

# Psychoacoustique musicale

## Cours 10 :

### La perception intervallique

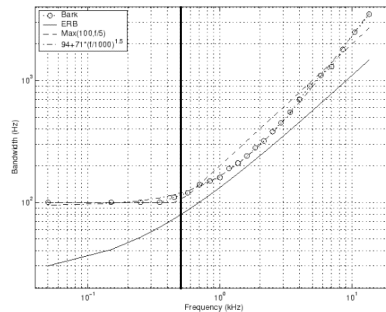
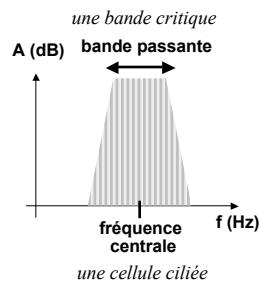
Prof. Richard Parncutt, Université de Graz, Autriche  
 Prof. Caroline Traube, Université de Montréal

23 mars 2006

#### Rappel :

#### Les filtres auditifs et la notion de bande critique

À chaque cellule ciliée le long de la membrane basilaire dans la cochlée correspond un **filtre auditif** qui se comporte comme un filtre **passé-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**



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 (ex: la tierce majeure)

**Rappel** : 1 cent = 1/100<sup>e</sup> demi-ton = 1/1200<sup>e</sup> octave  
 Intervalle (en cents) = 3986 log (f<sub>2</sub> / f<sub>1</sub>)

#### Le seuil de perception des intervalles harmoniques

##### Expérience :

- **Stimulus** : deux sons de fréquences différentes entendus **simultanément**
- **Question** : *Entendez-vous un seul son ou deux sons distincts ?*
- **Résultat** : le seuil se situe à environ **1/5<sup>ième</sup>** de la bande critique

Ce seuil

- dépend principalement de la physiologie
- est presque indépendant de la formation musicale

**En-deçà de 500 Hz**, la largeur des bandes critiques est d'environ 100 Hz selon l'échelle de Bark. Le plus petit intervalle perceptible serait alors d'environ 20 Hz, ce qui correspond à :

- \* **350 cents** autour de 100 Hz (plus grand d'une tierce mineure)
- \* **70 cents** autour de 500 Hz (plus petit qu'un demi-ton).

(En effet,  $3986 \log(110/90) = 347,38$  et  $3986 \log(510/490) = 69,25$ )

**Au-delà de 500 Hz**, la largeur des bandes critiques est d'environ une tierce mineure (300 cents). Le plus petit intervalle perceptible serait alors d'environ :

- \* **60 cents** (un peu plus qu'un quart de ton).

## Le seuil de perception des intervalles mélodiques

### Expérience :

- **Stimulus** : deux sons de fréquences différentes entendus **consécutivement** (séparés par un silence)
- **Question** : *Percevez-vous des hauteurs différentes ou la même hauteur ?*
- **Résultat** : le seuil est beaucoup plus petit que dans le cas des intervalles harmoniques grâce à l'absence d'interférence entre les sons.

### En-deçà de 500 Hz :

La plus petite différence perceptible varie **entre 2 et 3 Hz**.  
 À 100 Hz, 3 Hz correspondent à **50 cents** ( $3986 \log 103/100 = 51$  cents)  
 c'est-à-dire un quart de ton.

### Au-delà de 500 Hz :

La plus petite différence perceptible est d'environ **0,3%** de la fréquence, ce qui correspond à **5 cents** ( $3986 \log 1,003 f / f = 5,19$  cents)  
 À 1000 Hz, 0,3 % = 3 Hz.

Ce seuil dépend fortement de l'expérience et de la formation musicale. Les seuils baissent jusqu'à 3 cents pour les musiciens. Il faut aussi noter que ces seuils varient avec l'intensité.

## Intervalles et rapports théoriques

Demi-tons	1° nom diatonique		2° nom diatonique		Zarlino		Pythagore	
	ratio	cent	ratio	cent	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	590	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

## Échelles musicales théoriques

### • Échelle de Zarlino

- Basée sur la série des harmoniques
- Rapports d'entiers simples
- Exemple: tierce majeure = 5/4

### • Échelle de Pythagore

- Basée sur le cycle des quintes
- Rapports de puissances de 2 et 3 seulement ( $3^a/2^b$  ou  $2^a/3^b$ )
- Exemple : tierce majeure =  $(3:2)^4 / (2:1)^2 = 81/64$

Do → Sol → Ré → La → Mi

## Perception catégorielle des intervalles : l'intervalle comme catégorie musicale

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**.

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.

Cas similaire : la catégorisation des voyelles ([a], [i], [o], etc.)

Remarque : Les intervalles sont moins facilement reconnus aux extrêmes du registre, pour les fréquences inférieures à 100 Hz et supérieures à 4000 Hz.

## Accordage et tempérament

En Occident, il semble que les musiciens ne démontrent aucune préférence pour une échelle en particulier dans un contexte mélodique. Dans un contexte harmonique, il 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.

Il existe une **relation entre émotion et effet de résolution** :

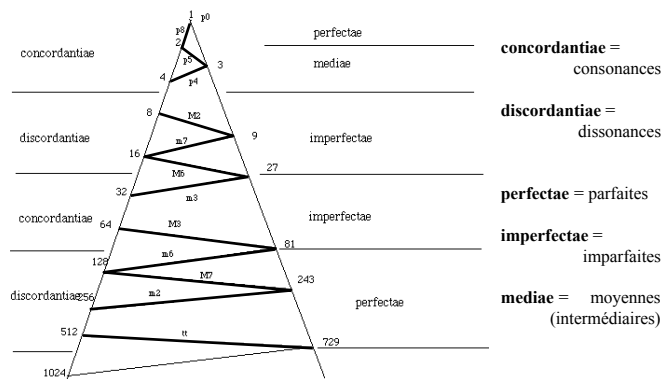
désaccord = tension → accord = résolution

L'échelle peut varier en fonction de la vitesse d'exécution :

- **musique rapide** : échelle quasi pythagorienne:  
m2 plus petit (l'attrance de la sensible vers la tonique),  
M3 plus grand
- **musique lente** (rugosité perceptible) : échelle quasi zarlinienne  
m2 plus grand, M3 plus petit

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 (implication pour la synthèse sonore).

Ce système est présenté sous la forme d'un diagramme portant sur deux branches les **puissances de 2 et de 3 successives**. 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** :



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

### Historique

Dans la seconde partie du XIII<sup>ème</sup> siècle, avec l'école de Notre Dame, la **polyphonie** (superposition de plusieurs voix) 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 classer les consonances et dissonances**. La consonance est donc terme spécifique à la culture occidentale (musique polyphonique)

La classification de **Jean de Garlande** est une de celles qui fait alors référence (vers 1275) :

	perfectae	mediae	imperfectae
Consonances	p0 p8	p5 p4	M3 m3
Dissonances	m2 tt m6		M6 m7 M2

De Garlande ne justifie pas autrement cette classification. Cependant C. 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<sup>ème</sup> siècle.

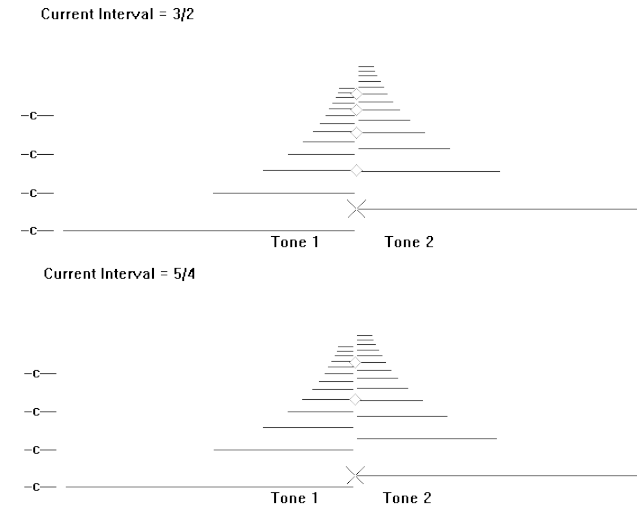
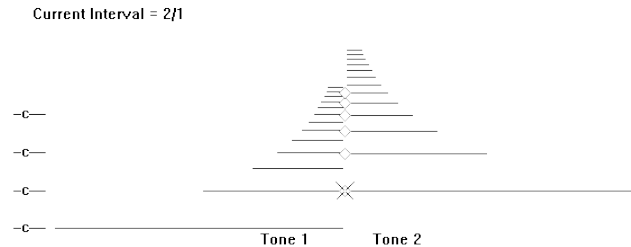
## Consonance et dissonance: approche psychoacoustique

- Trois sources de variation :
  - propriétés acoustiques (fréquences communes)
  - limitations physiologiques (analyse spectrale)
  - familiarité (sons environnementaux, parole, musique)
- Trois catégories de consonance/dissonance:
  - *universelle* physiologique (rugosité perceptive)
  - *universelle* apprise (patrons familiers non musicaux)
  - spécifique à une culture musicale

## La consonance et la coïncidence des harmoniques

Les graphiques ci-dessous 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).



### Pourquoi les octaves et quintes parallèles doivent-elles être évitées en contrepoint ?

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 "mauvaises" en contrepoint traditionnel car dans cette situation, **les voix ont tendance à fusionner en une seule** (on passe de 4 voix à 3 voix par exemple). Ces intervalles seraient donc "trop consonants" pour la polyphonie.

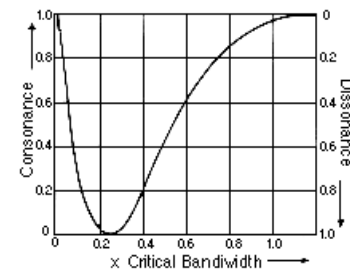
Ce phénomène de fusion perceptive peut aussi apparaître avec d'autres intervalles, mais l'effet est beaucoup moins important. De ce fait, on tolère les tierces parallèles mais pas plus que trois consécutives sous peine de créer l'impression qu'une voix vient de disparaître.

### L'aspect physiologique de la dissonance: la rugosité

En-dessous d'une différence de 20 Hz, on perçoit des battements.

La **sensation de rugosité** :

- commence à partir de 20 Hz
- est maximum à environ 1/4 de la bande critique
- disparaît quand la différence de fréquence dépasse une bande critique



Ci-contre : courbe représentant la **rugosité de deux sons purs en fonction de la différence de fréquence** (en fraction de largeur de bande critique). L'échelle de consonance est arbitraire.

(de Plomp and Levelt, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 38, p. 548).

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 !?!?!**  
Ceci ne se vérifie pas perceptivement. Explication ...

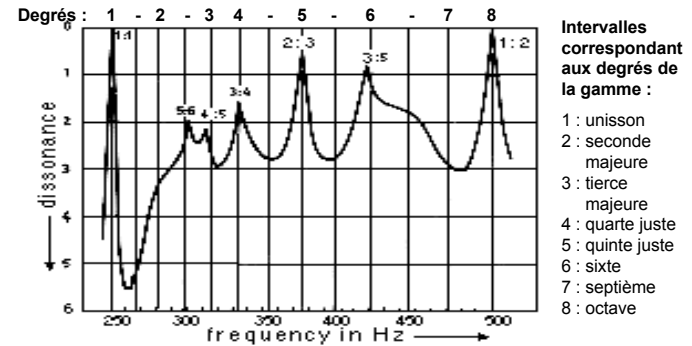
**Cas des sons complexes :**

Étant plus sensibles aux fréquences moyennes qu'aux fréquences graves, le système auditif **comparera 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 considèrerait consonants des intervalles qui devraient être dissonants "physiologiquement" (rugueux) car les deux fréquences composant l'intervalle se situent dans la même bande critique.

**Courbe de rugosité (par Plomp et Levelt)**



Courbe illustrant la rugosité entre deux sons complexes comprenant 6 harmoniques calculée à partir de la courbe de rugosité pour deux sons purs.  
1<sup>e</sup> son: fondamentale à 250 Hz.  
2<sup>e</sup> son: fondamentale variant entre 250 Hz (l'unisson) et 500 Hz (l'octave).  
Les lignes verticales représentent les demi-tons d'une échelle tempérée. (Plomp and Levelt, J.A.S.A., vol. 38, p. 548ff).

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)

Au cours de l'histoire de la musique en Occident, 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)

**Remarque :** les notions de consonance/dissonance peuvent varier d'une culture à l'autre.

**La rugosité des intervalles entre sons complexes**

**Règle générale :** un intervalle harmonique est **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).

Alors, comment expliquer la rugosité du **triton** (quarte augmentée ou quinte diminuée, constituée de 6 demi-tons) considéré "diabolus in Musica" au Moyen-Age, et des septièmes majeure et mineure ?

→ dans ce cas, ce ne sont pas les fondamentales qui interfèrent mais leurs harmoniques !

**Exemple :** le triton (rapport de fréquences de  $2^{6/12} = 2^{1/2} = 1,414$ )

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

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 7<sup>e</sup> harmonique du premier son se retrouve très proche de la 5<sup>e</sup> harmonique du second son.

## Quelques “mystères” relatifs à la perception des hauteurs et des intervalles

### La confusion des octaves

Autant chez les non-musiciens que les chez les musiciens, on remarque une tendance à confondre les octaves. Parfois, une octave va être jugée plus grande qu'une douzième (elle sera entendue comme une double-octave).

### L'oreille absolue

Est-ce un **don** (qualité innée de l'individu) ou le résultat d'un **apprentissage** précoce et privilégié ? Est-elle vraiment une qualité pour un musicien ? Il a été démontré que les non-musiciens peuvent avoir une forme d'oreille absolue. Beaucoup sont capables de se souvenir d'une chanson dans la tonalité d'origine.

### Les sons de combinaison

**Les sons différentiels et de sommation** : sons qui apparaissent dans la cochlée à cause de distorsions créées par de fortes intensités. En plus de  $f_1$  et  $f_2$ , on percevra  $f_1 + f_2$ ,  $f_2 - f_1$ ,  $2 f_2 + f_1$ ,  $3 f_2 - 2 f_1$ , etc ...