A propos d'acoustique musicale : la question des gammes

par Daniel BEAUFILS
INRP-TECNE - 91, rue Gabriel Péri - 92120 Montrouge
et Martine GRENTE
Lycée Joubert - 44150 Ancenis

Le programme de physique de la classe de seconde comporte une partie consacrée aux questions d'acoustique musicale et, dans ce cadre, la question de l'origine des gammes se trouve tout naturellement posée. La comparaison de quelques manuels scolaires montre que ce thème est abordé de façon très variable, qu'il s'agisse du cours ou des exercices dont les objectifs et les prérequis ne sont pas toujours clairs. En formation des maîtres la question est d'autant plus problématique que le savoir initial est souvent lacunaire et que l'accès aux informations n'est pas toujours simple, les ouvrages étant en effet souvent conçus de façon trop «technique». C'est ce dernier aspect qui motive ces quelques pages ; cet article ne se veut donc pas novateur, mais vise à rassembler les connaissances qui nous semblent nécessaires à l'élaboration raisonnée d'un cours ou d'exercices.

1. LA FAUSSE SIMPLICITÉ

La difficulté fondamentale de tout enseignement de science sur ce thème vient de ce que les notes, les accords, le caractère musical, etc., sont tout à la fois le fruit de contraintes physiologiques et techniques, et d'une longue maturation culturelle (les sept notes de la gamme, comme les sept couleurs de l'arc-en-ciel de la culture occidentale). Depuis fort longtemps, les physiciens et les mathématiciens ont cherché à rationaliser les sensations et la production des sons dits musicaux, à expliquer l'origine des consonances, harmonies et autres effets de timbre, à décrire les phénomènes vibratoires par des lois simples. C'est ainsi que l'on parle de gamme naturelle et / ou du physicien et que l'on trouve de grands noms, tel Pythagore, Zarlin dont nous parlerons ci-après, mais également Ohm, Fourier, Helmholtz[1] (bien connus par ailleurs des élèves de lycée). Mais l'évolution est tout à la fois celle des concepts musicaux, des instruments (et de l'oreille !). La question du tempérament apparaît alors au premier plan, puisque bien après le choix de Jean-Sébastien Bach, le sujet reste central pour certains auteurs contemporains : utilisation des douze notes de la gamme chromatique par les dodécaphonistes (citons Schönberg et Webern et la musique sérielle), ou introduction des micro-intervalles par des compositeurs tels que Hindemith, Xénakis, ou Boulez. Plus généralement, ces questions font toujours l'objet de recherches musicales, fondamentales et techniques, au sein de différents groupes tels que l'IRCAM ou le GRM de l'INA : définition et reconnaissance des timbres, analyse et synthèse numérique de sons (dont la voix), modélisation des instruments, création d'instruments nouveaux (instruments quart de ton, instruments interfacés pour un jeu assisté par ordinateur).

Nous tenterons ici de nous situer dans la zone délicate où les points de vue physico-mathématiques sont ni trop complexes pour être accessibles ni trop simplistes pour rester valides. Nous suivrons un chemin semi-historique des différentes *«théories musicales»* visant à clarifier la question de *la génération de la gamme* : partant d'une idée simple de la consonance, nous introduirons le principe de la génération de la gamme diatonique «naturelle», puis nous introduirons le tempérament égal classique et enfin les tempéraments «modernes». Ceci étant, il faudra garder à l'esprit que les éléments de description quantitative (et quelque peu numérologique) donnés dans la suite ne résument pas le domaine de l'acoustique musicale où les aspects perceptifs et strictement musicaux sont évidemment essentiels, mais hors de notre modeste propos.

2. LA QUESTION DE LA GÉNÉRATION DE LA GAMME DITE NATURELLE

Le point de départ que nous prendrons ici est l'interprétation de la consonance harmonique de deux sons par le «taux de recouvrement» des harmoniques des deux spectres (théorie de Helmholtz[2]).

Un son naturel est dans la majorité des cas constitué d'une fréquence de base dite fondamentale (f_1) et d'une série de composantes «harmoniques» de fréquences $2f_1$, $3f_1$, etc. Ceci est le cas pour les notes musicales générées par les instruments «classiques» qui mettent en jeu des phénomènes vibratoires (cordes, colonnes d'air)[3]. Lorsque deux sons sont tels que l'une des fréquences fondamentales est double de l'autre, les harmoniques du son le plus haut coïncident exactement avec les harmoniques paires du son plus grave, et les «traits communs» sont alors les plus nombreux (voir figure ci-dessous). De tels sons ont alors une propriété de consonance[4] telle qu'ils ont été considérés comme deux «formes» d'une même «note» (le mot «note» étant pris ici en référence à la dénomination), et l'on considère que l'une est la transposée à l'*octave* (ainsi définie) de l'autre.

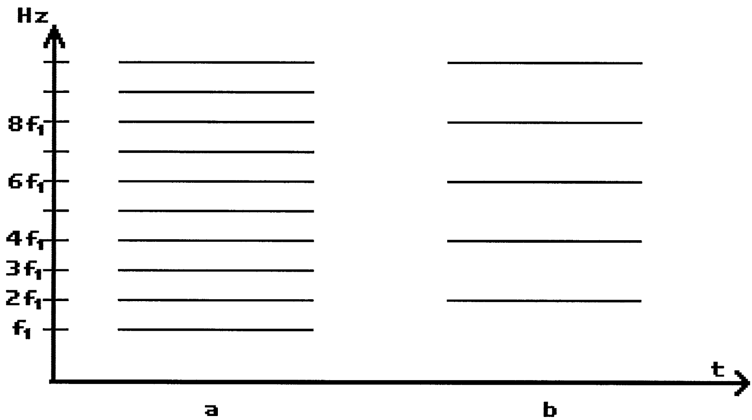

Figure 1 : Composantes fréquentielles de deux sons à l'octave.

Au contraire, le degré de parenté diminue lorsque le rapport numérique entre les fréquences fondamentales des deux sons devient plus complexe et, corrélativement, la sensation de présence de deux notes distinctes devient plus forte. C'est en particulier le cas des sons dont les fréquences fondamentales seraient $3f_1$, $5f_1$, etc., qui tout en restant dans une certaine consonance, diffèrent suffisamment pour être considérés comme des notes musicales différentes. Ce sont précisément ces fréquences qui sont utilisées comme «définition» des notes dans la gamme de Zarlin (ou d'Aristoxène). En pratique, les harmoniques 7, 11, 13, etc. et leurs multiples sont en effet réputées fausses et l'on fait référence (plus ou moins explicitement) au système de Rameau dit «génération harmonique»[5] ou «génération par accord parfait majeur» fondé sur la seule exploitation des harmoniques 3 et 5. C'est ce que nous présentons ci-dessous.

Notons auparavant que cette définition ainsi liée à la perception acoustique conduit à introduire une échelle dont l'unité est le savart, unité qui correspond au pouvoir séparateur de l'oreille, c'est-à-dire au plus petit intervalle perceptible dans les meilleures conditions ; si Is est la valeur en savart de l'intervalle entre deux sons dont les fréquences fondamentales sont f1 et f2, on a :

$$Is = 1000.\log(I) \quad \text{avec} \quad I = f2/f1$$

Ainsi, par exemple, l'octave vaut 301 savarts (valeur arrondie à l'unité, conformément à la remarque ci-dessus). Cette échelle logarithmique qui permet la comparaison des intervalles et leur addition sera utilisée dans la suite.

2.1. **Intervalles consonants**

Reprenons la comparaison des notes par le recouvrement des harmoniques et considérons une note de base, dite *tonique*, de fréquence fondamentale f_1 (notée C ici). Considérons alors les cinq notes dont les fréquences fondamentales sont égales aux fréquences des premières harmoniques de cette note de base. La première, de fréquence $2f_1$ est, comme nous l'avons dit plus haut, la transposée à l'octave (notée C' ici) et, de même, celle de fréquence $4f_1$ est alors la transposée à l'octave de C' (notée C''). La fréquence $3f_1$ peut être considérée comme la fondamentale d'une note de hauteur intermédiaire entre C' et C'' (notée G' ici), et la fréquence $5f_1$ comme la fondamentale d'une note comprise entre C'' et G'' (notée E'').

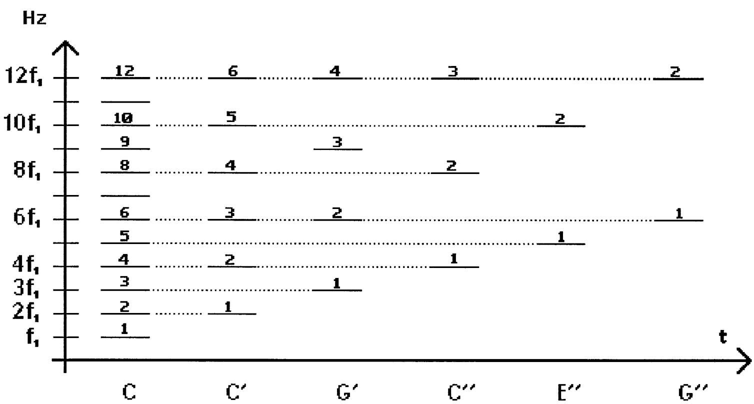

Figure 2 : «Sonagramme» des cinq notes obtenues à partir des harmoniques de la première.

C'est à partir de ces six notes qu'apparaissent les cinq intervalles les plus consonants : d'une part l'octave juste (C-C' ou C'-C'', rapport de fréquences fondamentales égal à 2/1) et la *quinte juste* (C'-G', rapport représentatif 3/2) pour lesquels la consonance est jugée «parfaite» ; d'autre part la quarte juste (G'-C'', rapport représentatif 4/3), la *tierce majeur* (C''-E', rapport 5/4) et la tierce mineure (E''-G'', rapport 6/5) jugés moins consonants.

Valeurs en rapport de fréquence et en savarts des intervalles consonants :

Octave	Quinte	Quarte	Tierce majeure	Tierce mineure
2/1	3/2	4/3	5/4	6/5
301	176	125	97	79

2.2. La génération de «l'accord parfait majeur»

La note G' de fréquence $3f_1$ peut être transposée à l'octave inférieure et sa fréquence, alors «ramenée à l'octave», prend pour valeur $3f_1/2$ (note G). De même, la note E'' de fréquence $5f_1$ peut-elle être ramenée à l'octave de base, sa fréquence prenant alors pour valeur $5f_1/4$ (note E). Cet ensemble de trois notes (C, E, G) en rapport de fréquences de quinte juste et de tierce majeure forment ce qu'on appelle l'*accord parfait majeur*[6] et sont alors dénommées respectivement : tonique, *médiante, dominante*.

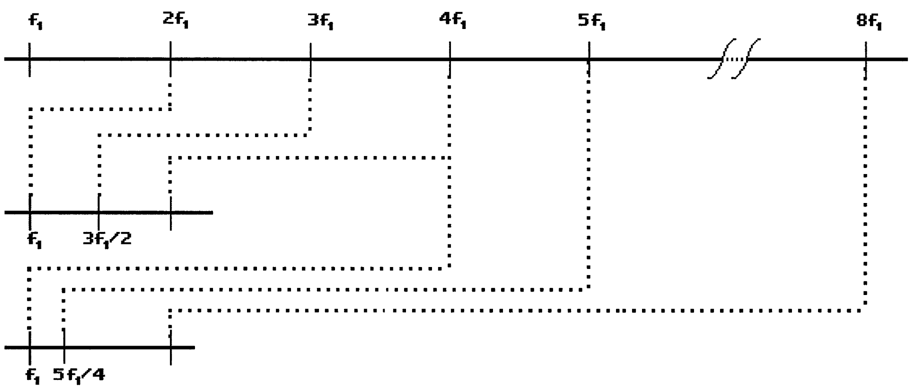

Figure 3 : Harmoniques «ramenées à l'octave de référence».

2.3. La génération de la gamme dite diatonique majeure

Dès lors, le reste de la gamme dite *diatonique majeure* se constitue de la façon suivante. La note supérieure de l'accord ainsi constitué peut être considérée comme la note de base d'un accord parfait majeur suivant : on construit donc les notes de fréquence fondamentale $15f_1/8$ $(5/4 * 3f_1/2)$ et $9f_1/8$ $(3/2 * 3f_1/2$ ramené à l'octave de référence $(9f_1/4 > 2f_1))$. Inversement, la note de fréquence fondamentale f_1 peut être considérée comme la note supérieure d'un nouvel accord parfait majeur. Ainsi, peut-on créer les notes de fréquence $4f_1/3$ ($2f_1/3$ ramené à l'octave supérieure $(2/3 < 1)$) et $5f_1/3$ ($10f_1/12$ ramené à l'octave $(10/12 < 1)$). Voir figure 4.

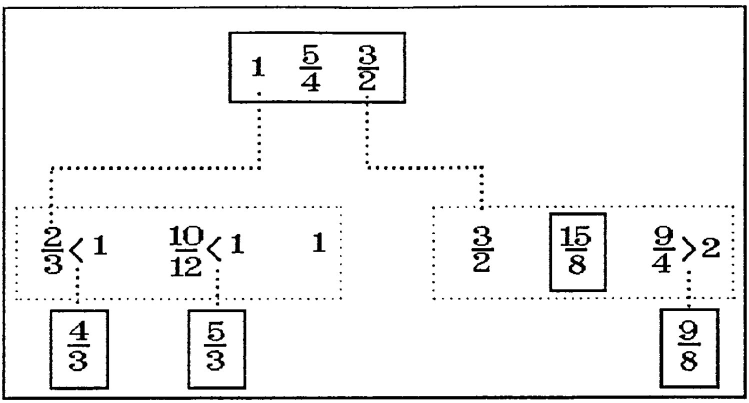

Figure 4 : Synoptique de la construction des rapports des fréquences de la gamme diatonique.

La succession des notes ainsi engendrées constitue la gamme communément appelée gamme diatonique majeure de Zarlin ou d'Aristoxène. Mis dans l'ordre croissant, et en prenant do comme note de base, nous obtenons la suite :

Notes	do	ré	mi	fa	sol	la	si	do
Fréquences	f_1	$9f_1/8$	$5f_1/4$	$4f_1/3$	$3f_1/2$	$5f_1/3$	$15f_1/8$	$2f_1$
Rapports à f_1	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2

La gamme ainsi constituée peut être représentée sur des portées, qui permettent d'identifier symboliquement les différents degrés (sans indication explicite des intervalles). Si l'on choisit le do2 comme note génératrice, les cinq notes construites sur ses harmoniques sont :

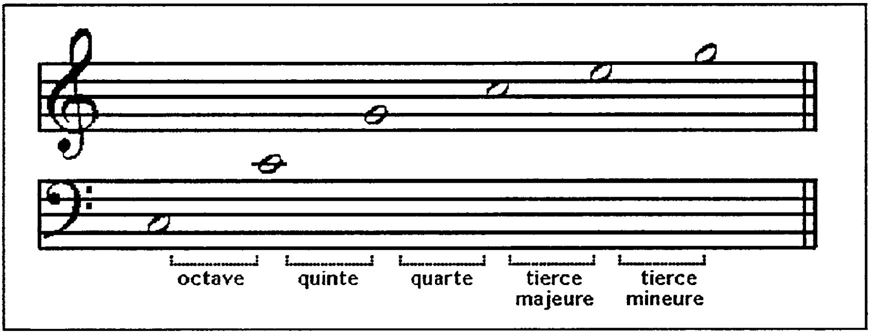

Figure 5

Et la gamme engendrée par les trois accords parfaits majeurs peut se représenter par :

Figure 6

2.4. Tons et demi-tons, intervalles majeurs et mineurs, altérations

Dès lors, si l'on calcule les rapports représentatifs des intervalles entre sons voisins $\left(f_{n+1}/f_n\right)$, on obtient la suite des valeurs suivantes :

Rapport	9/8	10/9	16/15	9/8	10/9	9/8	16/15
Savarts	51	46	28	51	46	51	28

Cette liste fait apparaître trois intervalles, appelés : *ton majeur* (9/8), *ton mineur* (10/9) et *demi-ton majeur* (16/15) (cette dénomination pourrait surprendre en regard des valeurs des fractions, mais il ne faut pas oublier que l'impression acoustique est logarithmique et que ce sont les valeurs en savarts qu'il faut considérer). Pour préciser sur un exemple s'appuyant sur la gamme telle que nous l'avons écrite ci-dessus, un ton majeur est l'intervalle qui sépare le do du ré, un ton mineur celui qui sépare le ré du mi, un demi-ton majeur (dit *diatonique*) celui qui sépare le mi et le fa.

Si l'on reprend les différentes définitions des intervalles introduits jusqu'à présent, on peut dire que l'accord parfait majeur est constitué d'une tierce majeure suivie d'une tierce mineure. La succession inverse (tierce mineure suivie d'une tierce majeure) est également identifiée comme un accord, appelé *accord parfait mineur*. On voit alors que la transformation d'un accord parfait majeur tel que do-mi-sol en un accord parfait mineur nécessite d'abaisser la hauteur du mi ; la nouvelle note ainsi créée, appelée mi bémol (mi*b*), possède donc une fréquence fondamentale de $6f_1/5$. L'intervalle entre mi*b* et mi est caractérisé par un rapport de fréquence égal à $(5/4)/(6/5) = 25/24$[7], soit une différence de dix-huit savarts, c'est-à-dire une valeur inférieure au demi-ton majeur. A l'ensemble ton majeur, ton mineur et demi-ton majeur, a donc été ajouté le *demi-ton mineur* (dit également *chromatique*) de rapport caractéristique égal à 25/24.

L'introduction de ce demi-ton correspond donc à l'introduction des altérations : on «bémolise» en diminuant d'un demi-ton chromatique, donc en divisant le rapport représentatif par 25/24 ; inversement, on dièse une note en augmentant d'un demi-ton chromatique, donc en multipliant son rapport représentatif par 25/24. En conséquence, dans la gamme dite naturelle, il existe entre do et ré deux degrés intermédiaires : do# et le ré*b* (le second légèrement plus aigu que le premier) !

2.5. **Les problèmes de transposition et de modulation**

Changer l'ensemble des notes d'une œuvre en respectant les intervalles, c'est-à-dire transposer, revient à multiplier toutes les fréquences par un même nombre, soit encore, à changer de tonalité (la modulation étant le changement de tonalité à l'intérieur d'un même morceau). Ainsi, pour construire une gamme diatonique majeure dont la tonique est sol, il suffit en principe de multiplier les fréquences fondamentales correspondant à chacun des degrés de la gamme de do majeur par 3/2. Mais en procédant ainsi avec la gamme de Zarlin, on est conduit à introduire des sons nouveaux et donc à appeler du même nom des sons légèrement différents[8]... Cette «incompatibilité mathématique» entre les exigences de consonance et celles de transposition a conduit à faire consentir des «compromis» (moins de consonances parfaites mais de plus grandes possibilités de modulation et de transpositions) et donc à tempérer certains intervalles[9]. De nombreux systèmes ont été proposés, désignés sous le nom de «tempéraments inégaux» aux XVII et XVIII^{e} siècles. Il est évidemment hors de notre propos d'entrer dans quelque détail à ce sujet, mais il convient de noter ici que, *contrairement à ce qui est écrit dans de nombreux ouvrages, la gamme bien tempérée immortalisée par J.-S. Bach repose sur un des systèmes proposés par Werckmeister dès 1691, systèmes qui ne sont pas de tempérament égal ! Le Clavier bien tempéré*[10], n'a très probablement pas été écrit pour être joué dans un tempérament égal, mais bien dans un tempérament de «consonance générale d'un grand calme et d'une grande douceur»[11].

3. LE TEMPÉRAMENT ÉGAL

3.1. La gamme à douze intervalles

Dans un système dit à tempérament égal, l'octave garde sa définition initiale, mais est divisée en douze demi-tons identiques ; dès lors le rapport n'est plus une fraction simple, mais égale à $\sqrt[12]{2}$ et le ton et le demi-ton ont chacun une unique valeur : $t = \sqrt[12]{2}$ (vingt-cinq savarts) pour le demi-ton, et $T = \sqrt[6]{2}$ (cinquante savarts) pour le ton. La succession des intervalles entre notes conjointes se conserve dans toutes les tonalités majeures, soit, à partir de la tonique : T T t T T T t. Ainsi, pour la gamme de do majeur, les valeurs relatives des fréquences sont-elles faciles à déterminer :

do	ré	mi	fa	sol	la	si
f_1	$2^{1/6}f_1$	$2^{1/3}f_1$	$2^{5/12}f_1$	$2^{7/12}f_1$	$2^{3/4}f_1$	$2^{11/12}f_1$

Il suffit alors de compléter l'ensemble de ces sept notes par les cinq autres venant scinder les tons en demi-tons, pour rendre possibles tous les changements de tonalité sans modification du tempérament ; leurs fréquences fondamentales sont évidemment : $2^{1/12}f_1$, $2^{1/4}f_1$, $2^{1/2}f_1$, $2^{2/3}f_1$ et $2^{5/6}f_1$. Notons que dans ce système, la note comprise entre do et ré, par exemple, peut être considérée comme un do# ou un ré*b* ; cette gamme possède donc par construction des notes de noms différents mais de même fréquence fondamentale : cette situation particulière a d'ailleurs reçu un nom : *l'enharmonie*.

C'est cette gamme qui est, en principe, à la base des instruments à sons fixes, notamment le piano : on reconnaît facilement les octaves et les touches noires qui servent aussi bien à jouer des notes bémolisées ou dièsées. La réserve faite ci-dessus par l'expression «en principe» fait référence à la délicate opération d'accordage du piano, accordage qui se fait évidemment à l'oreille[12].

On peut ici résumer en effectuant quelques comparaisons des valeurs des différents intervalles ainsi introduits :

Intervalle	**Définition**	**Valeur en savart**
1/2 ton chromatique	25/24	17.7
1/2 ton temp^t. égal	$\sqrt[12]{2}$	25.1
1/2 ton diatonique	16/15	28.0
Ton mineur	10/9	45.8
Ton temp^t. égal	$\sqrt[6]{2}$	50.2
Ton majeur	9/8	51.1
Tierce majeure Zarlin	5/4	96.9
Tierce majeure temp^t. égal	$\sqrt[3]{2}$	100.3
Quinte temp^t. égal	$(\sqrt[12]{2})^7$	175.6
Quinte juste (Zarlin)	3/2	176.1
Octave	2	301.0

Nous avons indiqué que cette gamme ne pouvait plus posséder la «perfection harmonique» de la gamme naturelle. Dans le tableau ci-après, nous avons repris les valeurs en savart des quintes, quartes, tierces majeure et mineure des deux gammes ; un intervalle de un savart étant la limite de perception de l'oreille, on voit donc que ce sont surtout les tierces ainsi tempérées qui s'écartent de la consonance parfaite.

Intervalle	**Gamme temp^t. égal**		**Gamme naturelle**		**Écart (savart)**
	Rapport	**Savart**	**Rapport**	**Savart**	
Quinte juste	$2^{7/12}$	157,6	3/2	176,1	0,6
Quarte juste	$2^{5/12}$	125,4	4/3	124,9	0,5
Tierce majeure	$2^{1/3}$	100,3	5/4	96,7	3,6
Tierce mineure	$2^{1/4}$	75,3	6/5	79,2	3,9

Dans tout ce qui précède, aucune valeur numérique en hertz n'a été donnée, puisque seuls les rapports de fréquence permettent de reconnaître et de comparer les intervalles. Il faut donc compléter le système par la spécification d'une fréquence de référence. Actuellement (et postérieurement à l'adoption de la gamme de tempérament égal), la fréquence du la3 a été fixée à 440 Hz[13]. Ainsi, si on considère le do2 choisi en référence dans cette présentation, sa fréquence est-elle de 131 Hz ; il est facile également de construire le tableau suivant des différentes fréquences des notes :

Note	**Fréquence du fondamental en Hz**
Do3	261.6
Ré	293.7
Mi	329.6
Fa	349.2
Sol	392.0
La3	440 (exact^{t}.)
Si	493.9
Do4	523.2
Ré	587.3
Mi	659.3
Fa	698.5
Sol	784.0
La	880 (excat^{t}.)
Si	987.8

3.2. Les tempéraments modernes

Les compositeurs modernes, soit pour des raisons esthétiques, soit pour des raisons théoriques, ont cherché à introduire de nouvelles notes. Cela dépasserait largement notre propos ici d'en faire une présentation un peu détaillée, mais il convient de savoir que différentes tentatives ont été faites pour unifier les systèmes, et notamment en introduisant les micro-intervalles. Xénakis s'est bien sûr appuyé sur un tel système, mais on trouve des études très poussées chez d'autres musiciens moins connus comme Wyschnegrasdky ou Carillo[14]. Nous donnons figure 7 un exemple de notation au quart de ton et douzième de ton (Wyschnegrasdky) :

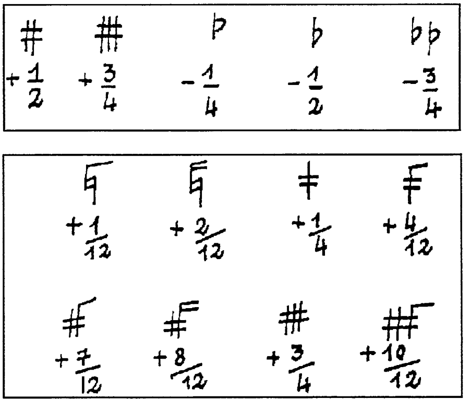

Figure 7

A partir de l'idée d'un découpage de l'octave en intervalles égaux la proposition a même été faite d'utiliser un découpage de cinquante-quatre intervalles (le micro-intervalle ayant alors pour valeur $\sqrt[54]{2}$!). Les difficultés sont nombreuses : notation et perception de ces micro-intervalles, instrumentation... Citons pour information que différentes inventions ont été proposées pour des instruments au 1/4 de ton (piano, flûte, harpe), ainsi qu'au $1/16^{e}$ de ton (cithare de Carillo). Au-delà du 1/4 de ton, de même que dans des systèmes non octaviants, ce sont des instruments électroniques ou des systèmes informatisés de synthèse en temps réel qui permettent (et permettront) de produire des œuvres... On peut citer ici l'Étude électroacoustique n° 2 de Stockhausen (qui utilise un «crible» fondé sur des intervalles de $\sqrt[25]{5}$) et les études de Jean-Claude RISSET [15].

4. EN GUISE DE CONCLUSION

Il n'est guère de conclusion à ce propos. Toutefois, le lecteur aura compris à ce niveau que ce sujet n'est pas caractérisé par sa simplicité (qu'il s'agisse de l'étendue du domaine ou des lois connues) ni par l'ancienneté des connaissances qui en aurait fait un savoir solide et définitif. Si une seule idée sûre était à garder ici ce serait que *tout ce qui peut être dit à propos des sons musicaux est incompatible avec la référence à des sons «sinusoïdaux» !*[15] En d'autres termes, il est clair que la présentation de quelques éléments d'acoustique musicale à propos des gammes ne peut se limiter d'un côté, à la décomposition harmonique d'un son et, de l'autre, à un unique découpage de l'octave en douze intervalles (et encore moins en un découpage en intervalles égaux), sous peine de faire une réduction où physique et musique perdraient toute leur cohérence. Par ailleurs, les éléments fournis ici ne constituent qu'un noyau autour duquel chacun pourra développer ce qui lui semblera le plus intéressant : aspects historiques, perceptifs, techniques, mathématiques, les renvois donnés tout au long du texte ayant pour objet de faciliter cet enrichissement.

Terminons en ajoutant ici quelques extraits du programme de musique de la classe de seconde des lycées que nous évoquions en introduction :

II - Assimilation des connaissances

[...]

– Être capable de s'approprier les technologies de son temps :

[...] Le travail sur le matériau sonore peut être mené sur du son concret, au moyen de l'échantillonneur ou d'une carte de numérisation, ou sur du son de synthèse. Des travaux scientifiques et créatifs seront menés en liaison avec le cours de Physique (acoustique). Ces travaux donneront accès à des langages de notre temps que les élèves ressentiront, exploreront, vivront et pratiqueront. Ainsi les œuvres de Chowing, de Risset, des compositeurs «spectraux» par exemple pourront donner lieu à des activités nombreuses et variées.

[...]

III - Observations concernant la classe de seconde

Percevoir : le travail de perception et d'analyse des bruits et des sons sera conçu, pour une part, *en liaison avec l'enseignement de la physique*[16]. [...] Les différentes composantes sonores seront également caractérisées à l'aide de dimensions timbre / couleur, intensité, registres, grain, «épaisseur», statisme / évolutisme, durée, etc.

BIBLIOGRAPHIE

[1] P.-Y. ASSELIN : *Musique et tempérament*, éditions Costallat, 1984, 236 pages.

[2] D. BEAUFILS : *Le son : qu'entendez-vous par là ?*, B.U.P. n° 761, p. 371-375.

[3] R. DE CANDE : *La musique*, Nouvelle édition, Seuil, 1969.

[4] B.O. : Numéro hors série du 24 septembre 1992, *Programme de musique*, 1992, p. 21-37.

[5] B.U.P. spécial son : n° 761, février 1994.

[6] A. DANHAUSER : *Théorie de la musique*, Éditions Lemoine, Nouvelle édition, 1994.

[7] J.-P. FLEURY et P. MATHIEU : *Vibrations mécaniques - Acoustique*, Chapitre 12, «Notions d'acoustique musicale», Eyrolles, 1967.

[8] IRCAM, Centre Georges Pompidou, plaquette de présentation, 24 pages.

[9] Éditions LAFFONT : Dictionnaire encyclopédique de la musique, Laffont, 1991.

[10] J. LATTARD : *Gammes et tempéraments musicaux*, Masson, 1988, 130 pages.

[11] J.-P. LE CARDONNEL : *A propos des sons périodiques sans fondamental*, B.U.P. n° 767, octobre 1994, p. 1397-1402.

[12] E. LEIPP : *Acoustique et musique*, Dunod, deuxième édition, chapitre X, «audition des sons : la sensation de hauteur et d'intervalle», 1984.

[13] J.-E. MARIE : *L'homme musical*, Paris : Arthaud, 1976, 344 pages.

[14] J. PIERCE : *Le son musical : musique, acoustique et informatique*, Belin, Collection l'Univers des Sciences, nouvelle édition, 1993, 242 pages.

[15] J.-C. RISSET : *«Computer Music, Experiments 1964...»* in Computer Music Journal, Volume 9, n° 1, 1985, p. 11-18.

[16] H.-H. STUCKENSMIDT : *La musique du XX^e^ siècle*, Collection l'Univers des Connaissances, 1969, 256 pages.

NOTES

1. La loi d'Ohm en acoustique associe un son simple à une vibration sinusoïdale (1843), la loi de Fourier est celle de la composition des vibrations périodiques (1822) et la loi de Helmholtz concerne la différence de phase des harmoniques (qui n'intervient pas dans la reconnaissance des timbres musicaux) (De Cande [3]).

2. Voir par exemple Leipp [12] (p. 134) et Pierce [14] (chapitre 5) ; on trouvera aussi chez Pierce une indication de travaux récents introduisant les notions de «dureté» des sons et de bande critique de consonance (p. 76).

3. Il faut distinguer les instruments à son entretenus (vents, cordes frottées) qui ont un spectre harmonique et ceux à son non entretenu (piano, guitare) qui ont un spectre plus complexe, et savoir qu'il existe des sons inharmoniques (cloches) ; d'autre part la perception d'un son et de sa hauteur n'est pas liée au fondamental mais à la corrélation des harmoniques (Le Cardonnel) [11].

4. Ceci peut être mis en évidence à l'aide d'un générateur stéréophonique délivrant un signal de fréquence fixe sur l'une des voies, et modulable par potentiomètre sur l'autre voie : la recherche de l'égalisation des impressions conduit à sélectionner différentes valeurs de la fréquence qui sont en rapport d'octave.

5. Voir par exemple De Cande [3].

6. Si, par exemple, la première note est do, l'accord parfait majeur est do-mi-sol ; mais la gamme n'est pas encore construite...

7. La différence dans l'échelle de perception logarithmique correspondant à la division des valeurs fractionnaires.

8. Voir par exemple Leipp [12] (p. 140).

9. Le verbe tempérer exprime une notion de limitation ; «le tempérament consiste en une détermination des intervalles et altérations d'une gamme comportant généralement douze degrés contenus dans une octave pure, pour obtenir le meilleur compromis entre les harmoniques souhaités et le champ des tonalités permises» ; en règle générale on tempère les quintes pour que le cycle de douze quintes coïncide avec le cycle de sept octaves ; (voir Lattard [10], p. 33-34).

10. Premier livret achevé en 1722, second en 1744.

11. D'après Asselin ; pour une étude détaillée des systèmes utilisés par Bach (utilisation des différents systèmes de Werckmeister et

Kirnberger pour les préludes et fugues pour clavecin en particulier) voir Asselin [1] ; plus généralement voir Lattard [10] (chapitre 5).

12. Et qui ne concerne pas une corde par touche, mais trois ; voir à ce sujet les ouvrages de Leipp [12] (p. 144) et Pierce [14] (p. 62) ; l'utilisation du tempérament égal pour le piano est lié à la présence de cordes multiples mais également à l'inharmonicité des vibrations, (voir Lattard [10], annexe 13, p. 124-126).
13. La numération des notes est «historique» et consacrée par l'usage ; par ailleurs, l'histoire de la fréquence du la3 est riche de rebondissements : on pourra à ce sujet se référer à l'ouvrage de Leipp [12] (p. 136).
14. La question de la définition des micro-intervalles fait l'objet d'un chapitre complet de l'ouvrage de J.-E. Marie [13] (p. 25-94). Les graphismes de la figure 7 sont tirés de ce même ouvrage (p. 48-49).
15. Voir en particulier Leipp [12] (chapitre sur les sensations de hauteur) et Pierce [14] (p. 77 et p. 80).
16. En italique dans le texte officiel.

Annexe

Extrait de l'ouvrage «L'homme musical»

«Il existe de nombreuses musiques dans le monde ou à travers l'histoire qui ne se sont jamais souciées de la résonance harmonique. On a dénommé une gamme qui caractérise un certain stade d'évolution d'une certaine société, et théoriciens de la musique et physiciens se sont évertués à défendre comme loi physique ce qui peu à peu perdait de son intérêt aux yeux et aux oreilles des musiciens. En effet la musique évolue au travers des œuvres et des manières d'entendre des musiciens. Les théoriciens ne viennent qu'après coup et les physiciens, dont le rôle peut être très important dans certains champs de recherches, lorsqu'il s'agit de prolonger le discours des théoriciens ne font guère que de l'apologétique. La musique est un fait de culture, non un fait de nature».