

Chapitre 7

La perception intervallique

7.1 Introduction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, le mel est l'unité de l'échelle subjective utilisée pour la mesure de la hauteur spectrale. Par définition, un son pur d'une fréquence de 1000 Hz et d'une intensité de 40 dB a une tonie de 1000 mels.

On peut considérer les intervalles musicaux comme une échelle subjective reliée à la hauteur tonale (ou chroma). Dans l'échelle musicale occidentale la plus courante, le demi-ton est défini comme la division en 12 parties logarithmiquement égales du rapport des fréquences de l'octave.

L'échelle mel a été élaborée par Stevens qui s'est rendu compte le premier que la perception subjective de la hauteur ne correspondait pas nécessairement aux intervalles musicaux, et donc à une échelle logarithmique. Ainsi, un intervalle donné (par exemple, l'octave) selon qu'il est situé dans le registre grave ou dans le registre aigu, ne provoquerait pas la même sensation de hauteur doublée. Pour Stevens, cette sensation serait proportionnelle à la fréquence. Par ailleurs, si on demande à des sujets d'ajuster des sons de manière à produire une échelle d'intervalles perçus comme égaux, on peut constater que le résultat auquel ils parviennent est souvent différent de l'échelle logarithmique des musiciens.

Il existe un aspect de la musique qui peut nous fournir des indices qui n'apparaissent pas nécessairement lors de simples expériences psychoacoustiques (réalisées uniquement à l'aide de sons purs et sur un nombre très limité de sujets par exemple) : il s'agit des règles d'écriture de la polyphonie. En effet, on peut constater que si les musiciens considèrent comme égaux, dans un contexte musical, des intervalles portant le même nom (par exemple, la quinte) peu importe leur situation dans le registre, la tradition démontre cependant que la distance entre les différentes voix de l'écriture polyphonique est fonction du registre. Ainsi, la distance entre les voix de basse et de ténor, généralement d'une octave et plus, est beaucoup plus grande que celle qui sépare celles de l'alto et du soprano, plus près de la tierce majeure. Cette tradition semble appuyer la thèse selon laquelle la tonie n'est pas uniquement reliée à la notion d'intervalle mais également à leur situation dans le registre et cela proportionnellement à la fréquence.

Ainsi un **intervalle donné serait perçu comme plus petit dans le registre grave que dans le registre aigu**, d'où la nécessité d'une plus grande distance entre les voix dans le premier cas que dans le second.

7.2 Quelques définitions et rappels

On distingue deux types d'intervalles :

- les intervalles *mélodiques* entre sons consécutifs
- les intervalles *harmoniques* entre sons simultanés

On distingue aussi le cas :

- des sons *purs*
- des sons *complexes* (interaction entre les harmoniques)

On peut adopter plusieurs points de vue :

- *physique* (objectif) : intervalle entre deux *fréquences*
- *perceptif* (subjectif) : intervalle entre deux *hauteurs*
- *musical* (abstrait) : intervalle entre deux *notes*

On peut considérer l'intervalle comme :

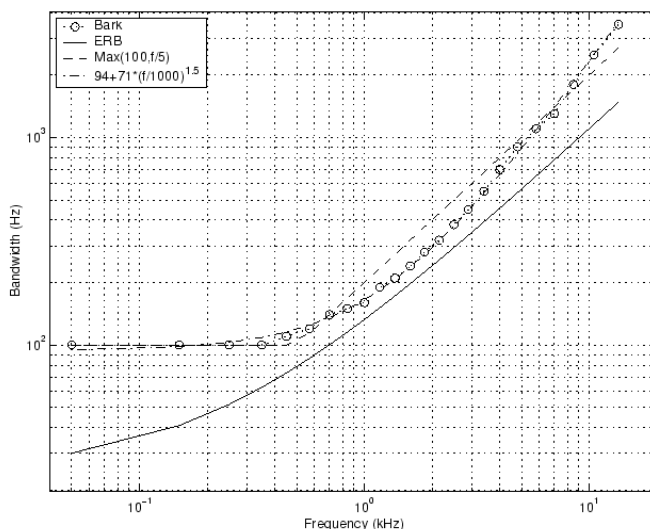
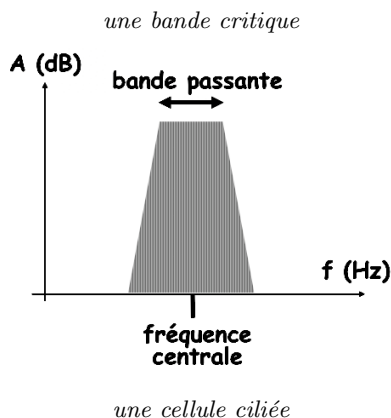
- une *distance* sur une échelle continue en Hz ou cents
- une *catégorie musicale* sur une échelle discrète (exemple : la tierce majeure)

Rappel :

1 cent = $1/100^{\text{e}}$ de demi-ton = $1/1200^{\text{e}}$ d'octave

Intervalle entre deux fréquences f_1 et f_2 (en cents) = $3986 \log(f_2/f_1)$

À chaque cellule ciliée le long de la membrane basilaire dans la cochlée correspond un filtre auditif qui se comporte comme un filtre passe-bande. En-deçà de 500 Hz, la bande critique se situe entre 60 et 100 Hz. Au-delà de 500 Hz, la bande critique se situe entre 2 et 3 demi-tons.



Dans une expérience visant à déterminer le seuil de perception d'un intervalle *mélodique*, on va donc faire entendre deux sons de fréquences différentes entendus *consécutivement* (et séparés par un silence) et on posera la question : « Percevez-vous des hauteurs différentes ou la même hauteur ? »

Dans une expérience visant à déterminer le seuil de perception d'un intervalle *harmonique*, on va faire entendre deux sons de fréquences différentes entendus *simultanément* et on posera la question : « Entendez-vous un seul son ou deux sons distincts ? »

7.3 Le seuil de perception des intervalles

Selon que l'on considère l'un ou l'autre des deux types d'intervalles (harmonique ou mélodique), le seuil différentiel sera fort différent.

7.3.1 Le cas des intervalles harmoniques

Les résultats d'expériences en psychoacoustique montrent que pour percevoir un intervalle harmonique, il est nécessaire que les fréquences des sons qui le composent soit situées à une distance suffisamment grande pour que l'oreille les séparent l'une de l'autre, sans quoi ce qui est perçu sera un battement. Cette distance critique est relativement grande par comparaison avec celle que l'on trouve pour le seuil différentiel de l'intervalle mélodique (voir section suivante).

Dans le cas des sons purs, un intervalle harmonique est perceptible à partir du moment où la distance qui sépare les fréquences des sons qui le constituent est égale à 0,2 ou plus de la largeur de la bande critique où se situe cet intervalle, autrement dit à au moins **un cinquième de la bande critique**¹.

Comme on sait que, selon l'échelle de Bark, la largeur des bandes critiques est d'environ 100 Hz pour les fréquences en-deçà de 500 Hz, cela signifie que le plus petit intervalle harmonique perceptible le sera à partir d'une différence de 20 Hz ($0,2 \times 100$ Hz), ce qui le fait passer :

de $3986 \log\left(\frac{120}{100}\right) = \mathbf{316 \text{ cents}}$ autour de 100 Hz (plus grand qu'une tierce mineure!)

à $3986 \log\left(\frac{520}{500}\right) = \mathbf{68 \text{ cents}}$ autour d'une fréquence de 500 Hz.

Par ailleurs, la largeur des bandes critiques au-delà de 500 Hz étant d'environ une tierce mineure (rapport $2^{3/12} = 1,1892$ ou 300 cents), le plus petit intervalle perceptible aura un rapport de $1,1892^{0,2} = 1,035$, ce qui correspond à environ **60 cents** (un peu plus d'un quart de ton).

Notons que ce seuil dépend principalement de la physiologie et est quasi indépendant de la formation musicale.

7.3.2 Le cas des intervalles mélodiques

Le seuil différentiel pour les intervalles mélodiques est beaucoup plus petit que dans le cas des intervalles harmoniques grâce à l'absence d'interférence entre les sons.

Dans le cas des sons purs, un intervalle mélodique est perceptible à partir du moment où la différence des fréquences qui le constituent varie entre 1,8 et 3 Hz pour les basses fréquences (inférieures à 500 Hz) jusqu'à la valeur la plus petite qui est d'environ 0,3% pour les fréquences plus élevées (supérieures à 500 Hz).

Cela signifie qu'une différence de 3 Hz est nécessaire pour percevoir un changement de tonie de la fréquence de 100 Hz, alors que cette même différence de 3 Hz est suffisante pour être perçue autour de 1000 Hz, ce qui donne une différence intervallique qui passe :

de $3986 \log\left(\frac{103}{100}\right) \approx \mathbf{50 \text{ cents}}$ (un quart de ton) autour de 100 Hz

à $3986 \log\left(\frac{1003}{1000}\right) \approx \mathbf{5 \text{ cents}}$ autour de 1000 Hz.

¹Ces chiffres sont établis à partir de Pierce et Zwicker mais notons que Roederer trouve des valeurs légèrement plus grandes.

Ces chiffres, obtenus expérimentalement (par Pierce, Roederer et Zwicker notamment) auprès de sujets provenant de divers milieux, sont à réviser à la baisse quant aux seuils différentiels des musiciens. Il semble en effet que des expériences menées auprès de musiciens montrent un seuil différentiel inférieur à 3 cents pour une fréquence de 525 Hz (cf. expérience du laboratoire sur la détection de seuil différentiel).

Enfin, il faut noter que les seuils différentiels varient en fonction de l'intensité des sons présents. Ainsi les valeurs mentionnées plus haut sont remarquablement constantes pour des intensités supérieures à 30 dB alors qu'ils varient très rapidement pour les valeurs d'intensités plus faibles.

7.4 Échelles musicales théoriques

De nombreuses échelles musicales ont été théorisées et définies au cours des siècles en Occident. Rappelons ici deux échelles importantes : l'échelle de Pythagore et l'échelle de Zarlino.

L'échelle de Pythagore est basée sur le cycle des quintes et définit les intervalles sur la base de rapports de puissances de 2 et 3 seulement ($3^a/2^b$ ou $2^a/3^b$).

Exemple : tierce majeure (4 sauts de quinte $do \rightarrow sol \rightarrow ré \rightarrow la \rightarrow mi$) = $(\frac{3}{2})^4 \div (\frac{2}{1})^2 = \frac{81}{64}$

L'échelle de Zarlino est basée sur la série des harmoniques et définit les intervalles sur la base de rapports d'entiers simples.

Exemple : tierce majeure = $5/4$

Le tableau ci-dessous fournit les noms d'intervalles et les rapports pour ces deux échelles.

Demi-tons	1 ^{er} nom diatonique		2 ^e nom diatonique		Zarlino		Pythagore	
					ratio	cent	ratio	cent
0	P1	unisson juste			1:1	0	1:1	0
1	m2	seconde mineure	a1	unisson augmenté	16:15	112	256:243	90
2	M2	seconde majeure	d3	tierce diminuée	9:8	204	9:8	204
3	m3	tierce mineure	a2	seconde augmentée	6:5	316	32:27	294
4	M3	tierce majeure	d4	quarte diminuée	5:4	386	81:64	408
5	P4	quarte juste			4:3	498	4:3	498
6	TT	triton	a4 d5	quarte augmentée quinte diminuée	45:32 64:45	590 610	729:512	612
7	P5	quinte juste			3:2	702	3:2	702
8	m6	sixte mineure	a5	quinte augmentée	8:5	814	128:81	792
9	M6	sixte majeure	d7	septième diminuée	5:3	884	27:16	906
10	m7	septième mineure	a6	sixte augmentée	9:5	1017	16:9	996
11	M7	septième majeure	d8	octave diminuée	15:8	1088	243:128	1110
12	P8	octave juste			2:1	1200	2:1	1200

7.5 Perception catégorielle des intervalles

La perception des intervalles est dite “catégorielle” car elle relève d’une perception qui est présente ou non : *on perçoit ou on ne perçoit pas un intervalle donné* (par opposition aux perceptions de quantité – sonie – et de qualité – tonie – déjà étudiées). Il y a plusieurs niveaux de catégorisation des intervalles en fonction de la gamme considérée :

- diatonique : unisson, seconde, tierce, etc.
- chromatique : P1, m2, M2, m3, M3, etc.
- microtonale : les quarts de ton dans la musique du Moyen-Orient

Les musiciens occidentaux reconnaissent généralement les intervalles musicaux au niveau chromatique : il n'y a pas de catégorie supplémentaire entre la tierce majeure et la quarte juste, par exemple. On parlera d'une tierce majeure un peu grande ou d'une quarte un peu petite, si on se trouve entre les deux. Un cas similaire serait la catégorisation des consonnes plosives [b], [d], [g]. Il est à noter que les intervalles sont moins facilement reconnus aux extrêmes du registre, pour les fréquences inférieures à 100 Hz et supérieures à 4 000 Hz.

7.6 Notion de justesse

En Occident, il semble que les interprètes, dans la pratique, ne démontrent aucune préférence pour une échelle en particulier dans un contexte mélodique. Dans un contexte harmonique par contre, il y existe une légère préférence pour le tempérament égal. Les instrumentistes autres que les claviéristes (violonistes, etc.) ajustent généralement la grandeur des intervalles en fonction du contexte musical. Ainsi, en mode majeur, la grandeur de l'intervalle de demi-ton placé entre le 3e et le 4e degré sera joué plus grand que celui placé entre le 7e et le 8e degré, à cause de l'attirance de la sensible vers la tonique (dans un contexte de musique tonale).

Par ailleurs, il existe une relation entre émotion et effet de résolution :

désaccord = tension

accord = résolution

On remarque aussi que l'échelle utilisée en pratique varie en fonction de la vitesse d'exécution :

- *musique rapide* : échelle quasi pythagorienne → m2 plus petite (attirance de la sensible vers la tonique), M3 plus grande
- *musique lente* : échelle quasi zarlinienne → m2 plus grande, M3 plus petite (car la rugosité est plus perceptible à faible tempo)

D'autre part, la mélodie principale est généralement jouée plus haute. Les octaves sont étirées, surtout dans les registres graves et aigus et ce jusqu'à 50 cents. On note également des variations aléatoires des hauteurs par rapport à une échelle donnée (ce qui a des implications pour la synthèse sonore).

7.7 Consonance et dissonance

7.7.1 Consonance et dissonance dans l'histoire de la théorie musicale

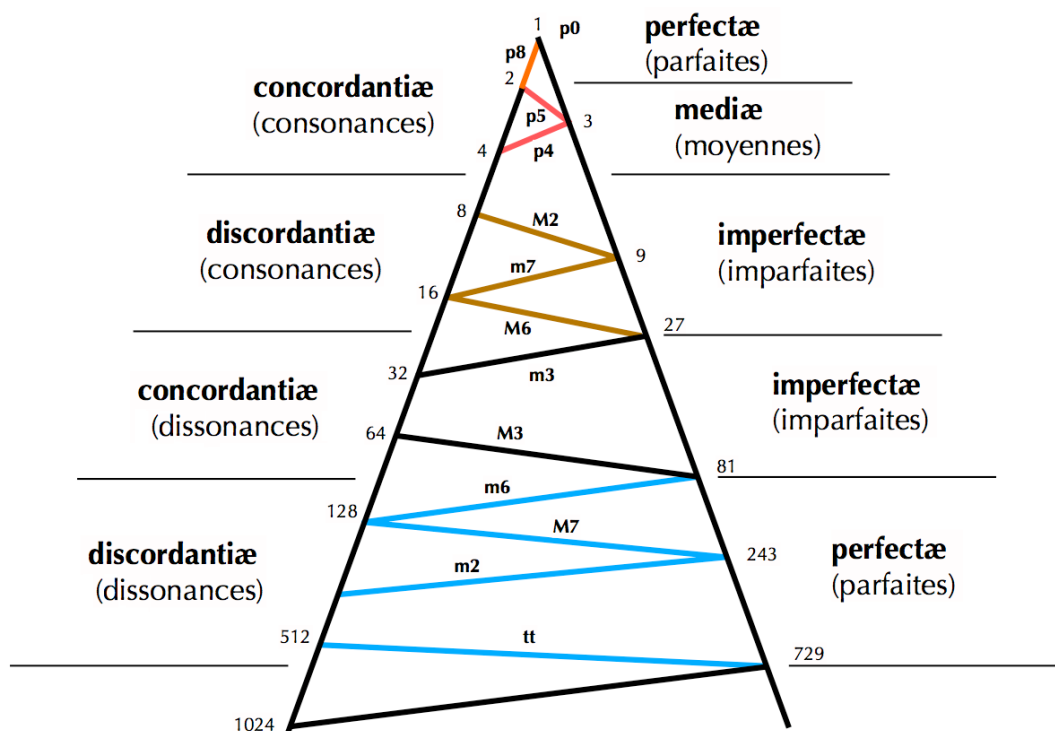
Dans la seconde partie du XIII^e siècle, avec l'école de Notre Dame, la polyphonie confirme son développement et devient par la suite un phénomène considérable dans la musique occidentale. La nécessité de régler la superposition des sons accentue alors le *besoin de classifier les consonances et dissonances*. La consonance est donc un terme spécifique à la musique polyphonique et à la culture occidentale.

La classification des intervalles en consonances/dissonances parfaites, moyennes ou imparfaites proposée par *Jean de Garlande* est une de celles qui fait alors référence (vers 1275).

	perfectæ	mediæ	imperfectæ
Consonance	p0 p8	p5 p4	m3 M3
Dissonances	m6 M7 m2 tt		M2 m7 M6

De Garlande ne justifie pas autrement cette classification. Cependant Mayer note qu'elle se retrouve implicitement contenue dans un système numérique d'engendrement des intervalles figurant dans certains manuscrits relatifs à l'astronomie dès le XII^e siècle.

Ce système est présenté sous la forme d'un diagramme portant sur deux branches les puissances de 2 et de 3 successives, tel qu'illustré sur la figure ci-dessous. La succession des rapports alternés entre nombres figurant sur chacune des branches livre l'ensemble des intervalles musicaux. Ces intervalles sont construits par combinaisons d'octaves et de quintes selon un principe clairement inspiré de la théorie Pythagoricienne.



7.7.2 Consonance et dissonance en psychoacoustique

Si maintenant on considère le phénomène de la consonance et de la dissonance du point de vue de la psychoacoustique, on peut identifier trois sources de variation principales :

- les propriétés acoustiques (fréquences communes)
- les limitations physiologiques (analyse spectrale)
- la familiarité (sons environnementaux, parole, musique)

On peut aussi distinguer trois catégories de consonance/dissonance :

1. *universelle* physiologique (correspondant à la rugosité perceptive)
2. *universelle* apprise (patrons familiers non musicaux)
3. spécifique à une culture musicale

7.7.3 Coïncidence des harmoniques et parallélisme en contrepoint

Les figures de la page suivante représentent les harmoniques de deux sons complexes séparés par différents intervalles : à gauche, le premier son et à droite le second son distant du premier d'un intervalle donné (1/1 : unisson, 2/1 : octave, 3/2 : quinte juste, 5/4 : tierce majeure).

Les harmoniques en commun sont marquées par des losanges. Le nombre d'harmoniques communes est maximal pour l'octave (les harmoniques paires du premier son correspondent aux harmoniques du second son).

Mais pourquoi dit-on que les octaves et quintes parallèles doivent-elles être évitées en contrepoint traditionnel ?

Les octaves et quintes parallèles (consécutives) apparaissent en musique polyphonique quand deux voix séparées par une octave ou une quinte “montent” ou “descendent” du même intervalle. Ces octaves ou quintes parallèles sont considérées “indésirables” en contrepoint traditionnel car dans cette situation, *les voix ont tendance à fusionner perceptivement en une seule* (on passe de 4 voix à 3 voix par exemple). Ces intervalles seraient donc “trop consonants” pour la polyphonie.

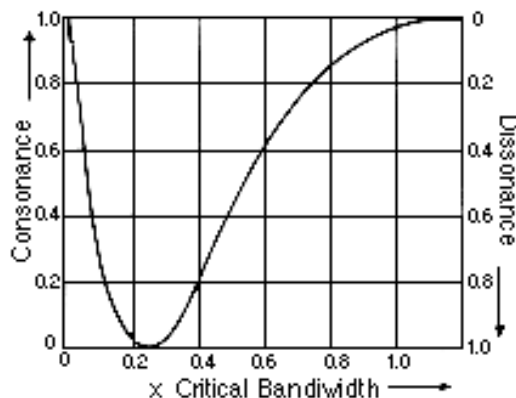
Ce phénomène de fusion peut aussi apparaître avec d'autres intervalles, mais l'effet est beaucoup moins important. De ce fait, on tolère les tierces parallèles mais pas plus que trois consécutives sous peine de créer l'impression qu'une voix vient de disparaître.

7.7.4 L'aspect physiologique de la dissonance : la rugosité

Des expériences menées notamment par Plomp et Levelt ont permis de montrer comment la sensation de dissonance physiologique, ou rugosité, varie en fonction de l'écart entre les deux fréquences en présence. En-dessous d'une différence de 20 Hz, on perçoit des battements.

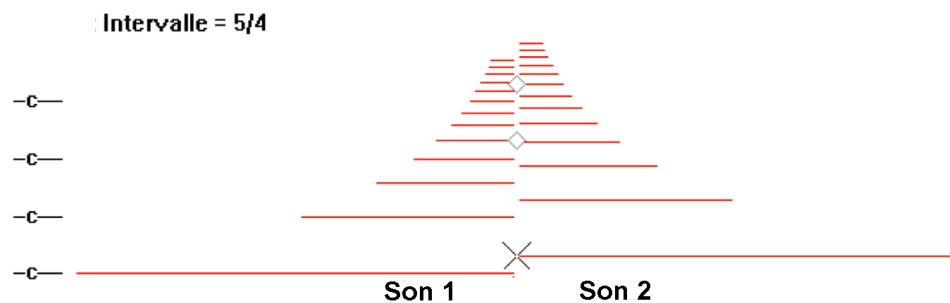
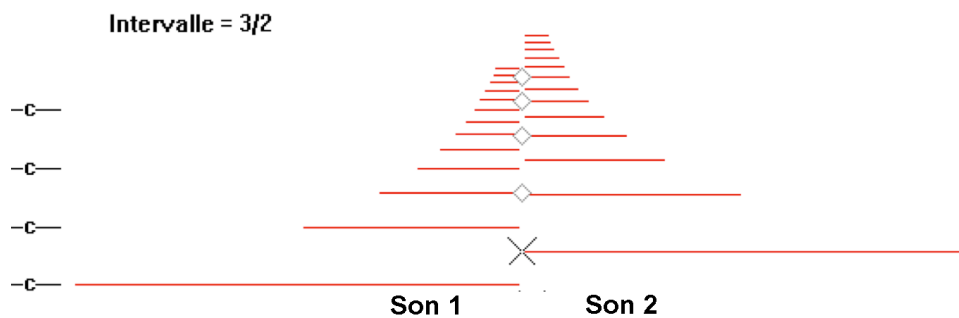
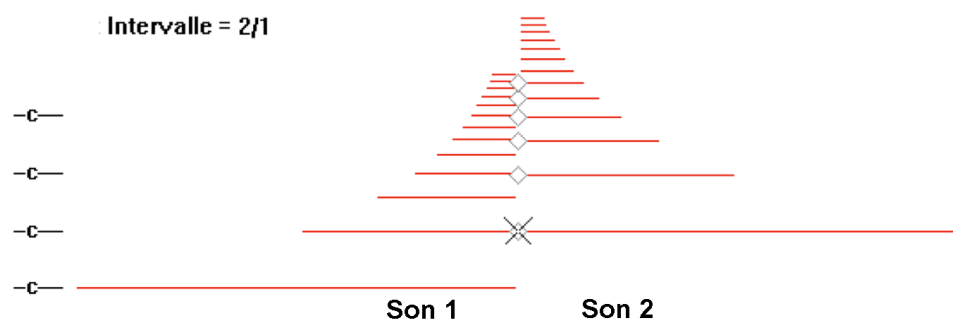
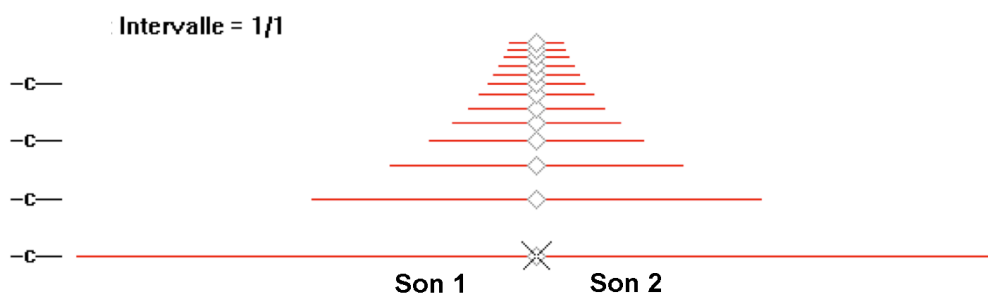
Pour deux sons purs présentés simultanément, la *sensation de rugosité* :

- commence à partir de 20 Hz
- est maximum à environ $\frac{1}{4}$ de la bande critique
- disparaît quand la différence de fréquence dépasse une bande critique.



Courbe représentant la rugosité de deux sons purs présentés simultanément en fonction de la différence de fréquence (en fraction de largeur de bande critique). NB : L'échelle de consonance est arbitraire.

Plomp and Levelt, *Tonal Consonance and Critical Bandwidth*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 38, p. 548, 1965.



En-deçà de 500 Hz, la bande critique a une largeur de 100 Hz selon l'échelle de Bark. La règle énoncée plus haut impliquerait donc que tous les intervalles situés entre 100 Hz et 200 Hz (formant une octave) sont dissonants ! Pourtant, ceci ne se vérifie pas perceptivement. Voyons pourquoi.

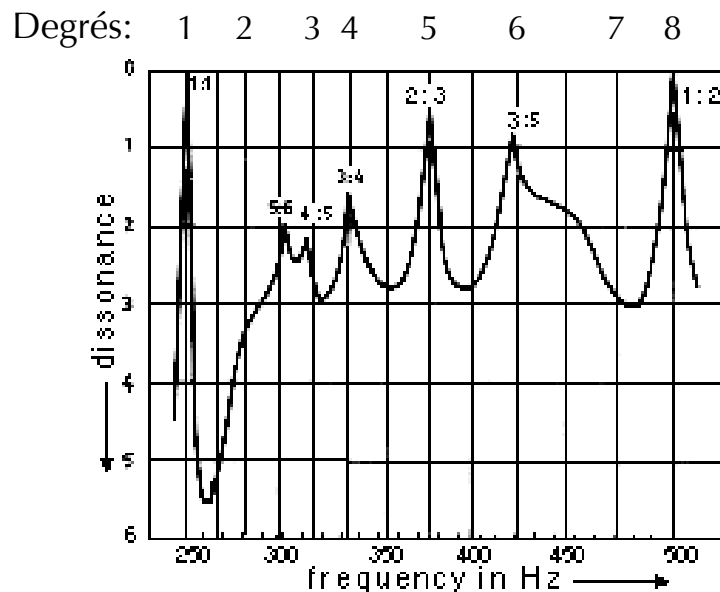
Cas des sons complexes : étant plus sensible aux fréquences moyennes qu'aux fréquences graves, le système auditif *compare les fréquences des harmoniques supérieures* des sons qui composent l'intervalle, plutôt que leurs fondamentales.

Cas des sons purs : notre *expérience de la consonance* dans les fréquences moyennes serait *transposée* dans le registre grave et on considérerait consonants des intervalles qui devraient être dissonants "physiologiquement" (rugueux) car les deux fréquences composant l'intervalle se situent dans la même bande critique.

7.7.5 Courbe de rugosité pour un intervalle de deux sons complexes

Les psychoacousticiens Plomp et Levelt ont également établi une courbe de consonance pour deux sons complexes comprenant 6 harmoniques et formant différents intervalles, courbe calculée à partir de la courbe de rugosité établie pour deux sons purs (présentée plus haut)².

Sur le graphique ci-dessous, la consonance maximale correspond au sommet de l'échelle verticale. Le premier son a une fréquence fondamentale égale à 250 Hz et le second son a une fréquence fondamentale variant entre 250 Hz (l'unisson) et 500 Hz (l'octave). Les lignes verticales représentent les demi-tons d'une échelle tempérée.



²Plomp and Levelt, *Tonal Consonance and Critical Bandwidth*, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 38, p. 548, 1965.

À l'observation du graphique précédent, on obtient le classement suivant, de l'intervalle le moins rugueux à l'intervalle le plus rugueux :

- Octave (2:1)
- Quinte juste (3:2)
- Sixte majeure (5:3)
- Quarte juste (4:3)
- Tierce mineure (6:5)
- Tierce majeure (5:4)

Et au cours de l'histoire de la musique en Occident, on peut donc remarquer que les intervalles harmoniques sont devenus de plus en plus rugueux :

- Octave (2:1)
- Quinte juste (3:2)
- Tierce (5:4), sixte (5:3)
- Quarte juste (4:3)
- Septième, seconde (9:8)

Il est important de noter que les notions de consonance/dissonance peuvent varier d'une culture à l'autre.

7.7.6 Le cas du triton... « Diabolus in musica »

Comme nous l'avons vu, du point de vue de la psychoacoustique, un intervalle harmonique est dit *rugueux* si les fréquences qui le composent *se situent à l'intérieur d'une même bande critique* (pour Roederer, seulement 5 à 50 % de la bande critique).

Mais alors, comment expliquer la rugosité du *triton* (quarte augmentée ou quinte diminuée) constitué de 6 demi-tons et considéré *diabolus in Musica* au Moyen-Age, et la rugosité des septièmes majeure et mineure ? Pour comprendre cela, il faut se remémorer la composition spectrale d'un son périodique qui est formé, comme on sait, d'une fondamentale et d'une série d'harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de celle-ci. Dans le cas de la quarte augmentée par exemple, ce ne sont pas les fondamentales des deux sons qui interfèrent l'une sur l'autre, dans la même bande critique mais leurs harmoniques supérieures, ce qui explique qu'on la perçoive comme un intervalle dissonant. Le triton correspond à un rapport de fréquences de $2^{6/12} = 2^{1/2} = \sqrt{2} = 1,414$. Dans le tableau ci-dessous donnant les séries harmoniques des deux sons qui forment l'intervalle de quarte augmentée, on peut remarquer que plusieurs harmoniques forment des rapports de fréquences inférieurs à 1,19 (correspondant à la tierce mineure, limite de la bande critique). En particulier, la 3^e harmonique du premier son se trouve distant de la 2^e harmonique du second son d'un intervalle d'un demi-ton ($3986 \log(1,06) \approx 101$ cents).

Son 1 :	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000
Son 2 :		1414	2828	4242		5656	7070
Rapport :	1,414		1,06	1,06			1,01

Le nombre de ces «frottements» entre les fréquences des harmoniques supérieures déterminent le degré de consonance ou de dissonance d'un intervalle donné.