour certains ensembles de cuivres.

Dans ses ouvrages, le musicologue belge **Charles Meerens** (1831 - 1909) se fait partisan d'un LA de 432 Hz, pour des raisons mathématiques (*voir section suivante*), et se désole de l'adoption de 435. Analysant son ouvrage *Le Diapason et la notation musicale simplifiés* (1873), le journaliste Arthur Heulhard écrit (*La chronique musicale*): *D'après [Charles Meerens], la commission réunie à Paris en 1858 pour déterminer un étalon sonore universel, loin d'avoir atteint son but, n'a fait qu'augmenter la discorde dans le camp des musiciens. Le diapason ancien et le diapason nouveau*

*sont en querelle perpétuelle: telle société musicale s'en tient à l'ancien diapason parce qu'elle ne croit pas à l'orthodoxie du moderne; tel virtuose, accompagné par un orchestre, est obligé de déposer au dernier moment l'instrument qui lui est familier pour un instrument d'emprunt; tel chanteur perd la tramontane devant un la qui lui paraît excentrique; tel facteur de piano se voit retourner l'envoi qu'il avait fait la veille: autre ville, autre diapason.*

Malgré la recommandation de 435 Hz, l'ascension du diapason se poursuivit, mais plus lentement. En 1917, la fédération américaine des musiciens adopte 440 Hz. En 1938, des relevés indiquent une moyenne de 440 à 442 à Paris, 445 aux États-Unis, 451 en Angleterre, 460,8 en Autriche, 467,5 à Prague.

## Les diapasons dits "scientifiques": DO 256 et LA 432

Au 19<sup>e</sup> siècle, certains veulent convaincre les autorités qu'il vaut mieux un diapason de 432 plutôt que 435 ou 440. C'est le cas du musicologue Charles Meerens et du compositeur italien **Giuseppe Verdi** (1813 - 1901). L'argument avancé est que ce chiffre est scientifique. Qu'est-ce que cela signifie?

### Le diapason dit scientifique qui a été prôné à l'origine est le DO3 de 256 Hz.

Déjà vers **1700**, le physicien **Joseph Sauveur** proposa ce DO de 256 Hz comme le "**ton philosophique**" (c'est-à-dire scientifique). Ce nombre lui plaisait car il contient exactement 8 octaves (c'est 2 à la puissance 8). Autrement dit le DO2 vaut 128, le DO1 64, le DO-1 32, etc. jusqu'au DO-6 qui vaut exactement 1. **C'est ce chiffre 1 qui fascinait Sauveur**, même si le son de 1 Hz est inaudible.

Plus tard, le physicien Ernst Chladni se référait aussi à ce DO 256 comme un "diapason scientifique" dans ses œuvres sur la théorie acoustique.

Charles Meerens était partisan du DO 256, toujours pour la beauté du chiffre 1 (*Le diapason et la notation musicale simplifiés, 1873; Mémoire sur le diapason, 1877*). Rien de véritablement scientifique donc, mais plutôt une attirance esthétique. Puisque le diapason était défini par le LA et non le DO, Meerens dérivait la valeur du LA à partir du DO et défendit ardemment le LA 432. Car, raisonnait-il, **si le DO vaut 256, alors on calcule que le LA vaut 432.**

Or **cela n'est vrai que dans le système pythagoricien** de quintes justes dans lequel l'intervalle DO-LA a un rapport de fréquences de 1,6818 (*voir chapitre précédent*).

Mais le système couramment utilisé est celui du **tempérament égal** dans lequel l'intervalle DO-LA est 1,6875. Le LA dérivé du DO 256 prend donc la valeur **430,5**. Il est de **426,6** dans la gamme "naturelle" de Zarlino (rapport 1,6666). Ce diapason n'est donc scientifique que d'apparence.

En **1881**, un congrès de musiciens et de physiciens tenu à **Milan** en Italie se prononça en faveur d'un **LA de 432 Hz**, qu'ils préféraient au diapason français de 435 à cause de ces considérations mathématiques prenant appui sur le 1.

D'abord adepte du LA 435, Verdi se fit l'avocat de la valeur 432 en Italie. En 1884, il écrivit au président de la commission du gouvernement italien: *Je demande formellement aux orchestres de plusieurs villes d'Italie, entre autres celui de La Scala, d'abaisser leur diapason afin de l'amener à l'unisson du diapason normal français. Si la Commission de Musique instituée par notre gouvernement pense, pour des raisons mathématiques, que les 870 vibrations [LA 435] du diapason français devraient être abaissées à 864 [LA 432], la différence est si petite, presque imperceptible à l'oreille, que je suis très heureux de m'y associer.* (*Giuseppe Verdi: A=432 only scientific tuning, Marco Fanini, Executive Intelligence Review, 16, 9, 1989*)

Un **congrès réuni à Vienne en Autriche en novembre 1885** eut à choisir entre le LA italien de 432 et le LA français de 435. Juste avant, dans un article de *Gazzetta Musicale* de Milan, le

journaliste Oscar Berggruen écrivit: *La Commission veut faire la proposition du LA français de 435 vibrations, mais il y a de nombreux partisans du LA italien de 432 vibrations. La différence n'est pas majeure, mais à mon avis, le LA italien doit être recommandé particulièrement parce qu'il est divisible en octaves [c'est-à-dire divisible par 2 plusieurs fois] pour l'orgue. Deux octaves plus bas, le LA français tombe sur une fraction, 217,5 vibrations, tandis que le LA italien tombe à 216 vibrations. Le LA italien correspond aussi aux lois de la science... (cité dans Giuseppe Verdi: A=432 only scientific tuning, Marco Fanini, Executive Intelligence Review, 16, 9, 1989)*

Cette différence de 3 Hz fut l'occasion de joutes politiques intenses. On mit en avant la dépense qu'entraînerait pour les facteurs d'instruments le changement de 435 à 432. Finalement le congrès de Vienne **statua pour le LA international à 435.**

Au 20<sup>e</sup> siècle, la revendication pour le LA 432 fut endossée en France par le compositeur **Robert Dussaut** (1896 - 1969) vers 1950, après que le LA fut fixé à 440 par la commission de Londres de 1939. Sur le site web **Solidarité & Progrès** (*Lorsque le diapason de Verdi donnait le «la», avril 2016*), on peut lire:

*Henri Busser, membre de l'Académie des beaux-arts, et Joseph Magrou avaient présenté le 19 juin 1950 une communication de Robert Dussaut, intitulée Acoustique musicale – proposition d'un nouveau son fixe: sol<sub>3</sub>= fréquence 384. D'où La<sub>3</sub>=432. Après avoir constaté l'abandon du diapason normal à 435 Hz et la hausse adoptée au premier congrès de Londres, en mai 1939, Dussaut remarque:*

*"Les musiciens français, en général, se plaignent du diapason à 440 p/s, le trouvant exagérément élevé. Avec ce diapason, les œuvres vocales et chorales sont devenues presque impossibles à interpréter dans le ton original. Il faudrait transposer la plupart de ces œuvres (...). Il apparaît qu'il devient nécessaire de demander l'abaissement du diapason, par un nouveau décret officiel, celui de 1859 étant devenu caduc.*

*La solution idéale serait que les musiciens et les physiciens eussent la même échelle musicale, c'est-à-dire celle de Sauveur, fixant à l'Ut<sub>3</sub> et l'Ut<sub>4</sub> les fréquences 256 et 512, Malheureusement, dans la pratique musicale, la note Ut ne peut servir de diapason, parce que les violonistes ne peuvent s'accorder que sur des cordes à vide; or le violon n'a point de corde Ut. Le son fixe ne doit donc être que La, Ré ou Sol, ces trois notes correspondant aux notes des cordes du violon, de l'alto, etc. Depuis longtemps, les musiciens ont adopté La<sub>3</sub> comme diapason. Ce choix a été malencontreux, car Ut devient alors très variable: la tierce mineure de La à Ut diffère selon qu'il s'agit du système de Pythagore, du tempérament, ou du système de Zarlino."*

*Il propose donc de prendre SOL à 384 comme diapason, ce qui permet de ré-obtenir la même valeur de l'UT à 256 (ou 512) «à la fois dans le système de Zarlino et dans celui de Pythagore. (...). Non seulement Ut serait plus stable, mais le La<sub>3</sub> =432 également, puisque le ton 9/8 est le même dans ces deux systèmes.»*

*Il ajoute :*

*"Les nombres 384 et 432 ont l'avantage de n'avoir d'autres facteurs premiers que 2 et 3. Ils sont plus logiques et d'un emploi plus pratique que 435 (...). Le La serait 8 savarts plus bas que le diapason actuel à 440 p/s, soit environ 1/6 de ton. Tel est le diapason demandé par les musiciens."*

Cette proposition fut approuvée par les membres de l'Académie des sciences en 1950 qui en firent un vœu adressé au Ministre de l'Éducation Nationale.

## 1939, le LA 440

En septembre 1938, le comité acoustique de la radio de Berlin demanda à l'*Association britannique de normalisation* d'organiser un **congrès international à Londres en 1939**. Il fut organisé par la *Fédération internationale des associations nationales de standardisation* ou ISA, créée en 1926 (ancêtre de l'*Organisation internationale de normalisation*).

Il décida de fixer le diapason officiel du LA3 à 440 Hz à une température de 20 °C, alors que le diapason français précédent de 435 Hz était défini pour une température de 15 °C. C'était le diapason déjà utilisé par la radio allemande. Ceux qui s'opposaient à cette hausse du diapason n'avaient pas été invités. La radio britannique BBC diffusa le signal sonore de 440 Hz généré électroniquement à partir d'un cristal piézoélectrique.

La guerre fut déclarée peu après, et cette résolution ne fut pas officiellement confirmée.

Aux États-Unis, la vogue du jazz se développait, et avec elle, le diapason montait à 440, 445 et jusqu'à 470. Aussi, les facteurs d'instruments à vent européens qui voulaient exporter leurs instruments choisissaient ce diapason haut de 440. Ces considérations commerciales ont contribué à renforcer le choix de 440 sur le plan international.

En **1953**, la Conférence internationale de Londres de l'ISO (*Organisation internationale de normalisation*) réaffirma la valeur de 440 Hz comme diapason officiel du LA3. Les musiciens français qui soutenaient le projet du compositeur Robert Dussaut pour un LA 432 ne furent pas invités. La norme du LA 440 a été rééditée en janvier 1975 (ISO 16:1975).

## Les applications approximatives de la norme

Aujourd'hui, la norme de 440 est majoritairement adoptée par les instrumentistes. Mais ce n'est qu'une recommandation et elle n'est pas appliquée partout. De nombreux orchestres jouent à 442 Hz ou plus haut.

Les fabricants de flutes, clarinettes, hautbois les fabriquent en général au diapason 442, afin d'anticiper sur les variations dues à la température.

Souvent, les instruments traditionnels conservent leur diapason ancien, adapté à leur fabrication. La grande **cornemuse écossaise** conserve son LA aigu de 470 à 480 Hz.

## Choix d'un diapason: plus haut ou plus bas?

De notre enquête approfondie, il ressort que les motivations pour fixer un diapason comprennent deux éléments.

Le plus général est le besoin d'**avoir un diapason commun pour pratiquer aisément de la musique ensemble**. La normalisation a répondu à cette nécessité pratique. En même temps que se généralisait la standardisation industrielle, cette normalisation s'est étendue **sur le plan international**.

Ensuite, se pose le **choix de la valeur de cette norme** commune. En mettant à part les motivations pour une valeur précise dite scientifique que nous venons d'examiner, il y a des pressions qui invitent à hausser le diapason, et d'autres à l'abaisser.

En effet, la recherche d'une couleur sonore qui tire parti des instruments existants et des voix a entraîné le diapason vers le haut. Mais la voix des chanteurs et chanteuses en a souffert dans certaines œuvres, d'où leur opposition à cette montée.

## Préserver la voix des chanteurs

Lorsqu'un compositeur écrit une œuvre, la tonalité et les notes écrites sont en relation avec les possibilités d'une part des instruments existants et d'autre part de la pratique vocale ajustée au diapason de l'époque et du lieu. Si plus tard un chef fait **exécuter la même œuvre avec un diapason plus haut, cela demande aux chanteurs des performances plus grandes dans les aigus**. Aussi avec les diapasons hauts du 19<sup>e</sup> siècle, il devenait plus difficile de jouer certaines pièces du 18<sup>e</sup>.

La difficulté vocale surgit non seulement dans les aigus extrêmes, mais dans le **passage de registre**. L'étendue d'une voix comporte trois registres, la voix de poitrine, la voix médium et la voix de tête. Pour passer de la voix médium à la voix de tête, il y a un changement dans le positionnement des cordes vocales qui crée des difficultés aux chanteurs non entraînés. Si on monte le diapason, le son de ce passage correspond à une note plus basse. Par exemple, si le passage d'un chanteur est situé à une hauteur repérée par FA à un certain diapason, le fait de monter le diapason d'un demi-ton fait que le passage se retrouve au niveau du MI. Est-ce important? Des chanteurs professionnels expliquent que pour une œuvre donnée, **cela modifie leur expression sonore**.

Pourtant, au début de notre enquête, nous avons appris que les chanteurs du passé interprétaient une œuvre à la hauteur qui convenait à la tessiture de leur voix, et l'instrumentiste les suivait en transposant. N'est-il plus possible de suivre cette pratique?

Non, car la relation à une œuvre musicale écrite sur une partition a changé. La partition fixe l'œuvre dans sa tonalité. Les musiciens exécutent ce qui est écrit et ne transposent pas. Ils respectent la volonté du compositeur. De plus, dans un orchestre, le nombre de musiciens peut être important et, transposer entraînerait beaucoup de remue-ménage. Transposer ne fait plus partie des coutumes des musiciens d'orchestre.

### Questionnement sur le passage

Je reste interrogatif sur l'impact d'une hausse de diapason sur le passage de registre. Effectivement, cela se comprend si l'on hausse une mélodie d'un ton, ou même d'un demi-ton.

Mais certains chanteurs affirment que cet effet est sensible sur de tous petits intervalles, par exemple en passant de 440 à 432 Hz. Or descendre d'un ton, c'est passer de 440 à 392 (SOL) et descendre d'un demi-ton, c'est passer de 440 à 415 (LA bémol). Passer de 440 à 432, c'est un intervalle de 1/6<sup>e</sup> de ton seulement. Le passage d'un chanteur est-il fixé de façon aussi précise? N'y a-t-il pas un léger recouvrement entre son registre médium et son registre de tête?

Je n'ai pas de réponse à cette question.

## Le rendu sonore des instruments

Par construction, les instruments ont des couleurs spécifiques qui varient selon leur registre. Par exemple, la couleur sonore d'une clarinette n'est pas la même dans ses graves ou dans ses aigus. Un compositeur aura donc envie de lui faire exprimer une certaine douceur ou un éclat sublime en choisissant la hauteur de la mélodie.

Si ce compositeur désire que sa mélodie soit interprétée à un ton plus bas, il a le choix entre deux procédés: abaisser le diapason ou transposer la mélodie.

**Abaisser le diapason** n'est possible que si l'instrument le permet par ajustement, sinon, il faut fabriquer un nouvel instrument avec un diapason spécifié.

**Transposer** semble donc un moyen plus simple. Mais on ne peut transposer que par sauts de demi-tons. Par exemple, le compositeur peut écrire sa musique en MI majeur au lieu de FA majeur.



Par comparaison, le diapason peut être abaissé d'une toute petite quantité, inférieure au demi-ton, voire au quart de ton. Toutefois, changer de tonalité, c'est aussi changer les doigtés d'exécution sur l'instrument, jouer un MI au lieu d'un FA, par exemple. Ce n'est pas toujours facile, car certaines tonalités sont plus compliquées que d'autres.

En ce qui concerne les instruments électroniques par contre, le rendu sonore est dans une large mesure insensible à la hauteur choisie, car le spectre, contrôlé par synthèse électronique, reste le même.

La question se pose différemment lorsqu'il s'agit d'interpréter des œuvres du passé en respectant leur tonalité. Ainsi pour la musique baroque, les instruments anciens étaient conçus pour jouer dans certains diapasons, en lien avec la résonance de la matière dont ils sont constitués. Interpréter la musique baroque avec un diapason différent change leur timbre. Si le diapason est élevé, cela est parfois dommageable pour eux. C'est pourquoi actuellement les ensembles de musique baroque choisissent des diapasons de 392 à 415. Comme les diapasons étaient variables d'un lieu à l'autre, il s'agit de moyennes qu'on a retenues par convention. La musique de Mozart et de la fin du 18<sup>e</sup> siècle est généralement interprétée en 430, mais celle de Monteverdi en 440.

### Questionnement sur le rendu sonore

Je reste également interrogatif sur la variation du rendu sonore d'un instrument ou d'un orchestre lorsque le décalage n'est que de 2 ou 8 Hz. À voir...

## Diapason et standardisation industrielle

### Produire à l'échelle mondiale

La progression historique vers la normalisation du diapason a répondu à des motivations économiques et commerciales importantes. Les facteurs d'instruments à sons fixes avaient et ont besoin de savoir à quel diapason fabriquer leurs instruments. Ils voulaient pouvoir les diffuser sur des territoires de plus en plus vastes.

Cette évolution a été concomitante de la marche vers l'industrialisation. Elle s'est inscrite dans un changement de mentalité qui associe un effacement des particularités locales au profit d'une uniformisation globale et un élargissement de la pensée pour embrasser la planète entière.

Dans la deuxième moitié du 18<sup>e</sup> siècle, les processus de production subirent de profondes transformations. Jusqu'alors, on fabriquait les produits un à un artisanalement. L'invention de machines ouvrit la possibilité de produire plus vite et en plus grande série. Cette transformation est nommée par certains historiens la **révolution industrielle**.

C'est dans cette période qu'apparaissent l'exploitation du charbon, la mise au point de **la machine à vapeur** par James Watt en **1769** en **Angleterre**, son application aux machines pour le textile et la sidérurgie, puis à la propulsion des bateaux. La mise au point de la locomotive par les frères Stephenson en 1815 entraîne la construction de **vastes réseaux de chemin de fer**, dont les premières lignes apparaissent dans les années **1830**. Cette évolution s'accroît à partir de **1880** avec l'apparition de **nouvelles sources d'énergie**, gaz, pétrole et électricité, de nouvelles machines (automobiles, outils), et le développement de la chimie et des plastiques.

Tout cela transforme profondément la mentalité des Anglais au milieu du 19<sup>e</sup> siècle, et ensuite des habitants des autres pays.

Les ateliers isolés sont remplacés par des usines, qui s'édifient près des sources de matières premières. Un réseau commercial et financier capitaliste international se développe. Produire plus pour plus de monde pousse les économistes à étudier l'organisation du travail de production. En **1911**, Frederick Winslow Taylor prône une "**organisation scientifique du travail**". La conséquence logique est l'uniformisation des objets produits en grande série.

**Cette tendance à l'uniformisation et à la rationalisation gagne les instruments de musique et la théorie musicale.** Des modifications ont lieu sur les instruments à vent et les cuivres. L'intonation à tempérament égal se répand, dans laquelle les demi-tons sont tous égaux et interchangeables.

## L'établissement de normes industrielles

Les objets identiques produits en masse doivent pouvoir être utilisés dans différentes régions, différents pays, même éloignés. Cela implique que certaines caractéristiques de ces objets doivent être normalisées. Actuellement par exemple, les prises qui relient les ordinateurs à leurs accessoires sont normalisées selon les normes USB ou HDMI. Des comités sont constitués pour définir ces normes.

Les premières sociétés américaines de normalisation voient le jour à partir de 1912. Ce sont l'*American Institute of Electrical Engineer* (AIEE) et l'*American Engineering Standards Committee* (AESC). En France, l'*Association française de normalisation* (AFNOR) est créée en 1926.

Cette même année, les instituts de normalisation non gouvernementaux d'une quinzaine de pays se rassemblent au sein de l'*International Standards Association* (ISA) ou *Fédération internationale des associations nationales de normalisation*. C'est cette même association qui en 1939 normalise le diapason à 440 Hz.

En 1944, les alliés créent l'UNSCC, *Comité de coordination de la normalisation des Nations Unies* à Londres. L'UNSCC et l'ISA s'unissent et donnent naissance à l'*Organisation internationale de normalisation* (ISO) lors de la conférence des organisations nationales de normalisation à Londres en 1946.

Les unités de longueurs, qui variaient d'un pays à l'autre, d'une région à l'autre sont redéfinies et deviennent potentiellement les mêmes pour toute la planète. Les unités de temps, de masse et d'autres encore sont également redéfinies.

## Dans la création, tout est rapport

La définition du diapason - à titre d'exemple un LA à 440 Hz - comprend deux éléments. D'une part le nombre: 440. Nous avons discuté de sa valeur tout au long de cet article.

D'autre part: **l'unité de fréquence, le hertz**. Il est rare qu'on attire l'attention sur la nature relativement arbitraire de cette unité.

Car dans la Nature et dans la Création cosmique, il est, à ma connaissance, impossible de rencontrer des mesures absolues. Toutes les grandeurs se rapportent à une autre. **Tout est fait de rapports et de proportions entre les multiples éléments de la création.**

## Mouvements dans l'espace

Pour comprendre cette nécessité de relations entre grandeurs, imaginons l'espace cosmique complètement vide. Nous y déposons une balle, et nous lui donnons une impulsion de rotation.

Comment pouvons-nous affirmer qu'elle est en mouvement ou au repos?

Il est probable que vous avez l'image de cette balle en rotation. C'est parce que j'ai orienté subtilement votre esprit vers un repère dans cet espace. Ce repère, c'est vous-même. Par rapport à votre conscience ou votre main placées dans cet espace, oui, il y a effectivement le mouvement de rotation que vous avez impulsé.

Mais si on enlève tout repère, si aucun objet, aucune conscience, autre que la balle n'est présent, si la balle est vraiment seule, il est impossible de définir sa position et l'évolution de cette position dans le temps.

**Dans l'espace, on ne peut définir des positions et des mouvements que relativement à un repère.**

## La mesure des longueurs

Il en est de même pour la définition des longueurs et des distances. Elles ne peuvent être définies que par rapport à une autre longueur.

Prenons un bâton. Sa longueur est définie par la distance entre ses deux extrémités. Si je dis que le bâton a une longueur de 80 cm, je dois définir ce qu'est un centimètre. En réalité, **je compare la longueur du bâton à une unité arbitraire que je nomme le centimètre**, elle-même centième partie du mètre.

Le **mètre** a été défini comme la longueur d'un objet en platine déposé en 1799 dans les archives de la république française, le mètre-étalon. Il a été choisi par l'Académie des Sciences en 1791 comme **égal à la dix millionième partie du quart du méridien terrestre**. Encore fallait-il préciser quel méridien, étant donné que la Terre n'est pas une sphère parfaite et que sa surface est irrégulière. Il s'agit donc bien d'un choix arbitraire.

Avec l'évolution technologique et les nouvelles connaissances sur la matière, la définition du mètre change en 1960. Il est redéfini comme étant égal à 1 650 763,73 fois la longueur d'onde, dans le vide, d'une radiation orangée de l'atome de krypton 86. Puis en 1983, la définition du mètre est devenue *la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière en 1/299 792 458<sup>e</sup> de seconde*. On constate que la référence est choisie arbitrairement par un groupe de scientifiques qui l'estiment la plus apte à l'utilisation du mètre dans le domaine pratique et technique de haute précision.

De plus, il faut noter que cette définition repose sur la **conviction que la vitesse de la lumière est constante**. C'est le postulat de la théorie de la relativité, issue de l'interprétation de l'expérience de Michelson et Morley par les physiciens. Or j'ai relaté ailleurs (*voir article L'éther et l'énergie de l'espace*) que l'expérience de Michelson et Morley pouvait recevoir d'autres interprétations et que certains modèles admettent la possibilité d'une variation de la vitesse de la lumière (*par exemple, voir article Le champ d'énergie de l'espace semi-classique*). Cette nouvelle définition du mètre est donc également un choix arbitraire.

Si nous choisissons une autre unité de longueur que le mètre, par exemple le **pied**, la longueur du bâton aura une autre valeur: les 80 cm deviennent 2,62 pieds. Les nombres diffèrent complètement. Ils ne sont pas absolus, ils indiquent des **rappports à une unité arbitraire**.

Même lorsque nous choisissons le pied, il faut préciser de quel pied nous parlons. Car la définition du pied a varié et varie selon les époques et les lieux. Il en est de même des autres unités de mesure, surface, volume, poids, etc. *En 1795, il existait en France plus de 700 unités de mesure différentes, issues souvent de la morphologie humaine: [le pouce,] le doigt, la palme, la coudée, le pas, la toise, la brasse (étendue des bras). Ces unités variaient d'une ville à l'autre, d'une corporation à l'autre, mais aussi selon la nature de l'objet mesuré. Ainsi, par exemple, la superficie*

*des planchers s'exprimait en pieds carrés et celle des tapis en aunes carrées. Les mesures de volume et celles de longueur n'avaient aucun lien entre elles. Pour chaque unité de mesure les multiples et sous-multiples s'échelonnaient de façon aléatoire, ce qui rendait tout calcul extrêmement laborieux. (d'après Histoire de la mesure, Métrologie Française)*

Les investigateurs qui tentent de retrouver la valeur du diapason d'un orgue à partir des dimensions des tuyaux rapportées en pieds dans un ouvrage ancien doivent tenir compte de ces variations. Le pied était différent d'un endroit à un autre: en Allemagne, on avait le pied de Nuremberg de 303,9 mm, celui de Vienne (317,6), de Berlin (313,85), de Dresde (283,1 mm). En France la valeur du pied était moins dispersée car fixée par le roi (pied du roy, 324,8 mm).

Il est donc frappant que la valeur numérique d'une longueur est étroitement liée à l'unité que se donne une communauté. Par contre **si j'ai deux bâtons, le rapport de leurs longueurs est immuable, quelle que soit l'unité de mesure**. Si l'un est de 80 cm, et l'autre de 40 cm, le rapport des longueurs sera toujours 2, qu'elles soient exprimées en cm, en pieds ou en pouces.

Bien plus, pour déterminer ce rapport, il est inutile de passer par la mesure en cm, il suffit de poser le bâton le plus court sur l'autre et de le reporter sur sa longueur totale: deux fois dans ce cas. C'est le bâton le plus court qui devient l'unité de longueur. Cela montre qu'un rapport se situe sur un niveau plus abstrait, plus conceptuel qu'une mesure qui doit passer par un étalon matériel.

## La Terre, la seconde et le hertz

Le même type de considérations s'applique à la mesure du temps.

Comment mesurer le temps qui passe? Contrairement aux longueurs, nous ne pouvons pas le comparer à un objet étalon, mais à la **durée du mouvement d'un objet en mouvement cyclique, choisi comme repère**.

C'est ainsi que la durée d'un jour est définie par le mouvement de rotation de la Terre repéré par rapport au soleil. L'heure en dérive comme en étant la 24<sup>e</sup> partie. La seconde est définie comme 1/3600<sup>e</sup> d'heure, soit 1/86400<sup>e</sup> de jour solaire. Tout semble parfaitement clair et bien défini en apparence.

Or **le mouvement de la Terre par rapport au soleil n'est pas absolu**. Sa durée peut recevoir deux définitions. En effet, pour définir le temps de rotation de la Terre sur elle-même, comment peut-on repérer que la Terre a effectué précisément une rotation complète? Si vous jouez à la roulette et que vous la faites tourner, vous saurez qu'elle a effectué un tour complet lorsque un signe particulier de la roulette repasse devant un repère fixe. Nous constatons donc la nécessité d'un tel repère.

Or dans l'espace, il n'y pas de repères fixes, tout bouge sans cesse, lentement ou rapidement. Le soleil se déplace vers l'étoile Véga, il tourne avec la galaxie, et il oscille autour du plan moyen de cette galaxie (*voir article Spirale, mouvement primordial de vie*). C'est pourquoi, selon le repère choisi, on a deux définitions de la durée de rotation de la Terre. Si on repère un tour complet lorsqu'on se retrouve face au soleil, c'est la **rotation appelée synodique**. Si on le repère par rapport à des étoiles, c'est la **rotation sidérale**.

**L'heure est précisément définie comme 1/24<sup>e</sup> de la durée de la rotation synodique**. Celle-ci vaut donc, par définition, 24 h. La période de rotation sidérale de la Terre est de 23 h 56 min 4 s. La définition de la seconde semble donc réglée, à ceci près que **la rotation synodique de la Terre n'est pas une constante**.

La Terre subit des ralentissements et des accélérations de façon irrégulière. Son mouvement est complexe. À sa rotation propre s'ajoutent **le mouvement de précession** (mouvement conique décrit par l'axe autour de sa position moyenne sur une période de 26000 ans) et **le mouvement**

**de nutation** (oscillation de l'axe sur une période de 18,6 ans). La rotation elle-même subit des changements décennaux (entre 10 et 70 ans) de l'ordre de cinq millisecondes. C'est pourquoi un ajustement est régulièrement nécessaire. Il est effectué en ajoutant ou retranchant une seconde intercalaire.

On a donc abandonné la définition de la seconde par rapport à la rotation de la Terre. En 1956 elle a été redéfinie comme  $1/31\,556\,925,9747^e$  de la période orbitale de la Terre de 1900. Puis on a abandonné la référence à la Terre. En 1967, le *Comité International des Poids et Mesures* l'a définie par référence au temps atomique de l'atome de césium 133. **La seconde est l'intervalle de temps qui comprend 9 192 631 770 oscillations entre deux états énergétiques particuliers du césium.**

On constate à nouveau que l'unité de temps, la seconde, est une unité définie arbitrairement par une communauté pour des raisons pratiques et technologiques.

La définition du **hertz** dérive directement de celle de la seconde, puisque c'est 1 cycle par seconde. Il est donc lui-aussi attaché au caractère fluctuant de la matière cosmique. La valeur numérique d'une fréquence est dépendante du choix de cette unité.

Ces fluctuations paraissent tellement minuscules qu'elles n'ont aucune incidence décelable pour la pratique musicale. Cependant mon propos est d'ordre philosophique, c'est-à-dire nous aspirons à mieux comprendre la nature des choses et comment elles sont reliées entre elles et à nous.

Si nous avons conscience que la seconde n'est pas une donnée absolue de l'univers, mais une définition que nous avons élaborée par notre pensée en la reliant au césium, donc à la matière, alors nous pouvons en saisir le caractère relatif et impermanent. La structure du césium n'a rien d'éternel. J'ai montré dans l'article [Le champ d'énergie de l'espace semi-classique](#) que les niveaux d'énergie atomiques sont la conséquence directe de la densité d'énergie du vide spatial, qu'ils peuvent changer si cette densité est modifiée pour une raison cosmique, et par conséquent également la fréquence de transition d'un niveau à l'autre.

## La géométrie de la nature et du cosmos

Bien que la matière bouge et fluctue, elle est sous-tendue par des schémas géométriques précis inscrits à des niveaux plus abstraits. C'est ce que j'ai montré dans mon article [Aspects géométriques et sonores des créations de l'univers](#).

De la même façon qu'une maison est la manifestation matérielle et imprécise d'un plan précis conçu par un architecte, de même la manifestation cosmique et terrestre est l'expression approximative d'un programme géométrique abstrait vivant. Ces géométries sont complexes et incluent essentiellement des polyèdres, des spirales et des fractales.

Or toutes ces géométries sont définies par des rapports et non par des mesures absolues. Un cube reste un cube, que ses côtés mesurent 1 mm ou une année-lumière. Il est défini par ses 6 faces carrées égales, donc par les rapports d'égalité entre ses côtés, entre ses faces, entre ses angles.

La création repose fondamentalement sur des rapports. Cela était bien connu jusqu'à la Renaissance, et on faisait alors des analogies entre les créations à notre échelle (le microcosme) et les créations cosmiques (le macrocosme). À ce sujet, on cite volontiers la maxime du texte alchimique *la Table d'émeraude* attribuée à Hermès-Trismégiste: *Ce qui est en bas est comme ce qui est en haut, et ce qui est en haut est comme ce qui est en bas.*

Par contraste, le 17<sup>e</sup> siècle a inauguré l'ère de la classification, de la codification, et de la mesure. L'histoire du diapason s'inscrit dans ce besoin de codifier.

# Pour une musique vivante

Plaçons-nous maintenant du point de vue des auditeurs de musique et demandons-nous quel effet la musique produit sur notre âme et sur notre corps. Au-delà des compositeurs et des interprètes, c'est bien évidemment l'essentiel. La hauteur du diapason a-t-elle une influence sur la qualité de l'audition et sur le plaisir de l'auditeur?

## Le sentiment de l'auditeur

Il y a des musiques qui font du bien, revigorantes, dynamisantes, joyeuses, apaisantes, relaxantes, etc. et il y a des musiques qui induisent des émotions d'angoisse ou de rage, d'autres qui assomment le système nerveux et déstructurent la personnalité.

Quels sont les éléments de la musique qui concourent à procurer ces états? Est-ce le fait de fixer un diapason plus ou moins haut?

Si c'était le cas, cela mettrait de côté toutes les musiques qui ignorent un diapason, toutes les musiques antérieures au 18<sup>e</sup> siècle, toutes les musiques traditionnelles.

Les paramètres qui concourent à procurer un sentiment spécifique sont nombreux. Ce sont: les rythmes, la couleur des instruments et des voix (timbre), le volume sonore, le style de mélodie, son mode et sa tonalité, le choix des harmonies entre voix polyphoniques.

L'ambiance sonore est bien différente selon que la musique est moyenâgeuse, baroque, classique, romantique, contemporaine, dodécaphonique, concrète, africaine, chinoise, rock, jazz, techno, comédies musicales, etc. et ceci quel que soit le diapason.

Lorsqu'une musique vous semble assommante, pensez-vous qu'il suffit de faire varier le diapason un peu plus haut ou un peu plus bas pour qu'elle se trouve miraculeusement harmonisante?

## L'intonation et les rapports entre notes

Un élément important à prendre en compte dans le sentiment procuré est le système d'intonation. La mélodie n'est pas seulement élaborée dans un mode et une tonalité, mais dans un système d'intonation qui fixe **la grandeur des intervalles entre notes**. (voir chapitre 8)

Par exemple, choisir la fréquence d'un DO ou d'un LA ne suffit pas à fixer la fréquence des autres notes de la gamme. Même si l'on sait qu'il y a un intervalle de tierce entre DO et MI, cette tierce peut être plus ou moins grande selon qu'on choisit le système à tempérament égal à octaves justes, le système à tempérament égal à quintes justes, le système à tempérament inégal, le système de Zarlino ou celui de Pythagore. Actuellement, il est devenu automatique que le système employé est la gamme tempérée, de sorte qu'on ignore généralement qu'elle est une convention récente et une commodité qui n'est nullement une nécessité. À l'opposé, on ignore généralement le système à tempérament égal à quintes justes de Serge Cordier qui, selon les témoignages, procure une sensation plus rayonnante.

**La valeur des intervalles et les rapports entre les notes sont pourtant un aspect essentiel pour un musicien**, car l'oreille est sensible à la grandeur des intervalles avec une grande précision. Elle peut atteindre, pour l'oreille entraînée, le centième de ton.

Cette sensibilité aux rapports entre les notes nous ramène à notre observation que **les rapports entre les éléments sont l'essence de la création, et non la valeur absolue d'un élément isolé**.

## L'effet des fréquences sur l'âme et le corps

Les sons ont un impact sur et dans notre corps physique. Dans le premier chapitre, j'ai montré qu'ils **résonnent dans différents endroits du corps**, et que ces résonances dépendent de la

**hauteur des sons**, c'est-à-dire des fréquences sonores émises. Elles dépendent également du **timbre**, qui résulte lui-aussi de la richesse en fréquences.

Or une musique vocale et instrumentale produit une multitude de fréquences qui résonnent dans toutes les parties du corps. Si l'on pense qu'une seule note contient en elle-même tout un ensemble d'harmoniques, alors imaginez l'abondance de fréquences de toutes hauteurs lorsque plusieurs notes se succèdent au long de la mélodie et qu'elles se superposent, produites simultanément par plusieurs musiciens.

## Pensées et intentions

Les considérations mathématiques sur la grandeur des intervalles ne doivent pas nous faire oublier que cela ne concerne que les instruments à sons fixes. Pour les violons, par exemple, et surtout pour la voix, les intervalles sont éminemment plastiques. Au lieu d'obéir à la règle mathématique, ils se rétrécissent et s'étirent en fonction du sentiment exprimé.

Je répète ce que j'ai dit dans le chapitre précédent: *Lorsque l'artiste chante, il emploie souvent d'instinct une **justesse expressive**, différente de la justesse naturelle (celle des gammes naturelle ou de Pythagore) et de la justesse tempérée (gamme tempérée). « La justesse expressive accentue le caractère attractif, appellatif (ou résolutif) de la note naturelle afin de lui donner une valeur caractéristique bien déterminée, mais variable selon les cas » (E. Willems). Ainsi de SI à DO, le demi-ton se réduit parfois à un quart de ton dans certains contextes expressifs, soit parce que le SI est attiré par le DO en DO majeur, soit parce que le DO est attiré par le SI, en LA mineur."*

Cette justesse expressive est donc guidée par le sentiment et l'intention. En fait, dans toute musique, une part importante du rendu sonore et de son effet sur l'auditeur est dû aux pensées et aux émotions du compositeur, des interprètes et des ingénieurs du son. Quelle intention mettent-ils dans le morceau de musique? Sont-ils portés par un texte, une passion, une ferveur, peut-être des incantations, une foi?

Cela m'a fait penser à la musique des groupes soufis, africains ou amérindiens qui est capable de créer des états de transe chez les danseurs. Je me suis demandé ce qui faisait la puissance de ces musiques. J'ai interrogé un spécialiste de la musique arabe, M. **Abdou Ouardi**, joueur de oud international réputé.

Il me répondit que la transe soufie était très réelle. **Les musiciens ne se préoccupent pas de diapason pour induire une telle transe.** Ce sont d'autres caractéristiques de la musique et des musiciens qui entrent en jeu, et principalement le **rythme**. La musique est généralement produite par des instruments de percussions (tambours, bendir..) et pas d'instruments à cordes. Dans un autre genre, au Maroc, on emploie le hautbois marocain (la gaita) associé à des percussions. On assiste à des phénomènes époustouflants. La transe est si puissante que le corps est mis dans des états physiologiques non ordinaires. Certains Gnawa peuvent avaler de l'eau bouillante, se transpercer le ventre avec des couteaux ou se frapper la tête avec un sabre sans dommages.

J'ajoute toutefois que ce sont là des traditions archaïques qu'il n'est pas nécessaire d'adopter pour arriver à des guérisons. Il existe d'autres moyens pour créer des états modifiés de conscience, porteurs d'amour et de respect pour notre temple corporel. Certains de ces moyens emploient des géométries et des sons sacrés (*voir mes articles [Spiritualité et Développement personnel](#) et [Les codes géométriques et sonores de l'être humain](#)*). J'ai cité ce phénomène de transe dans le seul but d'alimenter notre réflexion sur les effets puissants de la musique et sur les paramètres qui y concourent.

La musique est vivante. Elle transmet des énergies complexes qui dépendent de paramètres dépassant de loin la seule valeur du diapason.

8 aout 2016

# Chapitre 10

## Histoire de la notion de fréquence sonore

### Apparition du concept et développement des procédés de mesure

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

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

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

### Fréquence de vibration d'un son

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

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

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

### Objets sonores vibrants

Déjà dans l'antiquité grecque, on savait que **le son est produit par un objet qui vibre**



(membrane, lamelle de bois, objet métallique, corde tendue...).

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

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

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

## Sensation de hauteur

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

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

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

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

## Compter le nombre de vibrations

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

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

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

Galilée publie ses études sur le son en 1638, dans une dizaine de pages de ses *Discours et*

démonstrations mathématiques concernant deux sciences nouvelles touchant la mécanique et les mouvements locaux. Observant les vaguelettes qui se forment autour d'un verre aux parois minces plongé dans l'eau lorsqu'il est mis en vibration sonore, il constate que *si le ton du verre venait à monter d'une octave, [il voit] aussitôt chacune de ces ondes se diviser en deux: phénomène qui prouve clairement que le rapport de un à deux est bien la forme propre de l'octave.* (cité par François Baskevitch, *L'élaboration de la notion de vibration sonore: Galilée dans les Discorsi*)

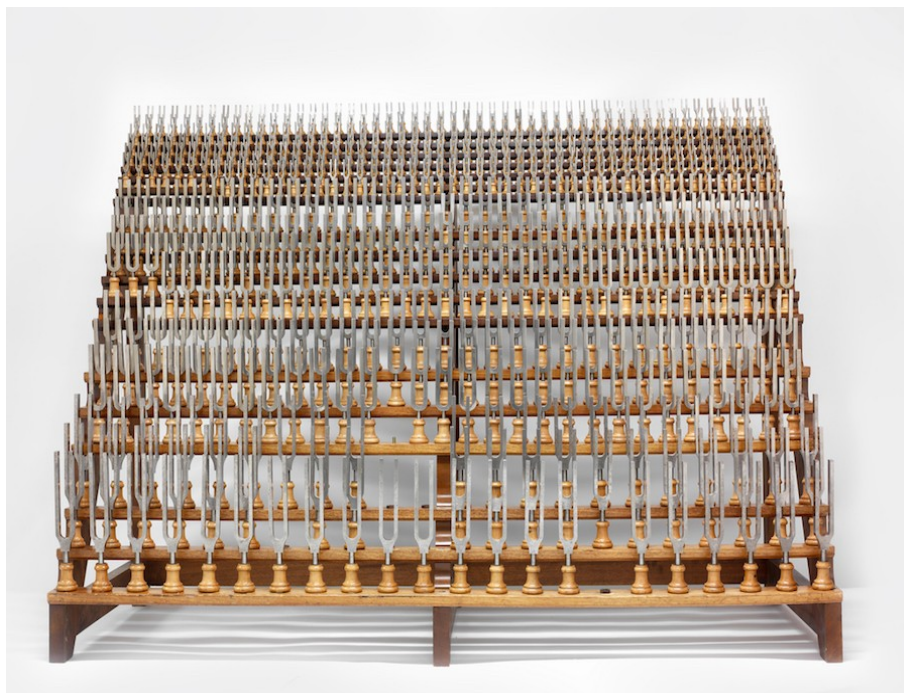
## Recherches en acoustique

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

Le physicien allemand **Ernst Chladni** (1756 - 1827) mit en évidence les vibrations de plaques métalliques lorsqu'elles sont excitées par un archet et émettent un son. Il les saupoudrait de sable qui se rassemble en lignes dessinant des figures. Elles donnent des indications précieuses sur les caractéristiques des vibrations sonores (*voir chapitre 7*). Chladni étudia aussi la vibration des cloches et rédigea un traité d'acoustique.



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



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

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

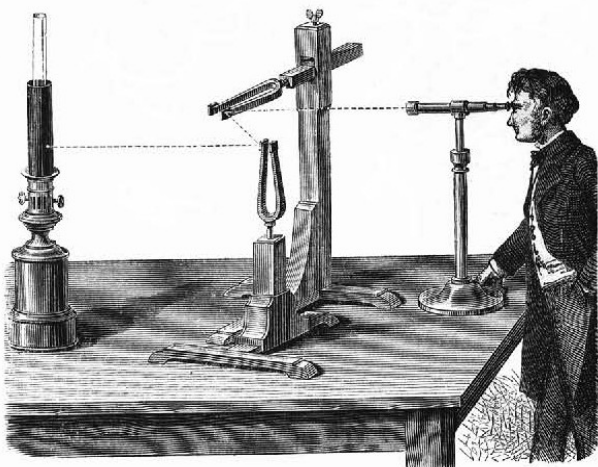
d'un chronomètre).

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

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

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

## Rendre visibles les vibrations



*Méthode optique de Lissajous*

*D'après A. Guillemin, Le Son, Paris, Hachette, 1875*

*Merci à Giusy Pisano, Une archéologie du cinéma sonore, édition en ligne, CNRS Éditions, 2004*

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

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

C'est avec un procédé de ce type que le physicien français **Jules Antoine Lissajous** (1822 - 1880) mit au point en **1885** une méthode optique de comparaison des vibrations sonores de deux diapasons, placés en équerre, l'un vertical, l'autre horizontal. Ils réfléchissent

un faisceau de lumière qui décrit une courbe sur un écran. Cette courbe révèle si les diapasons sont accordés ou décalés en fréquence.

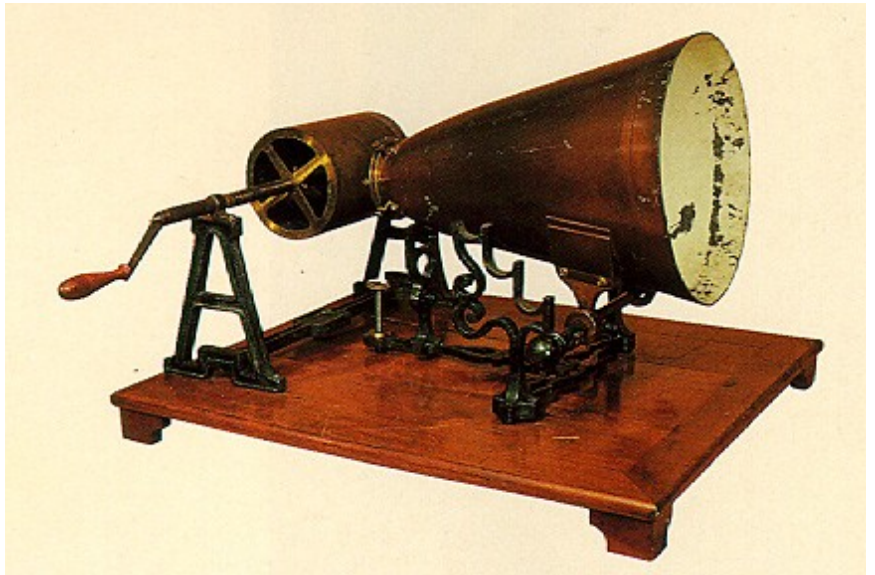
## Graver les vibrations

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

Dans les premiers appareils, la surface graphique est faite d'un papier enduit de noir de fumée, et le stylet trace une ligne blanche sur cette surface. Pour déplacer la surface au fur et à mesure de

l'inscription de la ligne, on applique ce papier sur un cylindre qu'on fait tourner avec une manivelle. En **1807**, le physicien britannique **Thomas Young** (1773 - 1829), le même qui est célèbre pour avoir étudié les interférences d'un faisceau lumineux traversant deux fentes parallèles (*voir mon article web Matière et rayonnements*), imprime de cette façon la trace des vibrations d'un diapason sur un cylindre tournant.

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



*Le phonautographe de Scott de Martinville produit par Rudolph Koenig en 1859. Merci à USCB cylinder audio archives (Courtesy of the Smithsonian Institution)*

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

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

## L'affichage électrique des vibrations sonores

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

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

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



*Oscilloscope analogique*

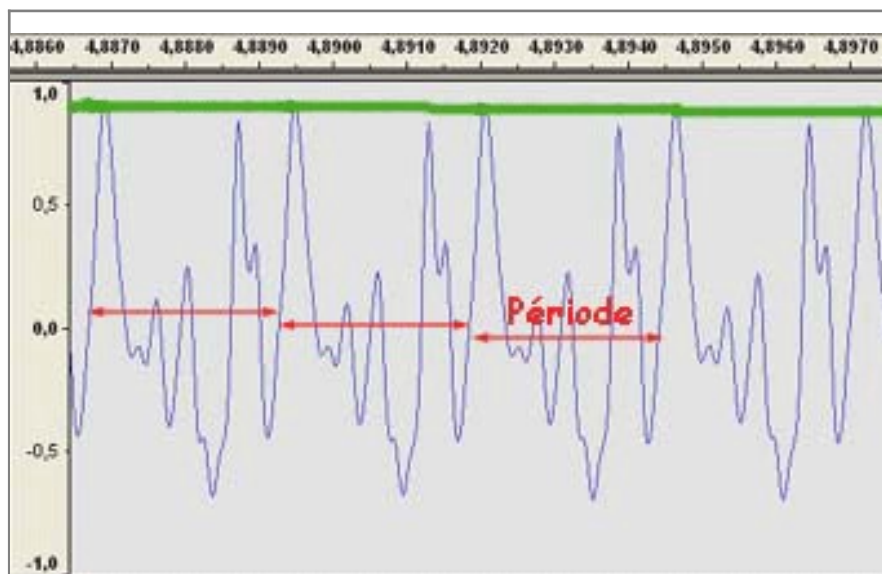
Puis apparaissent l'oscillographe et l'oscilloscope, qui permettent d'afficher le signal électrique. **L'oscillographe** a été inventé en 1893 par le physicien français **André Eugène Blondel** (1863 - 1938) et perfectionné par d'autres. Il sera détrôné par l'**oscilloscope cathodique**, inventé en **1897**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

Si on envoie les oscillations électriques du microphone dans un oscilloscope, on voit sur l'écran le tracé de ces oscillations et on l'enregistre. Avec cet appareil, on peut analyser toute vibration sonore avec précision:

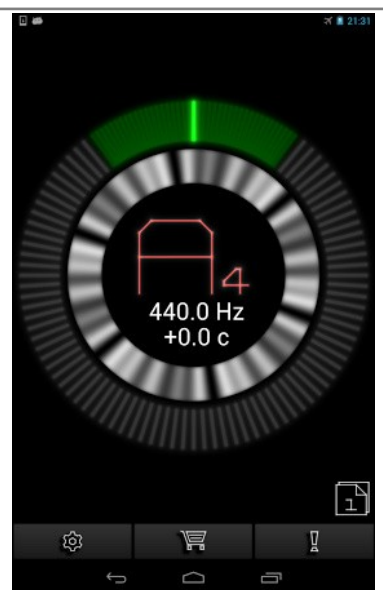
fréquence fondamentale, harmoniques, intensité, dynamique (évolution dans le temps), etc. L'ère électronique a commencé.

## Popularisation de la mesure des fréquences sonores

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



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



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

Les notions d'ondes sonores, de fréquences et d'harmoniques ont progressivement fait partie de notre culture populaire. La nature vibratoire des sons est enseignée dans les écoles ainsi que l'indication de leurs fréquences.

La popularisation très récente et rapide de l'usage des ordinateurs personnels puis des

smartphones a accéléré cette évolution.

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

Aout 2017

## L'art subjectif et l'art objectif selon G.I. Gurdjieff

"**Dans votre art, tout est subjectif** - la perception qu'a l'artiste de telle ou telle sensation, les formes dans lesquelles il a cherché à l'exprimer, et la perception de ces formes par les autres. En présence d'un seul et même phénomène, un artiste peut sentir d'une certaine façon, et un autre artiste d'une façon toute différente. Un même coucher de soleil peut provoquer une sensation de joie chez l'un et de tristesse chez l'autre [...]. Et les spectateurs, les auditeurs ou les lecteurs percevront non pas ce que l'artiste voulait leur communiquer, ou ce qu'il a ressenti, mais ce que les formes par lesquelles il aura exprimé ses sensations leur feront éprouver par association. Tout est subjectif et tout est accidentel, c'est-à-dire basé sur des associations - les impressions accidentelles de l'artiste, sa "*création*" et les perceptions des spectateurs, des auditeurs ou des lecteurs.

Dans l'art véritable, au contraire, rien n'est accidentel [...]. L'artiste *sait* et *comprend* le message qu'il veut transmettre, et son œuvre ne peut pas produire une certaine impression sur un homme et une impression toute différente sur un autre - à condition, naturellement, de prendre des personnes d'un certain niveau. Son œuvre produira toujours, avec une certitude mathématique, la même impression. Cependant, la même œuvre d'art produira des effets différents sur des hommes de différents niveaux. [...] Voilà **l'art vrai, objectif**. Prenez par exemple un ouvrage scientifique - un livre d'astronomie ou de chimie. Il ne peut pas être compris de deux manières: tout lecteur suffisamment préparé comprend ce que l'auteur a voulu dire et précisément de la façon dont l'auteur a voulu être compris. **Une œuvre d'art objective** est exactement semblable à l'un de ces livres, avec cette seule différence qu'elle **s'adresse à l'émotion de l'homme et non pas à sa tête**.

[Il existe de nos jours des œuvres d'art de ce genre]. Le grand Sphinx d'Égypte en est une, de même que certaines œuvres architecturales connues, certaines statues de dieux, et bien d'autres choses encore. **Certains visages de dieux ou de héros mythologiques peuvent être lus comme des livres, non avec la pensée, mais avec l'émotion**, pourvu que celle-ci soit suffisamment développée. Au cours de nos voyages en Asie Centrale, nous avons trouvé dans le désert, au pied de l'Hindu Kush, une curieuse sculpture dont nous avons pensé d'abord qu'elle représentait un ancien dieu ou démon. Elle ne nous donna au début qu'une impression d'étrangeté. Mais bientôt nous avons commencé à *sentir* le contenu de cette figure: c'était un grand et complexe système cosmologique. Petit à petit, pas à pas, nous avons déchiffré ce système: il s'inscrivait sur son corps, sur sa tête, sur son visage, sur ses yeux, sur ses oreilles, et partout. **Dans cette statue, rien n'avait été laissé au hasard, rien n'était dépourvu de signification**. Et graduellement, se fit jour en nous l'intention des hommes qui l'avaient érigée. Nous pouvions désormais sentir leurs pensées, leurs sentiments. Certains d'entre nous croyaient voir leurs visages et entendre leurs voix. En tout cas, nous avons saisi le sens de ce qu'ils voulaient nous transmettre à travers des milliers d'années et non seulement ce sens, mais tous les sentiments et émotions qui lui étaient liés. Cela c'est vraiment de l'art."

Extraits de *Fragments d'un enseignement inconnu*, P.D. Ouspensky, éd. Stock, 1949, 1974

# Accords des gammes majeures et mineures

## Affirmation de la tonalité

Voici un développement technique et conceptuel sur les accords, destiné à ceux qui sont familiarisés avec la notion d'accord, peut-être par la pratique de la guitare ou des claviers: définition des accords et rapport avec la tonalité.

Des notes tenues émises simultanément constituent un accord. Plus précisément, dans la pratique harmonique classique consacrée par la théorie, les notes superposées ne sont pas arbitraires, elles appartiennent aux mélodies, donc à la gamme de la tonalité dans laquelle elles sont écrites. En définitive, la théorie énonce qu'**un accord est la superposition de sons différents appartenant à une même gamme et distants de tierces**. Le son le plus grave est le son sur lequel repose l'accord, sa base, son socle. Lorsque nous considérerons les notes d'un accord, elles seront définies par l'intervalle qui les sépare de ce **son de base ou son fondamental**.

### Accords de 3 notes (accords de quinte)

On ne parle d'accord qu'à partir de 3 sons simultanés. Les plus simples sont donc des accords de 3 notes, appelés accords de quinte parce que leur note la plus élevée est la quinte (*pour la définition des intervalles, voir chapitre 5 Hauteur des sons*). **Un accord de quinte est fait d'un son de base (dit fondamental), de la tierce et de la quinte**. (voir les figures ci-dessous)

Prenons par exemple l'accord de quinte établi sur la note DO. C'est DO/MI/SOL. Si l'on recherche tous les accords de quinte que l'on peut établir **dans la gamme majeure**, on en trouve de 3 types: accord majeur, accord mineur, accord de quinte diminuée.

### Accords de quinte juste majeurs (accords parfaits majeurs)

**Un accord parfait majeur est constitué du son fondamental, d'une tierce majeure et d'une quinte juste**. L'intervalle de quinte de 3 tons et demi, comme dans DO-SOL, est dit **juste**. C'est la quinte naturelle de la gamme, qui sonne de façon harmonique (*voir chapitre 5 sur les harmoniques*). La tierce majeure a une étendue de 2 tons (comme dans DO-MI).

Dans la gamme majeure, on trouve 3 accords majeurs, posés sur les degrés 1, 4 et 5. En DO majeur, ces degrés sont DO, FA et SOL et les accords: **DO/MI/SOL**, **FA/LA/DO**, **SOL/SI/RÉ**. Vous pouvez vérifier qu'à eux trois, ces accords contiennent les 7 notes de la gamme majeure. Les sons fondamentaux qui les supportent ont donc des rôles clés et sont désignés de façon significative: **tonique (degré 1), sous-dominante (degré 4), dominante (degré 5)**. On les nomme **notes tonales**. Guitaristes ou clavistes, vous reconnaîtrez là les premiers accords que vous avez appris pour accompagner vos chants de débutants. **Ces 3 degrés et ces 3 accords sont les piliers de la tonalité**.

GAMME MINEURE - Accords de septième

7M	7m	7M	7m	7m	7M	7dim
5j	5-	5+	5j	5j	5j	5-
3m	3m	3M	3m	3M	3M	3m



## Accords de quinte juste mineurs (accords parfaits mineurs)

Un accord parfait mineur est constitué du son fondamental, d'une tierce mineure et d'une quinte juste. La tierce mineure a une étendue de 1 ton et demi (comme dans DO-MI $\flat$  ou LA-DO). Dans la gamme de DO majeur, on trouve 3 accords mineurs, posés sur les degrés 2, 3 et 6 (RÉ, MI, LA): **RÉ/FA/LA**, **MI/SOL/SI**, **LA/DO/MI**.

## Accords de quinte diminuée

Dans la gamme majeure, il reste l'accord construit sur le septième degré (SI): **SI/RÉ/FA**. Il est fait d'une **tierce mineure et d'une quinte diminuée** (diminuée d'un demi-ton par rapport à la quinte juste). C'est un accord de quinte diminuée.

## Accords de quinte augmentée

Ayant établi les 7 accords de la gamme majeure, passons à la **gamme mineure** dont le modèle est la gamme de LA mineur. Comme la seule différence avec la gamme de DO majeur est le SOL#, on va retrouver les mêmes accords, sauf les 3 qui contiennent ce SOL#. On obtient des accords parfaits majeurs et mineurs, des accords de quinte diminuée et un accord d'un nouveau type, l'accord de quinte augmentée.

2 accords majeurs posés sur les degrés 5 et 6 (MI, FA): **MI/SOL#/SI** et **FA/LA/DO**

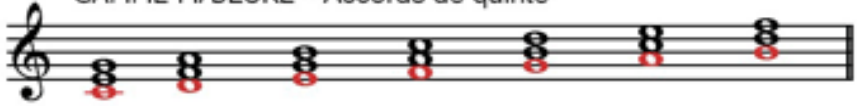
2 accords mineurs posés sur les degrés 1 et 4 (LA, RÉ): **LA/DO/MI** et **RÉ/FA/LA**

2 accords de quinte diminuée posés sur les degrés 2 et 7 (SI, SOL#): **SI/RÉ/FA** et **SOL#/SI/RÉ**

Enfin, l'accord construit sur le degré 3 (DO): **DO/MI/SOL#** a une **tierce majeure et une quinte augmentée**. C'est un accord de quinte augmentée.


## Accords de la gamme majeure

GAMME MAJEURE - Accords de quinte



M m m M M m 5-

GAMME MAJEURE - Accords de septième



7M 7m 7m 7M 7m 7m 7m

5j 5j 5j 5j 5j 5j 5-

3M 3m 3m 3M 3M 3m 3m

## Accords de la gamme mineure

GAMME MINEURE - Accords de quinte



m 5- 5+ m M M 5-

## Accords de 4 notes (accords de septième)

À partir des accords de quinte qui se présentent déjà sous 4 types différents, si on ajoute une quatrième note, l'intervalle de septième, on dénombre encore plus de combinaisons possibles entre les intervalles composant l'accord: selon les cas, la tierce est majeure ou mineure, la quinte juste, diminuée ou augmentée et la septième majeure, mineure ou diminuée. Pour l'ensemble des 2 gammes majeure et mineure, on décompte 7 espèces d'accords de septième (voir les figures ci-dessus).

Portons notre attention sur trois d'entre eux, l'accord de septième de dominante, l'accord de septième de sensible, et l'accord de septième diminuée.

Le **degré 5 des gammes majeure et mineure** est appelé dominante parce qu'il a un rôle important par rapport à la tonique ou note de base de la gamme. L'accord de septième posé sur le degré 5 s'appelle **accord de septième de dominante**. Ainsi, en DO majeur, le degré 5 est SOL et l'accord de septième de dominante est SOL/SI/RÉ/FA. Il est composé d'un **accord parfait majeur plus une septième mineure** (SOL-FA).

L'accord posé sur la sensible ou **degré 7 de la gamme majeure** (SI) est l'**accord de septième de sensible** SI/RÉ/FA/LA, **composé d'un accord de quinte diminuée et d'une septième mineure** SI-LA. La **gamme mineure** ne diffère de la majeure que par une seule note, la septième (SOL# en LA mineur) qui est haussée d'un demi-ton par rapport à la note identique (SOL), cinquième de la gamme majeure. Aussi, les accords ne comportant pas de SOL sont identiques dans les deux gammes, posés sur les notes SI, RÉ, FA. On retrouve donc sur le SI (**degré 2**) l'accord de septième de sensible.

Au contraire, l'accord posé sur la sensible ou **degré 7 de la gamme mineure** (SOL# en LA mineur) diffère de l'accord de septième de sensible par sa septième qui est diminuée, c'est-à-dire abaissée d'un demi-ton (SOL# - FA) par rapport à la septième mineure. C'est l'**accord de septième diminuée**. Il est **fait d'un accord de quinte diminuée et d'une septième diminuée**: SOL#/SI/RÉ/FA.

## Intervalle de quinte diminuée. Rôle de la note sensible

En majeur, la quinte diminuée sur la sensible SI (SI-FA) est un constituant de l'**accord de quinte diminuée** (SI/RÉ/FA). Si on ajoute le SOL en-dessous, on a l'**accord de septième de dominante** de SOL (SOL/SI/RÉ/FA). Les deux accords sont donc cousins. Ils ont en commun la quinte diminuée SI - FA.

La quinte diminuée donne l'impression qu'on est quelque part en suspension, prêt à revenir chez soi, sur la tonique. La quinte SI-FA conduit à la tierce DO-MI. L'accord de quinte diminuée SI/RÉ/FA, en tension, se résout par l'accord parfait majeur SOL/DO/MI. C'est ce sentiment d'appel vers la tonique, dû à la note sensible SI, qui fait que les accords de quinte diminuée et de septième de dominante sont tonals. L'effet tonal de la sensible du mode majeur est tel qu'on l'a calqué dans le mode mineur en élevant la septième note d'un demi-ton.



Illustration sonore de la résolution de la quinte diminuée

## Accords complexes: Vers la polytonalité

### Accords de 5 notes (accords de neuvième)

Continuons à complexifier les accords, comme l'ont fait les compositeurs du 19<sup>e</sup> siècle, en ajoutant une cinquième note, l'intervalle de neuvième. Si, à l'accord de septième de dominante, on ajoute la neuvième, on obtient la **neuvième de dominante**.

En DO majeur, c'est SOL/SI/RÉ/FA/LA, soit tierce majeure/quinte juste/septième mineure et **neuvième majeure**. Construit à partir du DO (en FA majeur), cela donne: DO/MI/SOL/SI<sup>b</sup>/RÉ. Cette neuvième DO/RÉ est moins conclusive que la septième DO/SI<sup>b</sup> et on est tenté de s'y attarder. C'est ce qu'ont fait César Franck et les musiciens de jazz.

### Polytonalité

Les compositeurs se plaisent à ajouter des notes étrangères dans les accords de septième, pour le plaisir d'habiller l'accord d'une sonorité plus riche. Exemple:

L'accord de septième de dominante en FA majeur est DO/MI/SOL/SI<sup>b</sup>. On le modifie avec une septième majeure, DO/MI/SOL/SI, comme si on était en DO majeur. En introduisant cette note SI, étrangère à la tonalité initiale de FA majeur, on invite la présence de la tonalité DO majeur à coexister avec FA majeur.

### Accords de 7 notes (accords de treizième)

C'est encore plus facile et tentant avec des accords plus complexes. Pris par le jeu, les compositeurs ont introduit des accords de 6 notes (onzième) puis de 7 notes (treizième). Ravel et les musiciens de jazz emploient des accords de treizième comme (en DO majeur) DO/MI/SOL/SI/RÉ/FA#/LA. Le FA# est un étranger et a été ajouté. Cet accord de treizième contient 3 accords parfaits qui appartiennent à plusieurs tonalités: DO/MI/SOL (DOM) - SOL/SI/RÉ (SOLM) - RÉ/FA#/LA (RÉM).

La seule affirmation qu'on reste bien en DO majeur est le son fondamental, la basse DO. Si on la supprime, la tonalité devient indéterminée. C'est ce qu'on fait Bartok et Messiaen.

## Physique des ondes sonores et de leur géométrie

### Résonance

Pourquoi les figures acoustiques de la plaque en vibration (*chapitre 7*) ne s'établissent-elles qu'à certaines fréquences de vibration bien précises et pas à d'autres? Parce que **la plaque est en résonance avec ces fréquences**. Qu'est-ce que ça veut dire? Qu'est-ce qu'une résonance?

Dans un contexte familier, si vous dites d'un texte ou de paroles qu'elles résonnent bien en vous, vous signifiez qu'elles vous font écho. Alors que vous serez indifférent à un autre propos, le texte vous touche, autrement dit, il **provoque une réaction émotionnelle** en vous. Il a le pouvoir de vous remuer.

Autre exemple: Vous avez parfois constaté que dans une grande salle, une église ou une grotte, votre voix résonne. Cela veut dire qu'elle renvoie un écho de votre voix, l'amplifie. Mais cela ne se produit pas n'importe comment. Si vous faites des *ah* et des *oh*, vous constatez que **cet effet se produit seulement à certaines hauteurs de votre voix**. C'est l'effet de résonance. De même, si vous chantez *ah* devant un tambour, une guitare ou le dessus d'un piano ouvert, à certaines

hauteurs de votre voix l'instrument se met à résonner avec la même note. Il vous renvoie votre voix.

Chaque fois que nous émettons un son, il est reçu par les objets et les parois du lieu qui réagissent, le plus souvent de façon imperceptible. Mais parfois, pour certains sons, ils réagissent fortement: c'est une résonance. **Le son envoyé est en accord avec la nature propre de l'objet et le fait réagir.** La salle amplifie le son de votre voix s'il est en accord avec la nature et le volume de la salle. Il y a une affinité, une espèce de sympathie entre le son et la salle.

Comment se produit cette amplification? Imaginez que vous poussez un enfant sur une balançoire. La balançoire s'éloigne, puis revient vers vous. Si vous voulez que le balancement prenne de l'ampleur, vous devez donner une nouvelle impulsion, mais pas trop tôt, ni trop tard: juste au moment où la balançoire est prête à repartir en avant. Si vous le faites avant, vous la freinez dans son mouvement de retour. Si vous le faites après, vous n'avez plus de force, elle s'éloigne. La résonance, c'est quand votre poussée est synchronisée avec **le mouvement propre d'aller et retour** de la balançoire. Ce mouvement propre de la balançoire est inhérent à elle, il est le résultat de son poids, de la longueur de la corde. La résonance, c'est quand il y a **accord entre la fréquence inhérente à l'objet et celle de la stimulation.**

Lorsqu'on frotte ou frappe un objet (plaque, cloche, corde), on le laisse ensuite vibrer à sa façon naturelle. Il répond selon ses fréquences naturelles. Il résonne selon sa nature. Par contre, **si on impose à l'objet une fréquence entretenue, il bouge de façon chaotique et ne prend une forme stationnaire que si la fréquence imposée est en résonance avec sa fréquence naturelle.**

## Ondes voyageuses

Qu'entend-on par onde? **Une onde se produit quand un mouvement momentané de matière à un endroit se transmet de proche en proche.** Explications:

Imaginez des danseurs debout en ligne en face de vous sur une scène. Ils se tiennent l'un à côté de l'autre, disons qu'ils sont 12. Le premier se penche et reste penché. Puis le second se penche et le premier se relève. Puis le 3e se penche et le 2e se relève, et ainsi de suite jusqu'au 12e. Visuellement vous voyez une silhouette penchée qui se propage du 1er au 12e. Il n'y a pas eu un déplacement des personnes. **Ce qui se propage du 1er au 12e, c'est seulement une position.**



**Une onde est la propagation d'un changement de position (d'attitude) des éléments d'un ensemble, sans déplacement de ces éléments.** Les éléments de notre exemple sont des danseurs. Dans la matière, ce sont des molécules ou des particules, des éléments qui sont côte à côte dans l'espace, qui remplissent l'espace.

Prenons l'exemple de **l'eau et des vagues**. Vous êtes au bord d'un bassin, vous plongez doucement la main, et vous donnez une petite poussée. Vous avez créé une vague qui se propage dans le bassin. Les éléments qui dansent, ce sont les molécules d'eau. Elles montent et descendent sur place. Lorsque la vague arrive, la molécule monte et, la vague passée, elle redescend, comme un bouchon qui flotterait à cet endroit.

Prenons l'exemple de la **corde vibrante**. Notez bien que ce qui se déplace d'un bout à l'autre de la corde, ce n'est pas la matière elle-même. Si vous marquez un point de la corde par une encre fluorescente, vous le voyez osciller verticalement. À certains moments, il est tranquille à d'autres il est soulevé.

Dans l'air, les éléments qui dansent sont les molécules d'air. Mais contrairement à l'eau, elles ne bougent pas sur une vague verticalement, mais horizontalement. Imaginons que le premier danseur se penche sur la droite, puis le 2e fait de même tandis que le 1er revient aussitôt à sa position initiale. Et ainsi de suite. Cela revient à dire que les molécules se rapprochent et s'écartent l'une de l'autre ou encore que la densité d'air (c'est aussi sa pression) varie localement. En réalité, le mouvement de propagation s'effectue dans toutes les directions, radialement, et diffracte à partir de chaque point mis en mouvement.

## Ondes stationnaires

Parfois, on a l'impression que l'onde ne se déplace pas, qu'elle reste sur place. Elle est **stationnaire**. Cela arrive lorsque les danseurs **(les éléments) bougent de façon synchronisée**. Ils se penchent tous en même temps et se relèvent en même temps. **Une onde stationnaire est un mouvement synchronisé sur place**. Mais les danseurs ne se penchent pas tous à la même hauteur. Le 1er et le 12e restent immobiles. Le 2e et le 11e se penchent légèrement, les 3e et 10e un peu plus, tandis que les 6e et 7e ont une amplitude maximale.

C'est ce qui se passe également dans la plaque de métal lorsqu'elle est en résonance. Chacune de ses parties vibre verticalement, au maximum dans les lignes ou les points ventraux, pas du tout dans les lignes nodales. Il est remarquable de constater qu'il y a un mouvement intense, et pourtant les lignes nodales dessinent une structure fixe. C'est un mouvement stationnaire, sur place.

Aux fréquences en-dehors de la résonance, la plaque de métal est parcourue de vibrations qui se déplacent de façon chaotique. Et puis, pour une fréquence précise, les ondes deviennent stationnaires. Comment se produit cette transition? Raisonons avec la corde qui n'a qu'une seule direction de propagation. On crée une secousse (un petit déplacement vertical) à une extrémité et elle court jusqu'au bout de la corde. Au bout de la corde, elle rebondit et repart en arrière. Si on crée plusieurs secousses qui se suivent régulièrement, celle qui revient rencontre une secousse qui arrive. Les 2 se combinent. **C'est seulement s'il y a une certaine synchronisation entre les secousses qui reviennent et celles qui arrivent qu'elles se combinent en formant une onde stationnaire**. Cette synchronisation a lieu si la fréquence est telle que les secousses se croisent en se superposant exactement. Le mouvement de propagation est alors en résonance avec la corde, il s'arrête.

Cela explique que le phénomène d'onde stationnaire dépend de la façon dont les ondes se propagent sur la corde, donc **de la matière et de la tension de la corde**. Il dépend aussi de **l'existence d'une frontière sur laquelle elles rebondissent**. Dans le cas d'une plaque, les frontières sont définies par ses bords extérieurs. **La forme de la plaque au repos est déterminante dans le dessin des formes géométriques stationnaires de la plaque en vibration**.

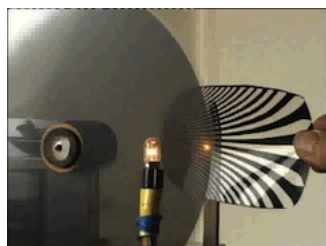
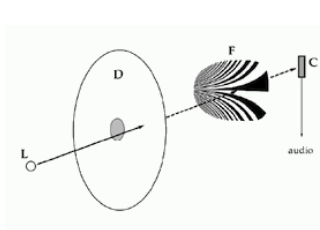
# Les formes créent des sons

## Instruments photosoniques de Jacques Dudon

Nous avons vu qu'une plaque au repos d'une certaine forme pouvait résonner selon une forme géométrique lorsqu'elle est mise en vibration. On peut expérimenter l'inverse. Si je dessine une forme géométrique selon des lois de symétrie et de périodicité, est-il possible de la transformer en son?

Oui. C'est sur un principe analogue que Jacques Dudon a imaginé et construit des instruments sonores. Imaginez un disque en matière transparente (D) sur lequel est inscrit une telle forme géométrique. Devant, on place une petite lampe (L). La lumière passe à travers le disque mais est arrêtée par les motifs noirs de D. Maintenant, vous placez un détecteur de lumière (cellule solaire) derrière le disque (C). Sa fonction est de transformer en courant ce qu'il reçoit en lumière et ce courant alimente un amplificateur et un haut-parleur qui le traduit en son. Plus la brillance est forte, plus fort est le courant. S'il se trouve en face d'un motif noir, il ne produit aucun courant. S'il se trouve derrière un vide, il produit un courant constant. Mais comment cette forme peut-elle être traduite en un son?

L'élément important est qu'on met le disque en mouvement. Ce n'est pas le disque dans son entier qui est transformé en son. La lampe est placée seulement devant une toute petite partie de la forme imprimée. Mettons-là par exemple à la périphérie, à 3h. À cause de la rotation, se présentent devant elle successivement les motifs imprimés sur la couronne périphérique. La lumière est coupée chaque fois qu'un motif noir passe devant. On produit donc une lumière pulsée. On a transformé une forme périodique dans l'espace en une vibration dans le temps par le truchement du mouvement.



*Instrument et disques photosoniques © Jacques Dudon.  
À gauche, le montage. À droite, des exemples de formes imprimées sur le disque D*

On s'arrange pour que la fréquence de cette pulsation soit audible, donc entre 20 et 8000 Hz. Attention, ce n'est pas la fréquence de l'onde lumineuse (environ 500 000 milliards de Hz), mais la fréquence des coupures de cette lumière. On obtient un son continu. Pour faire varier la hauteur du son, on fait varier la vitesse de rotation du disque.

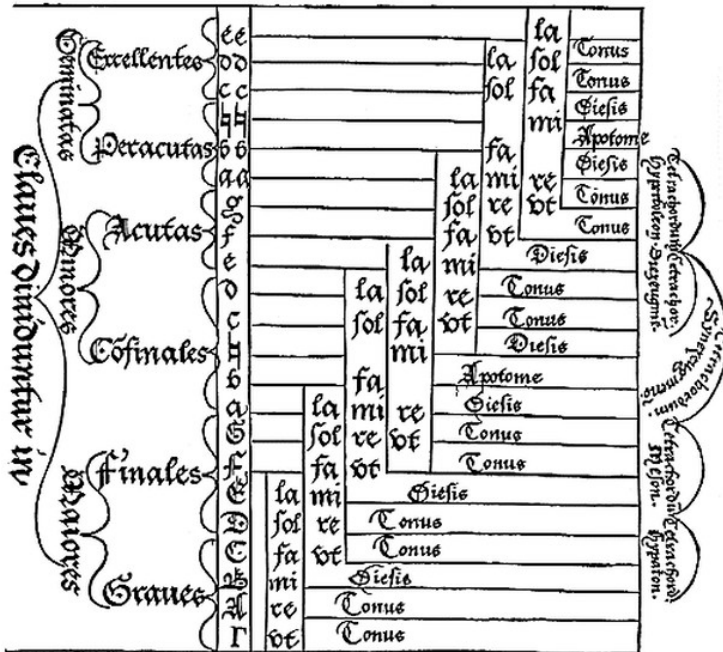
Remarquez que les motifs ne sont pas de simples traits, mais des formes complexes. Cela agit sur le timbre du son, autrement dit sa couleur, sa composition en harmoniques. Le disque comporte des motifs qui diffèrent de la périphérie au centre. En déplaçant la lampe horizontalement, on peut obtenir des timbres variés. L'instrumentiste a aussi la possibilité de moduler ses sons en introduisant un filtre optique (F) qu'il déplace à la main.

**Il y a une relation très forte entre les formes graphiques qui se trouvent sur le disque et les sons produits. Jacques Dudon a créé à ce jour 1250 disques d'ondes originaux permettant l'expérimentation de timbres, comme d'échelles microtonales en adéquation avec ces timbres. Il a exprimé son talent en de nombreux concerts et a enregistré un CD.**

# Hexacordes et solmisation au Moyen-Âge

En Grèce antique, la théorie et la pratique musicale s'appuyaient sur le concept de **tétracorde**, suite de 4 notes consécutives dont les deux extrêmes sont distantes d'une quarte juste (rapport de fréquences 4/3).

Si l'on s'en réfère au traité *Le Istitutioni Harmoniche*, du compositeur italien et grand théoricien de la Renaissance **Giuseffo Zarlino** (1517-1590), qui étudiait les systèmes musicaux de l'Antiquité et de son époque, **les chanteurs de la Grèce antique** avaient comme guide expérimental le **monocorde**, un instrument fait d'une très longue corde tendue sur une planchette et divisée par un chevalet mobile (voir la description dans le chapitre 9).



D'après Yssandon 1582, 11v. YSSANDON, Jean (1582).  
*Traité de la Musique Pratique*, Paris, Adrian le Roy et  
 Robert Ballard

[www.contrepoint-historique.com/20](http://www.contrepoint-historique.com/20)

La planchette du monocorde grec comporte des repères pour positionner le chevalet et l'indication de la note produite pour cette position. Or ces repères de notes sont groupés par 4 séparés par des intervalles précis, et l'ensemble est appelé un **tétracorde**.

5 tétracordes successifs sont inscrits sur la planchette. Chacun d'eux est désigné par un nom grec (hypaton, meson, diezeugmenon, ...) de même que les 4 notes de chacun des tétracordes. Les tétracordes se chevauchent, la note haute de l'un pouvant être aussi la note basse d'un autre. Il y a donc un total de 16 notes.

Au Moyen-Âge, le moine bénédictin italien **Guido (ou Gui) d'Arezzo** (992 - après 1033) étend le tétracorde de deux degrés vers le bas, créant un **hexacorde**. Il remplace les noms grecs des 6 degrés de l'hexacorde par les noms syllabiques *ut, ré, mi, fa, sol, la*, quelle que soit sa hauteur.

Le système complet, souvent appelé **main guidonienne** parce qu'il l'avait inscrit sur les 5 doigts de la main à titre mnémotechnique, comporte 7 hexacordes totalisant 22 notes. Chacun est ancré à une hauteur repérée par les lettres A à G, appelées **clés**, indiquées sur la planche. Elles préfigurent les noms actuels des notes dans les pays anglophones et germaniques, et les clés de l'écriture musicale sur une portée.

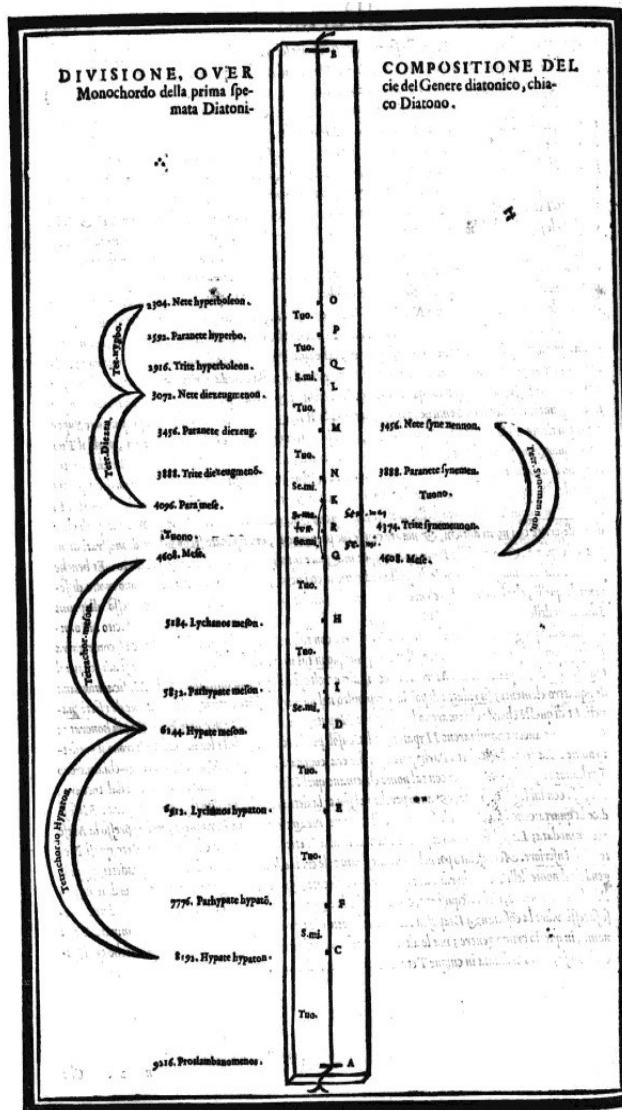
Comme les hexacordes se chevauchent, à une clé correspond souvent une note de plusieurs hexacordes. Par exemple la même clé G peut désigner le SOL de l'hexacorde bas, le RÉ de l'hexacorde plus élevé, et l'UT de l'hexacorde supérieur. À la Renaissance, cette note était donc désignée comme G-sol-ré-ut.

Nous retenons de cette description que les syllabes *ut, ré, mi, fa, sol, la* correspondent aux six degrés d'un hexacorde, et non à une hauteur absolue.

Le chanteur solmiste en utilisant les voix de l'hexacorde dans lequel sa mélodie évolue. Si elle dépasse les limites d'un seul hexacorde, il change d'hexacorde (muance ou mutation).

La notion de gamme était donc complètement inconnue.

On remarque que notre SI actuel est absent de la main guidonienne. Effectivement, au-dessus du LA, on change d'hexacorde, et on se retrouve sur un MI. Tous les demi-tons se chantent donc MI-FA.



*Le monochorde diatonique de l'espèce diatono selon Zarlino  
Zarlino, Ist, édition de 1558, II, 28*



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

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

## Proposition I

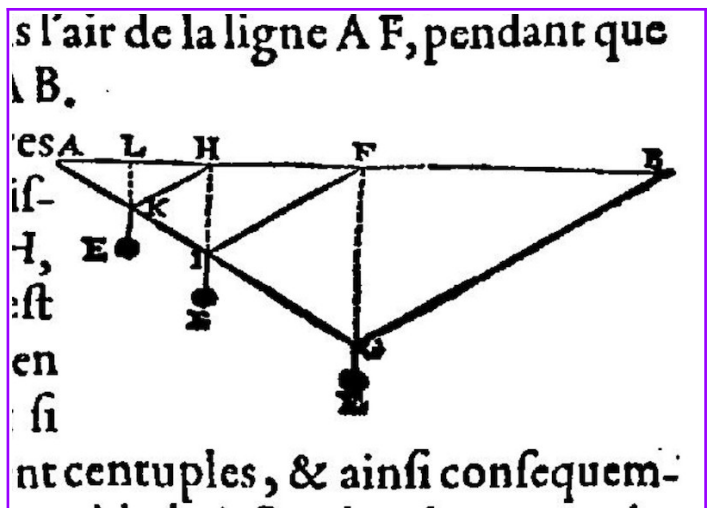
**La raison du nombre des retours de toutes sortes de cordes est inverse de leur longueur**

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

## Proposition V

**Expliquer la maniere de nombrer tres-aysément tous les tours et retours de chaque corde de Luth, de Viole, d'Epinette, etc. et determiner où finit la subtilité de l'œil et de l'oreille**

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



Je dis premièrement que la corde qui fait ledit ton de *G re sol* [...] bat 168 fois l'air, c'est à dire qu'elle passe 168 fois par son centre, ou par la ligne de direction dans le temps d'une seconde minute, ou qu'elle revient 84 fois vers celuy qui la pousse, ou qui la tire. En

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

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

## En savoir plus

Si cet ouvrage a éveillé votre curiosité et que vous voulez en savoir encore plus, vous pouvez consulter les documents en ligne suivants:

### Résonances des sons dans le corps

#### Sur Internet

- [L'Institut de Formation et de Recherche Européen en Psychophonie Marie-Louise Aucher®](#) (l'IFREPmla) a pour but de poursuivre les recherches de Marie-Louise Aucher, de promouvoir et transmettre la Psychophonie®, et d'en élargir les applications.
- [Chakras et corps subtils](#), A. Boudet

#### Ouvrages sur papier

- *En Corps chanté*, Marie-Louise Aucher, Hommes et groupes éditeurs, 1987
- *L'oreille électronique*, Alfred Tomatis
- *Maitre de ses chakras, maitre de sa vie*, Marie-Lise Labonté, éditions Le Dauphin Blanc, 2005
- *Corps subtil et corps causal*, Tara Michaël, Le Courrier du Livre, 1979
- *Le Yoga*, Mircea Eliade, Payot, 1983

### L'éducation musicale

**Ouvrages**, aux éditions Pro Musica, [www.leseditionspromusica.com](http://www.leseditionspromusica.com)

- *L'oreille musicale*, E. Willems, 2 tomes
- *Les bases psychologiques de la musique*, E. Willems
- *Sur les pas d'Edgar Willems, une vie, une œuvre, un idéal*, Jacques et Béatrice Chapuis-Westphal

**Fédération Internationale Willems:** [fi-willems.org](http://fi-willems.org)

### Gammes et modes

#### Articles en libre accès sur Internet

- [Liste des gammes et des modes](#), Wikipedia, encyclopédie libre et contributive. Je lui dois les images des gammes arabes et leurs fichiers sonores.  
[Musique modale](#), Wikipedia
- **Musique indienne : Râga**, Wikipedia ; [Karnatic Music Primer, a gentle introduction to south indian classical music](#), par Mahadevan Ramesh ; [Introduction to North Indian music](#), by D. Courtney

#### Articles et ouvrages sur papier

- *Gamme*, article dans Encyclopaedia Universalis
- *Inde du Nord*, les traditions musicales, par Alain Daniélou, Buchet/Castel, 1966
- *Diapason*, article dans Encyclopaedia Universalis, par J. Chailley. Jacques Chailley, compositeur, musicien, musicologue, a également beaucoup contribué à l'histoire de la musique et à son analyse. Dans le cadre de cet article, citons son ouvrage *La Musique et le Signe* (Lausanne, Édition Rencontre, 1967). Voir sa biographie dans le site [Musica et Memoria](#)

## Logiciel

Les fragments de **partitions** et les fichiers sonores correspondants ont été réalisées avec **Melody Assistant**, logiciel dédié à l'écriture et l'impression de musique.

## Évolution de l'expression musicale

### Ouvrage sur papier

- *Pour comprendre les musiques d'aujourd'hui*, Henry Barraud. Ed. Le Seuil, 1968. Ouvrage très vivant, admirable, écrit dans un langage simple. Je m'en suis inspiré pour une bonne part dans cet article. "Henry Barraud, dit la présentation, n'est pas seulement un des musiciens incontesté de sa génération. Il est aussi l'auteur de très populaires émissions de l'ORTF [mère de Radio-France], "Regards sur la musique", qui tous les dimanches à 11 heures, initient un public grandissant." Accompagné d'un disque 33T-17cm des cent cinq exemples musicaux. Eh oui, en 1968, ce n'était pas encore les cassettes et encore moins les CD! Mériterait d'être réédité.

### Troubadours, Moyen-Âge et Renaissance

- [Instruments et musiques du Moyen-Âge](#). Site de Christian Brassy, très documenté, hébergé par [apemutam](#). Propose une discographie.
- Dans Wikipedia, [Troubadour](#) ; [Musique de la Renaissance](#) ; [Polyphonie](#)
- [Petite introduction au monde des troubadours](#). Un article spécialisé de Gérard Zuchetto, troubadour contemporain

### Instruments

- [Iconographie de la cornemuse en France](#), Catherine et Jean-Luc Matte
- [Gilles Chabenat](#), vielles à roue contemporaines électroacoustiques

### Autres articles sur Internet

- Dans Wikipedia, [Musique baroque](#) ; [Musique moderne](#) ; [Musique contemporaine](#) ; [Système tonal](#) ; [Musique modale](#)
- [Base de documentation sur la musique contemporaine](#), (IRCAM)
- [Les tempéraments, échelles sonores, micro-intervalles](#), Marc Texier. Explique le sens et l'importance du tempérament et son évolution.

## Physique et perception du son

### Articles accessibles sur Internet

- [Matière et rayonnements, les concepts fondamentaux de la physique](#). Atomes et électrons - Mouvement des corps matériels - Ondes de lumière et ondes sonores - Quel est notre rapport avec le monde physique?
- Articles wikipédia: [Psychoacoustique](#); [Acoustique musicale](#)
- Une vidéo sur le fonctionnement du [Haut-parleur](#)

### Article imprimé

- *Son musical et perception auditive*, Jean-Claude Risset, directeur de recherche au CNRS, au Laboratoire de mécanique et d'acoustique (LMA) à Marseille. Dans "Pour la Science", Novembre 1986.

## Caractéristiques sensorielles du sons

### Autres articles sur Internet

- **Encyclopédie Wikipedia** : [Son](#); [Acoustique musicale](#); [Hauteur \(musique\)](#); [Hertz](#); [Diapason](#); [Note de musique](#); [Échelle des sons](#); [Tessiture](#); [Timbre](#); [Harmonique](#); [Sonagraphe](#)
- [À propos des gammes](#), D. Beaufils et M. Grente, Sur le site de l'INRP, Institut National de Recherche Pédagogique, Lyon, France.
- [À propos d'intensité, de hauteur et de timbre](#), D. Beaufils, Institut National de Recherche Pédagogique
- [Le Chant diphonique Xöömij](#): origine, styles et phonation, Trân Quang Hai (CNRS, France)

### Article imprimé

*Gamme*, article dans Encyclopaedia Universalis

### Logiciels

Les figures qui montrent des portions de **partitions** ont été réalisées avec **Melody Assistant**. "Melody Assistant" est un logiciel dédié à l'écriture et l'impression de musique. Il permet également de restituer la musique écrite et d'enregistrer le fichier sonore correspondant, en format MIDI ou en format audio (MP3, etc.), ce qui a donné une partie de ceux qui sont indiqués dans ce texte. C'est un produit de la société internationale toulousaine Myriad, existant en version française que vous pouvez acquérir pour un prix très modique.

Les enregistrements sonores et créations de sons ont été réalisés avec le logiciel de traitement sonore **Audacity** en version française. *Audacity* est un véritable petit studio de traitement du son. Il permet d'enregistrer, de jouer, d'importer et d'exporter des données en plusieurs formats dont WAV et MP3. C'est un logiciel libre et gratuit, répondant à la licence GNU.

## Les sons créateurs de formes

### Films

- **Film de Hans Jenny, en 3 parties**  
partie 1. Après une introduction en anglais, les images commencent à 2mn 07s: <https://youtu.be/05Io6lop3mk>  
partie 2. Figures des voyelles à 3mn 56s: <https://youtu.be/ahJYUVDY5ek>  
partie 3: <https://youtu.be/I4jUMWFKPTY>
- [Figures de sable](#). Sans paroles, durée 3'51". Saint Mary's University, Halifax, Canada
- [Le tonoscope](#). Description en anglais
- [Le Visage de Mars](#). Conférence de David Percy en 1996, université de Bradford, Angleterre. Traduction en français.

### Articles sur Internet

- Chladni et ses figures: [Wikipédia](#); [Physique de tous les jours](#)
- Kundt: [Physique](#) à l'Université du Michigan, en images; [Tube de Kundt](#), article wikipédia
- Physique du son: articles wikipédia, [Interférométrie laser](#); [Onde stationnaire](#); [Corde vibrante](#)
- Vibrations de la guitare: [Le laser révèle comment la guitare produit du son](#), Guru méditation
- Atelier d'exploration harmonique: [création de disques photosoniques](#). [Article en pdf](#), *Synthèse photosonique: de la géométrie des ondes au disque virtuel*, par Daniel Arfib, Patrick Sanchez et Jacques Dudon, Journées d'Informatique Musicale, 9e édition, Marseille, 29 - 31 mai 2002

## En anglais (et allemand)

- Figures de Chladni: [Mediateletipos](#); Physique à l'[Université de Los Angeles](#); École de physique de Sydney, le dessus d'un [violon](#) et d'une [guitare](#)
- Alexander Lauterwasser: le site d'A. Lauterwasser en allemand, [Wasser Klang Bilder](#)
- Cymatique: [Cymatics](#), le site de Jeff Volk; voir en particulier les [vidéos](#) et le diaporama [Water Slide show](#). [CymaScope](#), le site de John Stuart Reid et Erik Larson; voir en particulier les pages sur l'[histoire de la cymatique](#), les [formes biologiques](#), le [cymascope](#).
- Crop circles: [Is Sound Creating Crop Circles?](#), Freddy Silva
- Géométrie des planètes: [Interplanetary "Day After Tomorrow?"](#)
- Winston Kock: [Wikipedia. A photographic method for displaying sound wave and microwave space patterns](#), by W.E. Kock and F. K. Harvey. Bell System Technical Journal, vol. 30, 1951, p.564-587

### Ouvrage sur papier

- *Images sonores d'eau: La musique créatrice de l'univers*, Alexander Lauterwasser, éd. Médicis, 2005
- *Investigations sur le champ de conscience unitaire*, David Wilcock, éd. Ariane, 2012

## Tempéraments et intonation juste

### Articles en libre accès sur Internet

- [À propos des gammes](#), D. Beaufile et M. Grente, Institut National de Recherche Pédagogique, Lyon, France
- [La fabuleuse histoire des notes de musique](#), site web Easyzic. Un résumé court et clair. (consulté aout 2016)
- [Tempérament et système d'accordage](#), chapitre 6 du [Cours d'organologie de Nicolas Meeus](#). (consulté aout 2016)
- [Musique et tempéraments](#). Dans le site [Orgue à nos logis](#), de Didier Guiraud de Willot. Un exposé très complet sur toutes les sortes de tempéraments. (consulté aout 2016)
- [Le tempérament Cordier, un nouvel accord des pianos](#). Conférence de 1991 [La justesse musicale](#), le [glossaire](#). Conférence de Bourg-en-Bresse, 1996, [Influence de l'inharmonicité sur la rapidité d'intervalles](#). Ouvrage de Serge Cordier, [Piano bien tempéré et justesse orchestrale](#), 1982, Buchet/Chastel (consulté juillet 2017)
- [L'inharmonicité du piano](#), wikipédia
- [La justesse](#), par Aurélien Dolbecq
- [Les tempéraments, échelles sonores, micro-intervalles](#), par Marc Texier. Explique le sens et l'importance du tempérament et son évolution.
- [Intonation juste à la Renaissance](#), par Olivier Bettens. Article fouillé sur Zarlino, mais très technique et spécialisé
- [Le clavier bien obtempéré](#), par Didier Calvet. Outils de visualisation et d'écoute de nombreux tempéraments.
- [Les Vers dorés de Pythagore](#), traduction Fabre d'Olivet
- [Chant chrétien antique occidental](#), par Iégor Reznikoff. On y trouve les articles: [Entrer dans la résonance](#); [Musique grecque, byzantine et traditionnelle](#); [L'intonation juste et l'interprétation de la musique ancienne](#)
- Encyclopédie Wikipédia: [Gammes et tempéraments dans la musique occidentale](#), [Gamme naturelle](#), [Intonation juste](#), [Giuseppe Zarlino](#), [Accord pythagoricien](#), [Pythagore](#), [Harmonie des sphères](#)

- [Pythagorean Tuning and Medieval Polyphony](#), en anglais

### Ouvrages et articles imprimés sur papier

- *Gamme*, article dans Encyclopaedia Universalis
- *L'oreille musicale*, Edgar Willems, Editions Pro Musica
- *Essai sur le rythme*, Matila Ghyka, Gallimard/NRF, 1938
- *Les Grands Initiés*, Édouard Schuré, Pocket. Rama, Krishna, Hermès, Moïse, Orphée, Pythagore, Platon, Jésus
- *Pythagore et les mystères*, Jean Mallinger, Publi-Nord, 1974
- *Le clavier bien obtempéré*, Didier Calvet, piano e forte éditions, 2020. Présentation dans le site web [calameo](#)

## Les aléas du diapason

### Sites internet en français

- [Diapason](#), article de l'Encyclopædia Universalis, Jacques Chailley
- [Le diapason](#), chapitre 7 du [Cours d'Organologie](#) de Nicolas Meeus
- [La question du diapason](#), Muse Baroque, magazine de la musique et des arts baroques, 2010.
- [Le diapason](#), dossier du site papiermusique.fr
- [Le diapason électronique à l'Opéra](#), E. Leipp, M. Castellengo et F. Agostini, réunion du GAM (Groupe d'Acoustique Musicale) n°40 à Paris, 1970
- ["Intonation juste" à la Renaissance: idéal ou utopie?](#) Olivier Bettens
- Sur la solmisation: [Do fixe ou do mobile?: un débat historique](#), Louis Daignault, Recherche en éducation musicale n°31, Faculté de Musique de Laval, Québec, janvier 2014; [SOLMISATION](#), article du Dictionnaire Larousse de la Musique
- Sur la notation: [L'évolution de la notation](#), sur le site de musique classique Symphozik; [La notation musicale](#), dans le site Découvrir la musique médiévale de Louise Forget
- [Les divas et le diapason](#), Nicole Scotto di Carlo, Laboratoire Parole et Langage, CNRS, Marseille, Revue Médecine des arts, 1997, 21
- [De la détermination du ton normal ou du diapason pour l'accord des instruments de musique](#), Aristide Cavallé-Coll, 1859. Texte historique sur "la nécessité d'adopter un diapason normal" et sur les travaux de Henri Scheibler, avec un "tableau comparatif des nombres de vibrations du ton des instruments depuis 1700 jusqu'à nos jours" (1859)
- [La curieuse querelle du diapason; quand les partisans du 432 hertz s'en prennent à la norme internationale de 440 hertz](#), John Stuart Reid, 2016
- [Le La 432 Hz est-il un mythe?](#) Emmanuel Comte
- [Le diapason 528 Hz est-il un mythe?](#) Emmanuel Comte
- [Lorsque le diapason de Verdi donnait le « la »](#), conférence internationale de l'Institut Schiller sur le diapason et la musique classique, 9 avril 1988 à Milan incluant les exposés suivants: *Quand de grands artistes proclament qu'il faut revenir au diapason scientifique de Verdi; Giuseppe Verdi et le diapason scientifique; La lutte pour le diapason scientifique: un historique.*
- DO 256 et LA 432: [Analyse de l'ouvrage de M. Ch. Meerens: Le Diapason et la notation musicale simplifiés](#), par Arthur Heulhard, La Chronique musicale: Revue bimensuelle de l'art ancien et moderne, 1873, vol. 1
- [Révolution industrielle](#), article de l'encyclopédie Larousse

- Encyclopédie Wikipédia: [Acoustique](#); [Diapason](#); [Solmisation](#); [Neume](#); [Révolution industrielle](#); [Rotation de la Terre](#); [Période de rotation](#); [Seconde intercalaire](#)

### Sites internet en anglais

- [A brief history of the establishment of international standard pitch a=440 hertz](#), Lynn Cavanagh
- [Concert Pitch - a Variable Standard](#), 2012
- [Choral and Instrumental Pitch in Church Music 1570-1620](#), Nicholas Mitchell, *The Galpin Society Journal*, 1995, 48, 13-32
- [A Survey of Pitch Standards before the Nineteenth Century](#), Ephraim Segerman, *The Galpin Society Journal*, 2001, 54, 200-218
- Wikipedia: [Concert pitch](#)

### Livres

- *Syntagma Musicum, tome II: De Organographia*, Michael Praetorius, 1619. La traduction anglaise des parties III à V est [disponible en numérique](#)
- *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Hermann von Helmholtz, première édition 1863. Traduction anglaise de Alexander J. Ellis, *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*, 1875
- *A History of Performing Pitch: The Story of "A"*, Bruce Haynes, 2002, The Scarecrow Press. Son analyse dans [Historic Brass Society Journal](#), 2003

## Histoire des fréquences

### Sites internet en français

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

### Sites internet en anglais

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