

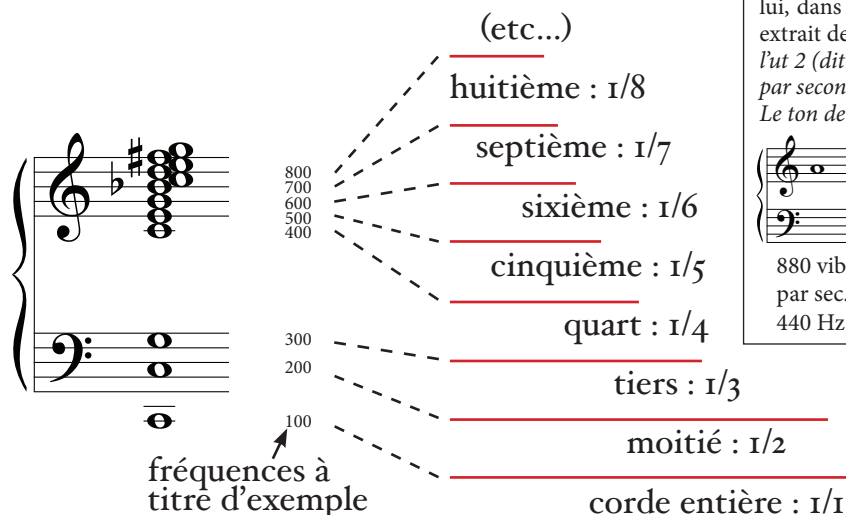
Acoustique - Accord - Tempéraments

Francis Jacob, 2014

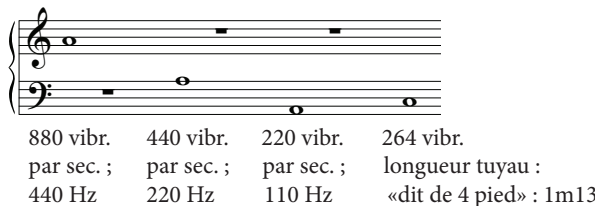
Pour la lecture de ce document : en **bleu** les notions intéressantes à dominer entièrement

1) Les sons - les harmoniques

N'importe quel son se compose d'une fondamentale et d'harmoniques. Les harmoniques, fréquences plus aiguës que la fondamentale, font partie de ce que notre oreille identifie comme le timbre particulier d'un son. **Les harmoniques correspondent aux fractions par nombres entiers successifs de la source sonore fondamentale, et se trouvent à des fréquences (vitesse d'oscillation par seconde) qui sont les multiples de la fréquence du son fondamental par le même nombre entier).**



Cavaillé-Coll, le célèbre facteur d'orgues parisien du 19^e siècle, comptait, lui, dans une unité correspondant au double de la fréquence : voici un extrait de ses nombreux écrits : «Un tuyau de bois à base carrée donnant l'ut 2 (dit de 4 pieds), coupé en ton d'après le LA normal de 880 vibrations par seconde, ayant 0m08 de profondeur intérieure et pour longueur 1m13. Le ton de ce tuyau correspondant à 264 vibrations par seconde.»



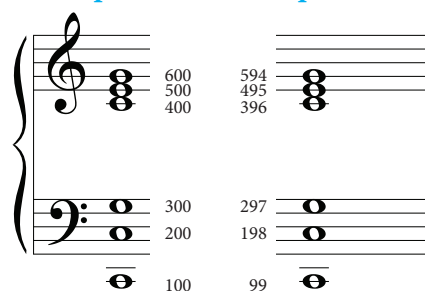
Des chiffres ronds ont été utilisés ici pour les fréquences, pour faciliter l'explication. En diapason la = 440 Hz et en tempérament égal ce do grave sera en réalité à 65,41 Hz. Hz : Hertz : unité de mesure de la fréquence de son.

L'étude des modes vibratoires d'une corde remontée à l'antiquité grecque. Joseph Sauveur (1653-1716) vers 1700 grâce à ses observations et sa compréhension du phénomène et Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) grâce à ses travaux sur le calcul différentiel, ont mis en évidence les ondes sonores. Les travaux de Heinrich Rudolf Hertz (1857 - 1894) ont permis une généralisation à tout mouvement périodique, quelque soit son origine physique et montré que, pour les ondes électromagnétiques, leur transmission à distance ne nécessitait pas de support matériel (une polémique sur l'existence de l'éther a cependant perduré en France jusqu'au début du 20^e siècle). La définition officielle du Hertz comme unité de fréquence du Système International (SI) date de la 11^e Conférence Générale des Poids et Mesures (CGPM) en 1960 (résolution 12) en référence à une décision du BIPM de 1930 qui mettait en place le système MKSA. Avant, ces grandeurs étaient désignées par «cycles par seconde». Cavaillé-Coll comptait autrement :

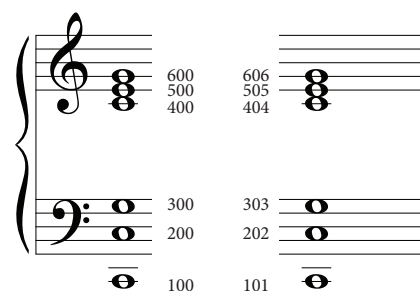
L'unité du Hertz a été choisie en hommage au physicien Heinrich Rudolf Hertz, connu en particulier pour la découverte et ses travaux sur les ondes électromagnétique (qui ouvriront le champs à des inventions comme la radio, le téléphone sans fil, la transmission télévisuelle via une antenne ou une parabole). Il est mort à 37 ans d'un cancer.

2) Qu'est-ce la justesse ?

Nous percevons à travers l'audition ces fréquences, qui sont des oscillations très rapides, et les identifions comme des sons. Concernant la justesse, nous ne sommes pas en mesure de percevoir directement le détail de ces oscillations très rapides, mais nous pouvons avoir par l'audition un sentiment de hauteur, et par ailleurs **nous pouvons percevoir la comparaison de deux oscillations (ce sont les battements). Ces battements correspondent à un désaccord. L'absence de battements est ce qu'on cherche pour deux notes accordées pures l'une sur l'autre.**



Deux exemples :



La note de droite est légèrement plus basse que celle de gauche : 1 Hertz (1 Hz) plus basse. On entend un battement par seconde, quand on joue simultanément les deux notes.

Exemple similaire, la note de droite est cette fois-ci un peu plus haute que celle de gauche


3) Sur un clavier, tous les intervalles ne peuvent pas être justes

Il arrive que le néophyte pense a priori qu'il est possible d'accorder tous les intervalles de façon parfaite, sans battement. Or, cela n'est pas possible. Plusieurs vérifications permettent de mettre en évidence cette impossibilité d'avoir tous les intervalles purs dans le cas d'un instrument à clavier. Nous dirons «pur» dans le cas de deux sons accordés sans battement ; nous réservons le terme «juste» à l'aspect descriptif des intervalles en solfège.

Certains de ces constats permettent de définir des grandeurs utilisées dans les différents tempéraments :

a) Le comma pythagoricien

En partant d'une note (par exemple *do*), et en accordant 12 fois de suite la quinte supérieure (dans la pratique, on se servira aussi des quarts inférieures, ce qui correspond à la même note suivante), on obtient la suite que voici :



Quinte pure, pas de battement

Quarte pure, pas de battement, ce qui revient au même que de considérer que la quinte sol-ré est pure

etc, les quintes ou quarts suivantes sont accordées toutes pures, sans battement

Le *si#* se trouve être plus haut que l'octave pure du *do* de départ. Cette différence est importante, on l'appelle «comma pythagoricien».

L'accord utilisant 11 quintes pures, ainsi que le comma qui apparaît tiennent leur nom du grec Pythagore (580 av. J.-C. - vers 495 av. J.-C.) à qui leur découverte a été attribuée par des textes médiévaux, même si les premiers textes décrivant l'utilisation d'accords similaires remontent aux Babyloniens vers le IV^e millénaire av. J.-C.

Dans l'accord des instruments à claviers, un des principes est d'avoir la pureté (pas de battements) des unissons et des octaves. Toute la question des tempéraments revient à diviser d'une manière ou d'une autre ce comma pythagoricien, de le partager entre une ou plusieurs quintes, de façon à le distribuer, car si on ne procédait pas ainsi, les octaves ne seraient pas pures.

Serge Cordier a travaillé sur un accord du piano en agrandissant les octaves et en gardant toutes les quintes pratiquement pures, mais cela reste une exception. Autre exception : dans les orgues, parfois, certains jeux (zéro, un ou deux par orgue en général) sont accordés volontairement plus haut ou plus bas, pour créer un effet de vibrato, ce sont les Voce Umana de l'orgue italien à partir du 17^e siècle, ou les Voix Célestes ou Unda Maris des orgues à partir du 19^e siècle).

b) Le comma syntonique



Quinte pure, pas de battement

Quarte pure, pas de battement, ce qui revient au même que de considérer que les quintes sol-ré et la-mi sont pures

Imaginons un *mi*, tierce pure par rapport au *do* de départ. Le *mi* obtenu par l'accord des quintes pures (sans battement) *do-sol-ré-la-mi* se trouve être plus haut que le *mi* qui serait la tierce pure par rapport au *do* de départ. Cette différence est importante, on l'appelle «comma syntonique».

Et on appelle tierce pythagoricienne cette tierce obtenue par accord de 4 quintes pures superposées.

4) Histoire des tempéraments

Le constat fait dans le chapitre sur le comma pythagorien : *on ne peut pas avoir à l'intérieur d'une octave pure 12 quintes pures implique de faire un choix pour répartir d'une manière ou d'une autre ce comma pythagorien entre une ou plusieurs quintes, de sorte de pouvoir avoir les octaves pures. Ce sont ces solutions de répartition qu'on appelle tempéraments.*

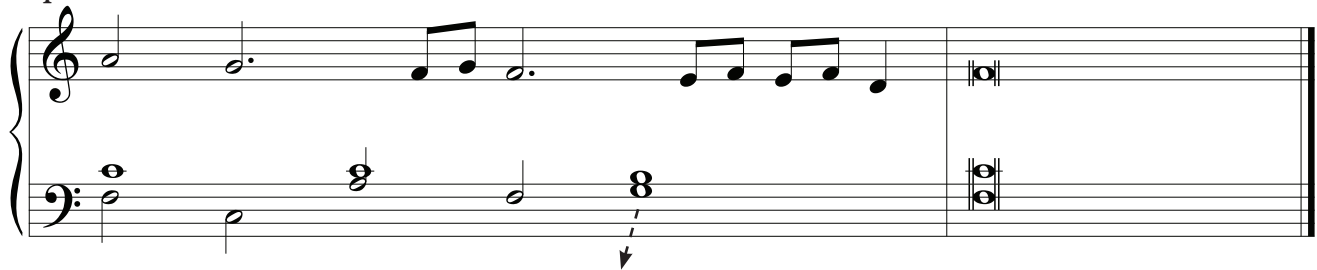
Cette distribution peut être faite sur 4 principes différents qui se sont succédés historiquement de la façon suivante :

a) Antiquité et Moyen-Âge : tempérament pythagorien

11 quintes sont pures (il existe plusieurs versions : la douzième, trop petite d'un comma pythagorien est soit si - fa#, soit mi b - sol#, soit encore ailleurs selon les versions. La tierce majeure et la sixte mineure avaient le statut de dissonances au Moyen-Âge. La quinte, la quarte et l'octave avaient le statut de consonances

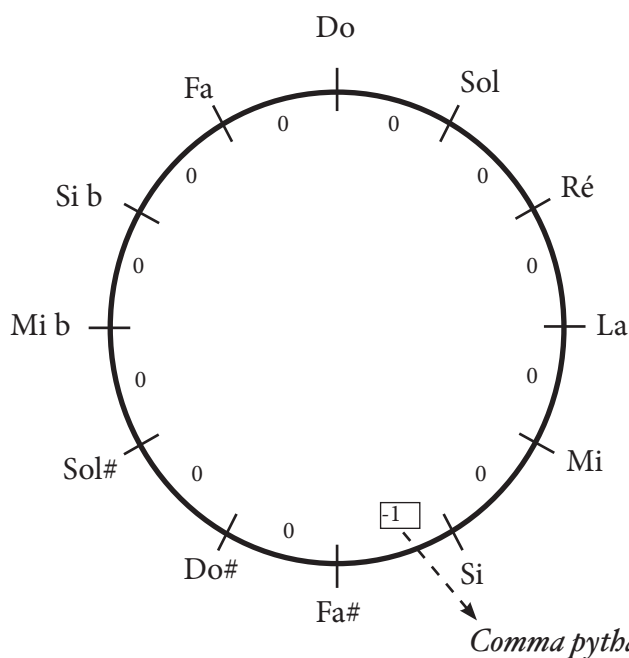
Buxheimer Orgelbuch (vers 1450) «Des klaffers nyt tut mich myden», N° 146, fol. 78b :

Exemple de cadence



Cette tierce majeure, sur l'avant-dernier accord de la pièce est une «tierce pythagoricienne», c'est-à-dire constitué de 4 quintes pures, donc une tierce très grande, pas agréable du tout à l'oreille. Il se crée une tension sur l'avant-dernier accord à cause de cette tierce peu consonante, et aussi un grand effet de contraste et de soulagement quand on passe au dernier accord, dont la quinte pure donne envie de l'écouter longtemps.

Tempérament Pythagorien

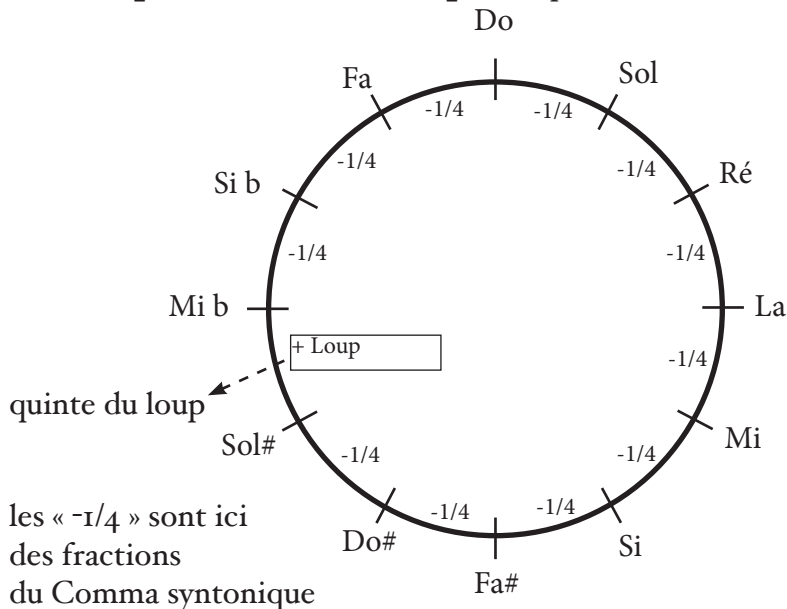


Dans ce tempérament, la couleur harmonique est très caractérisée (sonorité impressionnante et riche des quintes à vide, pures, ou accord : quinte - octave, très fréquents dans ces musiques). La couleur mélodique est aussi très caractérisée : les tons sont grands, car composés de 2 quintes pures (donc plutôt grandes). Les demi-tons mi-fa, si-do, ainsi que de certaines feintes vers la note voisine de nom différent sont petits. Comme dans une mélodie, il y a plus fréquemment des tons que des demi-tons, les mélodies ont assez facilement une couleur «fière» : avec peu de notes, on fait beaucoup de chemin, car les tons sont grands. En tous cas, l'échelle mélodique «sonne inégal» et a du caractère

Henri Arnaut de Zwolle décrit ce tempérament ainsi (place de la «quinte du loup» entre si et fa#). La note SI n'est pas utilisée comme note de départ pour un ton, avant la musique tonale, car aucune note naturelle ne forme une quinte juste avec elle. C'est donc une place logique pour le comma pythagorien, mais d'autres descriptions place ce comma entre si b et fa (Prodescimo de Beldomandi, 1413, qui parle aussi de si-fa#) ; ou sol#- mi b (manuscrit de l'ancienne abbaye de Vaucelle (fin 15^e s.)

b) Renaissance et début 17^e siècle : tempérament mésotonique au quart de comma

Tempérament mésotonique au quart de comma



Dans ce tempérament, la couleur harmonique est très caractérisée (sonorité somptueuse des accords majeurs grâce aux tierces pures). Les quintes sont petites, mais en les jouant avec une tierce, elles sont moins gênantes que toutes seules. On a fréquemment la sensation, quand on rajoute la tierce à la quinte qu'on vient de jouer toute seule, que la vitesse de battements de la quinte diminue de moitié. La tierce est petite, la quinte aussi, les accords ont une grande richesse, et aussi une certaine intimité. La couleur mélodique est aussi très caractérisée : les tons sont petits, car composés de 2 quintes petites. Les demi-tons mi-fa, si-do, ainsi que de certaines feintes vers la note voisine de nom différent sont grands. Comme dans une mélodie, il y a plus fréquemment des tons que des demi-tons, les mélodies ont assez facilement une couleur intime : les mélodies sont belles, et semblent ne pas demander un grand effort, on atteint facilement des intervalles qui s'éloignent. En tous cas, l'échelle mélodique «sonne inégal» et a du caractère.

Michel Chapuis en a dit «Prenez un organiste du 17^e siècle d'un niveau limité : quand il jouait une simple cadence parfaite sur un orgue accordé en mésotonique, c'était beau». Effectivement, par après, on peut se demander si le phénomène de complexification de la musique et d'accélération du tempo ne sont pas liés en partie à cette qualité très consonante de laquelle on s'éloigne progressivement, en quittant, dans l'histoire de la facture instrumentale, le tempérament mésotonique pour aller vers le tempérament égal. Et progressivement, les musiques élaborées (répertoire du piano par exemple) comportent, ou ont besoin de plus en plus de notes...

Ce tempérament est fait de telle sorte qu'il permette d'obtenir un maximum de tierces majeures pures. En accordant 11 quintes diminuées d'un quart de comma syntonique chacune, on obtient 8 cas où on peut avoir dans la suite de quintes 4 quintes diminuées d'un quart de comma chacune. Par contre, pour 4 cas, la quinte du loup est l'une 4 quintes à l'intérieur d'une tierce. Ces quatre tierces seront donc très grandes. On a ainsi dans le mésotonique 8 tierces pures et 4 mauvaises tierces. Cet accord a commencé à poser problème quand les organistes ont voulu jouer les modes grégoriens correspondant au futur do mineur (avec besoin du *la bémol*, exemple : Nicolas de Grigny, livre d'orgue de 1699) et avec l'usage du ton de mi mineur (besoin d'un ré #)

c) Les tempéraments inégaux postérieurs au mésotonique

De nombreux tempéraments ont été pratiqués de la deuxième moitié du 17^e siècle jusqu'au courant du 19^e siècle (même Cavaillé-Coll, le célèbre facteur d'orgues du 19^e siècle parisien accordait ses orgues avec un tempérament légèrement inégal). Le but (et les contraintes) de ces tempéraments est de favoriser certaines tierces majeures par rapport à d'autres, tout en évitant de rendre trop problématiques les tonalités sacrifiées au profit des plus favorisées.

Un tempérament est un compromis, qui tient compte du fait :

- que tout ne peut pas être juste
- que ce qu'on donne à l'un, il faut le prendre à un (ou à plusieurs) autre(s).

Parmi les différents tempéraments baroques, on peut dégager deux principes :

- les mésotoniques modifiés :

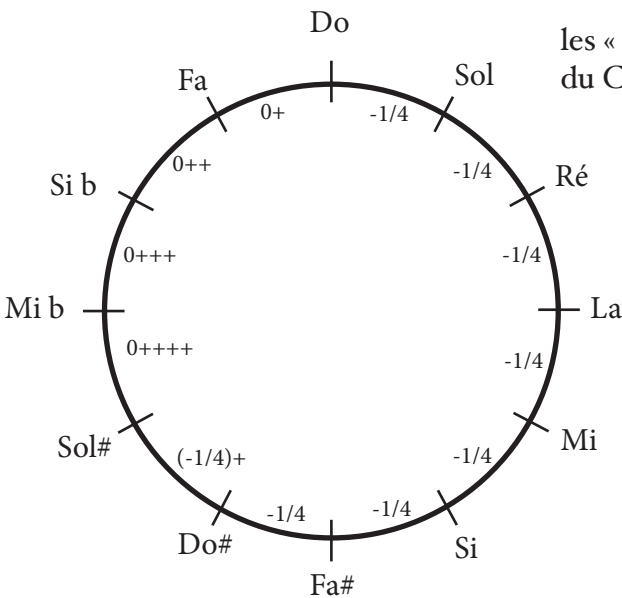
UN MAXIMUM DE QUALITÉS (MAIS MALHEUREUSEMENT DES DÉFAUTS)

Les tempéraments français sont souvent sur ce principe : on essaie de garder un maximum de tierces pures (3, 4 ou 5, par exemple), mais en divisant quand même le loup, de sorte de ne pas avoir d'impossibilité complète sur une seule quinte, et de sorte de rendre le moins problématique possible les tierces moins souvent utilisées (mais qui resteront très tendues, difficiles).

- les tempéraments progressifs : DES QUALITÉS (UNE OU PLUSIEURS TIERCE PLUS OU MOINS PROCHE DE LA TIERCE PURE ET DES DÉFAUTS RÉDUITS, DANS LA MESURE DU POSSIBLE). Les tempérament allemands sont plutôt de cette famille, ainsi que les très fréquemment utilisés Tartini-Valotti, et Young.

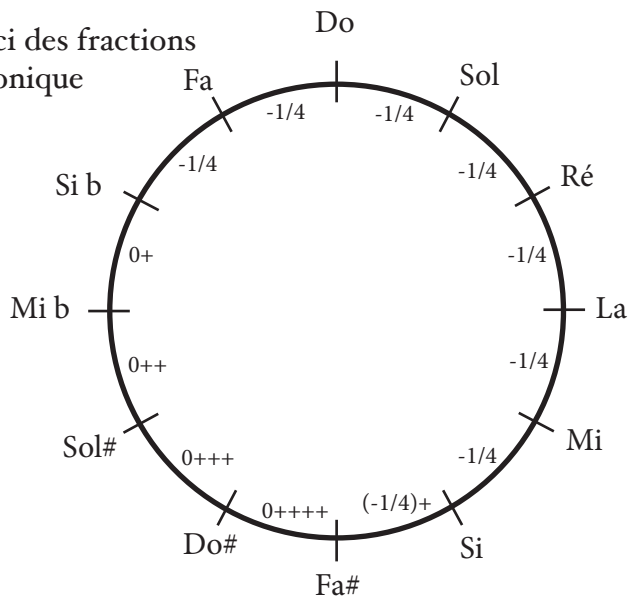
La définition du comma pythagorien implique que le total des fractions des 12 quintes notées sur ces cercles doit toujours être égal à -1 . Si ce n'était pas le cas, cela voudrait dire que le tempérament noté serait une aberration, qu'il n'est pas réalisable.

Tempérament Rameau en do (1726)
pour avantager les tonalités avec dièses



- 4 tierces pures : do-mi ; sol-si ; ré-fa# ; la-do#
- tonalités majeures possibles (ainsi que leurs relatives mineures) : fa, do, sol, ré, la, mi, si et fa# ; plus il y a de dièses, plus les sonorités se durcissent.

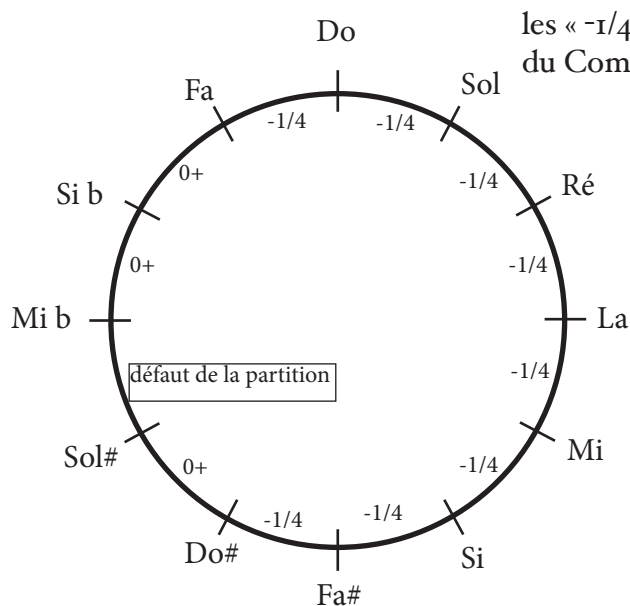
Tempérament Rameau en si bémol (1726)
pour avantager les tonalités avec bémols



- 4 tierces pures : si b-ré ; fa-la ; do-mi ; sol-si
- mi b majeur et la b majeur sont utilisables

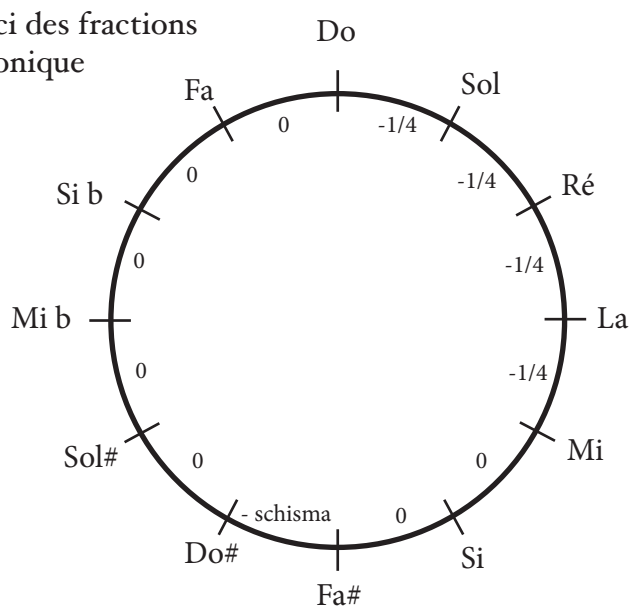
les « $-1/4$ » sont ici des fractions du Comma syntonique

Tempérament Corette (1753)



- 5 tierces pures

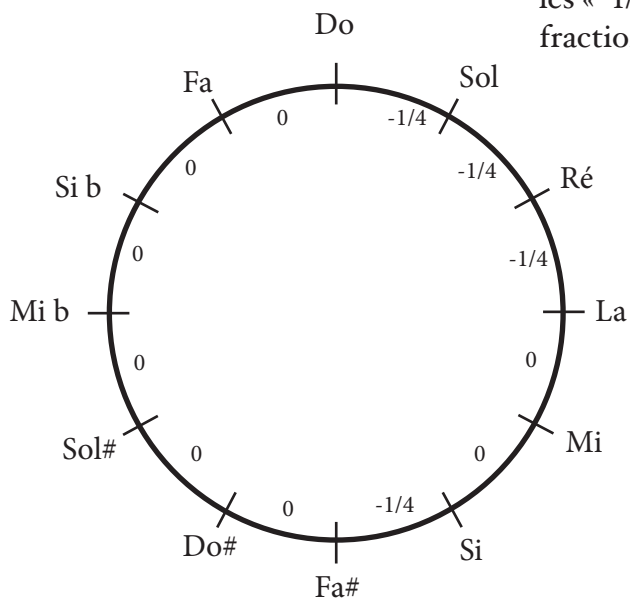
Tempérament Kirnberger III (1779)



- 1 tierce pure
- 2 tierces semblables au tempérament égal
- 3 tierces presque pythagoriciennes
- 2 tierces pythagoriciennes
- les autres tierces évoluent progressivement entre les extrêmes

les « $-1/4$ » sont ici des fractions du Comma syntonique

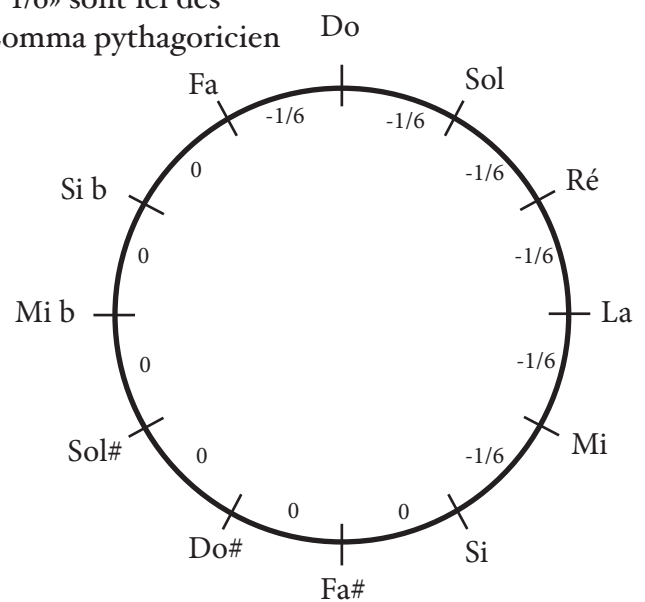
Tempérament Werckmeister III (1691)



- do mi et fa-la meilleures tierces, mais un peu plus grandes que pures
- 3 tierces majeures pythagoriciennes
- les autres tierces évoluent progressivement entre ces extrêmes

Tartini-Valotti (milieu 18^e siècle)

les « $-1/4$ » ou « $-1/6$ » sont ici des fractions du Comma pythagorien

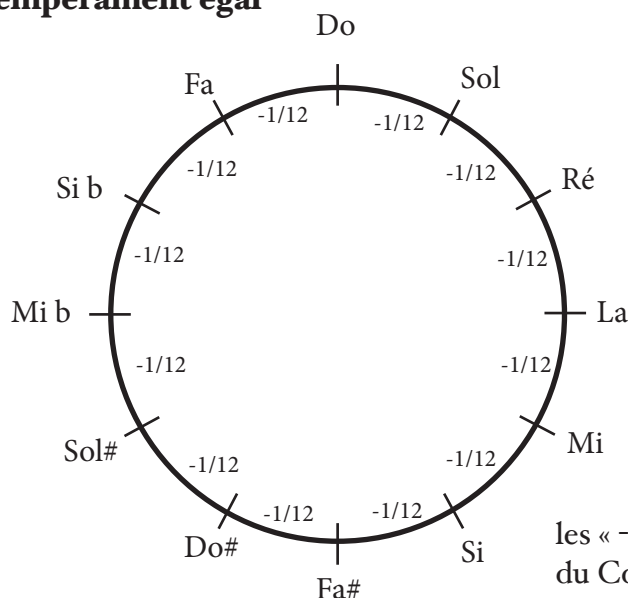


- 3 bonnes tierces, qui battent, mais calmement : fa-la, do-mi, sol-si
- 3 tierces majeures pythagoriciennes
- les autres tierces évoluent progressivement entre ces extrêmes, transitions douces, pas de contraste marqué
- il se trouve que mi b-sol et la-do# sont de la même qualité que dans le tempérament égal (dans un cas, la tierce est constituée de $1/6 + 1/6 + 0 + 0 = 2/6 = 1/3$; pour le tempérament égal : $4 \times 1/12 = 4/12 = 1/3$)

d) Le tempérament égal

Le tempérament égal (étudié depuis très longtemps — en Chine en 1595 ; Mersenne et Praetorius mentionnent le tempérament égal au 17^e siècle — et adopté pour beaucoup de musiques à partir du 19^e siècle) a pour principe de répartir de façon égale tous les intervalles, sans privilégier certains par rapport à d'autres). Malheureusement, les tierces majeures qui en résultent sont assez grandes, pas très consonantes.

Tempérament égal



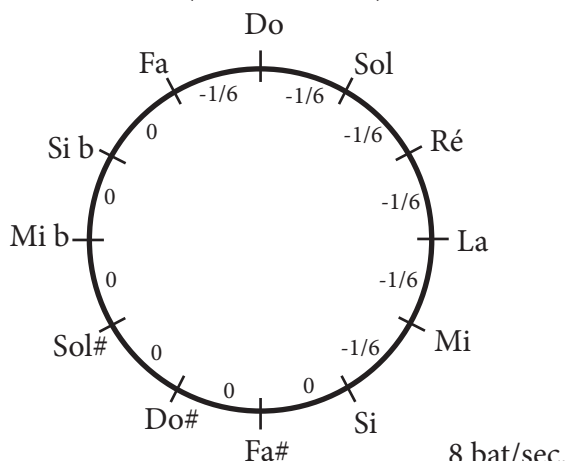
Dans ce tempérament, tous les intervalles sont égaux : les quintes, les tierces mineures ou majeures, les tons, les demi-tons, les sixtes, les septièmes...

les « $-1/12$ » sont ici des fractions du Comma pythagorien

5) Comparaison des battements des quartes et des quintes (quand elles sont censées battre)

Quand un intervalle, par exemple une quinte do-sol, est censée battre dans un tempérament donné, la vitesse des battements ne sera pas la même pour le do-sol dans différentes octaves : d'une octave à l'autre, la vitesse des battements double.

Tartini-Valotti (milieu 18^e siècle) : Chiffres réels avec la=415 Hz



sol : 92,64 Hz	sol : 370,56
do : 61,90 Hz	do : 247,60 Hz
3 ^e harmonique de ce do (=sol) : 92,85 Hz	3 ^e harmonique de ce do (=sol) : 1,68 bat/sec.
	371,40 Hz

0,84 bat/sec.

0,21 bat/sec.	sol : 185,28	sol : 741,12
	do : 123,80 Hz	do : 495,20 Hz
	3 ^e harmonique de ce do (=sol) : 185,70 Hz	3 ^e harmonique de ce do (=sol) : 742,79 Hz

8 bat/sec. 1196 Hz, 800 Hz
4 bat/sec. 598 Hz, 400 Hz
2 bat/sec. 299 Hz, 200 Hz
1 bat/sec. 149,5 Hz, 100 Hz

Même chose avec des chiffres ronds, inexacts pour ce tempérament et ce diapason, mais utiles pour une lecture facile dans le but de la compréhension

1 bat./sec, 2 bat./sec, 2 bat./sec

- a) une quinte au-dessus d'une quarte bat à la même vitesse que cette quarte
- b) une quarte au-dessus d'une quinte bat deux fois plus vite que cette quinte

DÉMONSTRATION DE CES DEUX RÉALITÉS

les battements s'entendent à la hauteur du premier harmonique commun à deux notes jouées en même temps, c'est-à-dire à la première hauteur où il y a quelque chose de comparable à entendre

- c) une quarte à côté d'une quinte prenons le cas du tempérament égal :

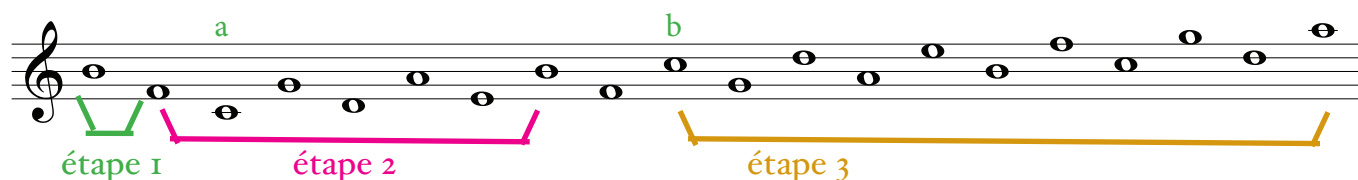
Si : 2 bat./sec. à peine plus de 2 bat./sec. environ 3 bat. à peine moins de 4 bat./sec.

si le do-sol grave bat avec 2 battements par seconde, le do-sol aigu bat avec 4 battements par seconde.

La vitesse des battements augmente progressivement demi-ton par demi-ton. Le fa#-do#, à mi-chemin entre les deux, bat environ 3 battements par seconde. La progression des battements n'est pas proportionnelle, mais logarithmique. C'est donc un chiffre voisin, mais légèrement différent de ce mi-chemin approximatif de 3 battements. Mais c'est une bonne approximation. Sol-ré est juste à côté de fa#-do#. L'ordre de grandeur de 3 battements pour sol-ré est encore une bonne approximation.

Dans les tempéraments avec plusieurs quintes successives de même qualité, le rapport de 3 pour 2 entre une quinte et une quarte voisines est valable comme objectif pour réaliser l'accord.

6) Exemple de vérification de quartes et de quintes dans un tempérament : Valotti



- dans cet exemple, on fera la partition entre les notes a et b. C'est une zone un peu aiguë, pas facile à entendre pour les quartes notamment, mais si les intervalles sont bien tempérés à cette hauteur, il y aura moins de risques de reporter (et donc d'amplifier de petites erreurs) par rapport à une partition faite plus bas.

- **étape 1** : après avoir accordé pures les 6 quintes de la partition entre si et fa, on obtient ces limites, qu'on ne modifiera pas

- **étape 2** : on tempère les quintes entre fa et si : les quartes doivent battre plus vite que les quintes, et la série de quintes do-sol, ré-la, mi-si doit légèrement accélérer (en tous cas, ne pas être irrégulières ni ralentir). Idem pour la série des quartes : do-fa, ré-sol, mi-la doivent légèrement accélérer l'une par rapport à l'autre (en tous cas, ne pas être irrégulières ni ralentir)

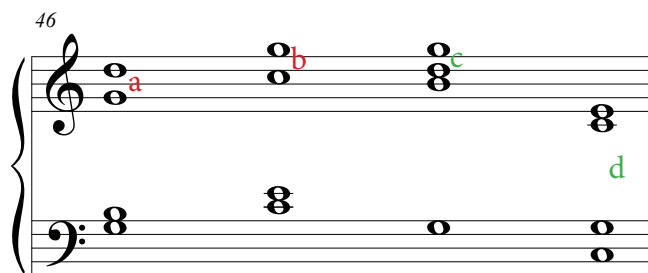
- **étape 3** : le moment venu (on préfère accorder le grave du clavecin avant l'aigu, en général, les graves risquant plus de modifier la tension sur la table) on accorde les octaves vers l'aigu : do-do, vérification : fa-do doit battre à la même vitesse que do-fa ; ré-ré : sol-ré doit battre à la même vitesse que ré-sol, etc...

- on pourra à présent vérifier que le rapport quarte-quinte est bon (ou pas) : en effet mi-si (quinte réalisée dans la première étape de la partition) et fa-do (résultat du report vers l'aigu de la quarte en-dessous) sont voisines : elles doivent se ressembler avec une légère accélération fa-do plus rapide que mi-si. On pourra donc écouter la progression d'ensemble do-sol (dans le médium) , ré-la (dans le médium), mi-si, fa-do, sol-ré, la-mi, do-sol, ré-la, qui devra être régulière et sans défauts : là on sera sûrs d'avoir très bien tempéré les quintes, les quartes.

Les défauts éventuels de certains intervalles sont plus exposés dans certains cas :

d'éventuels défauts sur **a** ou **b** (les quintes trop petites, trop battantes) seront dérangeants plus que le même type de défauts sur **c** ou **d**.

Dans tous les cas, un accord sans défaut est préférable, mais on peut vérifier en particulier ces quintes dans l'aigu.



7) Encore quelques conseils pour l'accord du clavecin :

- de nombreux clavecins ont leur peinture abîmée sur la partie supérieure de la caisse, près des claviers. La seule raison en est que un ou des accordeurs appuient leur coude pour accorder. Si on prend l'habitude de **ne pas s'appuyer, on préserve la décoration, et on va plus vite**

- des accordeurs **mettent la clé en contact avec l'une ou l'autre corde** pour vérifier quelle est la bonne cheville. Il existe toujours d'autres moyens simplement visuels, qui permettent d'**éviter** de faire cela : observer quelle rangée de chevilles on est en train d'accorder, et observer si la corde à accorder est à droite ou à gauche du sautereau qu'on voit bouger. C'est un moyen très sûr et sans risque d'abîmer une corde

- la vitesse à laquelle on réussit à accorder un clavecin dépend de la sureté de l'écoute, de l'expérience, mais aussi de la **façon de tenir la clé**. Le mieux pour passer rapidement de la position de pouvoir monter l'accord à celle de pouvoir descendre est d'identifier les 4 points d'appui de la clé, le plus loin possible de l'axe, pour profiter au maximum de l'effet de levier, et d'apprendre la tenue et le passage d'une position à l'autre qui soit une rotation minimale et souple (c'est un geste un peu bizarre, mais qu'il est intéressant d'apprendre pour accorder vite)