

Chapitre 5

La sonie des sons complexes

Phénomène de masque et notion de bande critique

5.1 Introduction

La compréhension des composantes qui participent à la perception de l'intensité est essentielle en acoustique musicale, peut-être plus que dans toutes les autres disciplines qui se rattachent à l'acoustique. Elle permet de comprendre de nombreuses règles ou pratiques d'écriture musicale, elle est indispensable à l'étude de la facture des instruments et explique plusieurs aspects du jeu de l'instrumentiste et de l'art de l'enregistrement en studio et du mixage en particulier.

Au cours du dernier siècle, les chercheurs ont commencé à découvrir les mécanismes extraordinaires de l'audition que connaissent empiriquement depuis fort longtemps les facteurs d'instruments, les luthiers, les ingénieurs du son, les compositeurs et les interprètes.

Un des phénomènes relatifs à la perception de l'intensité les plus remarquables est celui de l'effet de masque. L'effet de masque désigne le phénomène par lequel la présence d'un son peut empêcher la perception d'un autre son qui autrement serait audible. Cette définition ne semble pas recouvrir un phénomène particulièrement surprenant mais les mécanismes par lesquels il se manifeste sont tout à fait remarquables et leur étude a fait progresser de beaucoup nos connaissances sur la perception auditive.

Il aurait été difficile de prévoir, il y a une cinquantaine d'années à quel point ce phénomène serait étudié, dans toutes les conditions, sous toutes ses facettes. S'il était normal qu'on s'y intéresse alors que se développaient rapidement les techniques de communication et plus récemment, les techniques de compression des fichiers audionumériques (de type MP3), on ne se doutait pas qu'il nous permettrait, avec l'étude de l'audition binaurculaire, de découvrir les aspects à la fois les plus complexes et les plus «spectaculaires» du système auditif.

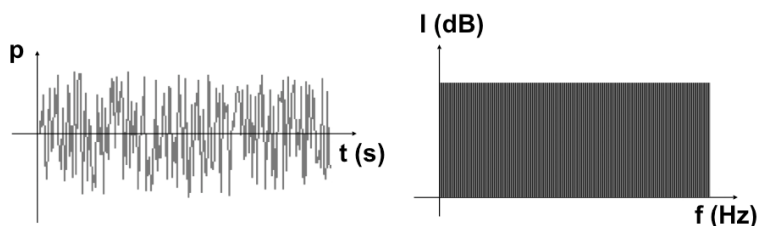
Sans faire une liste complète de ces aspects, retenons d'une façon générale que nous commençons à comprendre les mécanismes qui donnent au système auditif une puissance de «réception de l'information» à travers «le bruit», que lui envient tous les systèmes électroniques et informatiques existants, encore aujourd'hui.

5.2 Notions préalables

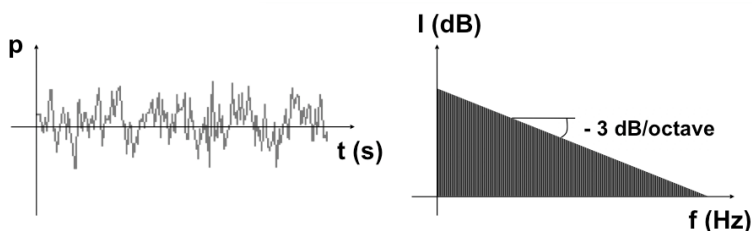
5.2.1 Qu'est-ce qu'un *bruit*, du point de vue de la psychoacoustique ?

Tous les *bruits*, autrement dit, les sons qui ne sont pas périodiques ou pseudo-périodiques, ont des spectres continus.

Le *bruit blanc* est une vibration dont le spectre est continu et constant. Idéalement, le spectre contient des composantes à toutes les fréquences recevant statistiquement la même énergie. L'expression « bruit blanc » vient de l'analogie avec la lumière blanche qui contient toutes les couleurs et donc toutes les ondes électromagnétiques dont les fréquences couvrent le spectre visible.



Le *bruit rose* est du bruit blanc pondéré à -3 dB/octave (énergie constante par octave). Pour faire des mesures impliquant la perception humaine, on utilisera le bruit rose plutôt que le bruit blanc, car il a plus de sens pour l'audition du fait que *l'énergie dans chaque octave est la même*. La diminution de l'énergie par un facteur 2 chaque fois qu'on passe à l'octave supérieure, compense le doublement de la taille de l'intervalle en Hz représentant chaque octave.

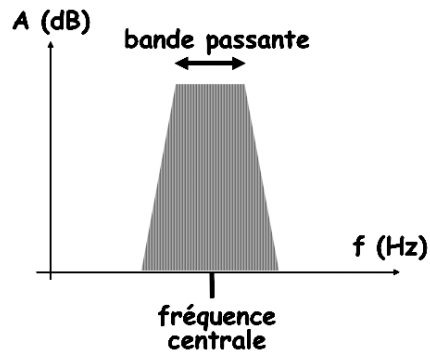


5.2.2 Les filtres

Un filtre est un système qui peut réagir de façon préférentielle à une bande de fréquences particulières. Il « laisse passer » les composantes à ces fréquences et atténue les autres.

Un filtre est défini par :

- sa largeur de bande passante
- sa fréquence centrale ou ses fréquences de coupure
- sa constante de temps

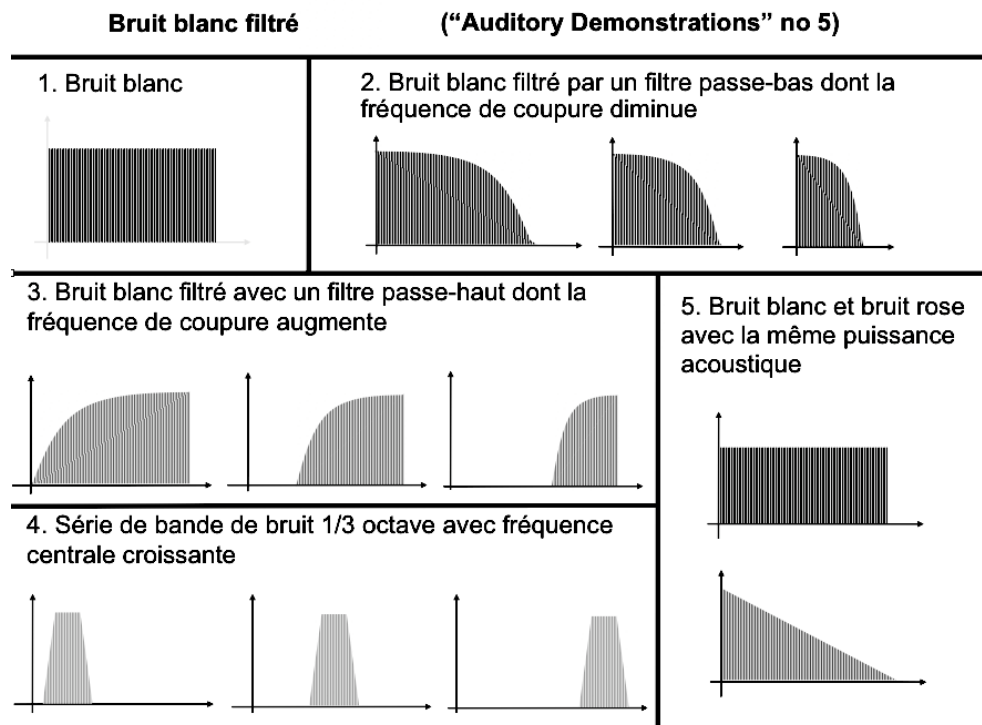


Bande passante

La bande passante d'un filtre est l'ensemble des fréquences qui pourront le traverser. Les fréquences limites de la bande passante sont les *fréquences de coupure*.

En fonction du type de fréquences que le filtre laisse passer, on le nomme :

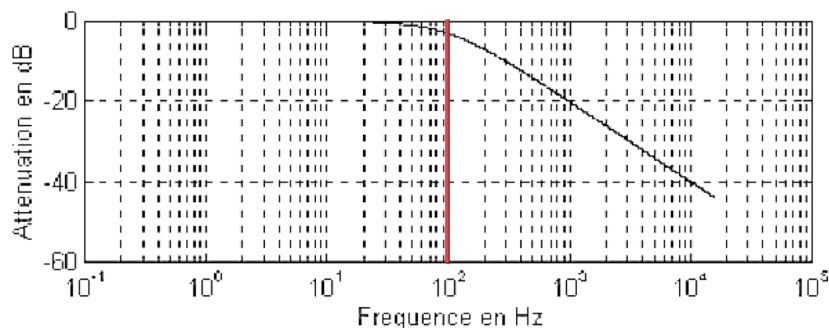
- filtre passe-bas (laisse passer les basses fréquences en-dessous d'une fréquence limite)
- filtre passe-bande (laisse passer une bande de fréquences entre deux fréquences limites)
- filtre passe-haut (laisse passer les hautes fréquences au-dessus d'une fréquence limite)
- filtre réjecteur de fréquence (laisse passer toutes les fréquences sauf une très fine bande autour d'une fréquence)



Fréquences de coupure

Pour un filtre passe-bande, les fréquences de coupures du filtre sont les deux fréquences situées de part et d'autre de la fréquence centrale qui sont transmises avec une intensité de 3 dB inférieure à celle de la fréquence centrale.

Pour un filtre passe-haut ou passe-bas, il n'y a qu'une seule fréquence de coupure, à - 3 dB sous le niveau maximum.



Rappel : - 3 dB correspond à une diminution de la puissance par un facteur 2.

$$n = 10 \log \left(\frac{P_{fc}}{P_{\max}} \right) = 10 \log \left(\frac{1}{2} \right) = 10 \times (-0,3) = -3 \text{ dB}$$

Constante de temps

On appelle constante de temps le temps que met un filtre pour atteindre 90 % de son régime permanent, lorsqu'on lui applique brusquement un signal. On désigne la constante de temps par le symbole τ (tau : t grec) ou par l'expression Δt .

La largeur de bande passante et la constante de temps sont inverses l'une de l'autre :

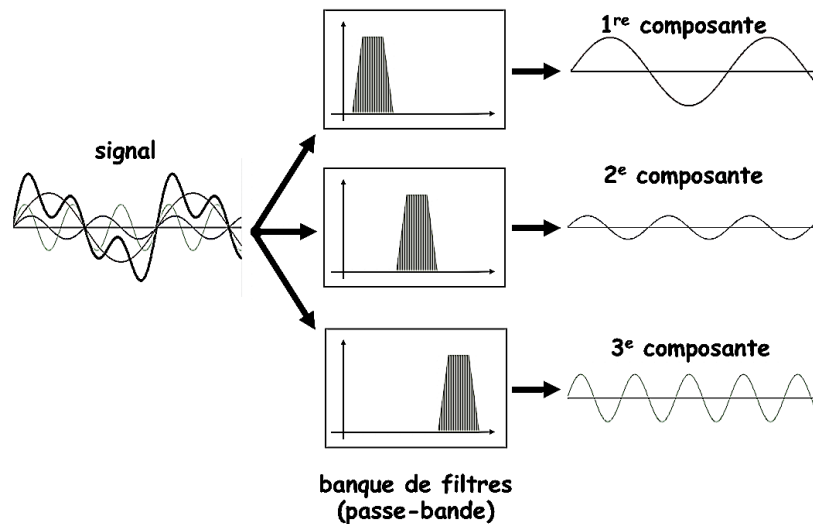
$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f}$$

Cette relation indique que *plus la bande passante est étroite, plus le filtre est lent à réagir*. Un filtre à forte pente est plus difficile à réaliser techniquement (donc cher ou lourd au niveau de la charge de calcul sur un microprocesseur).

5.3 La notion de bande critique

5.3.1 Définition générale

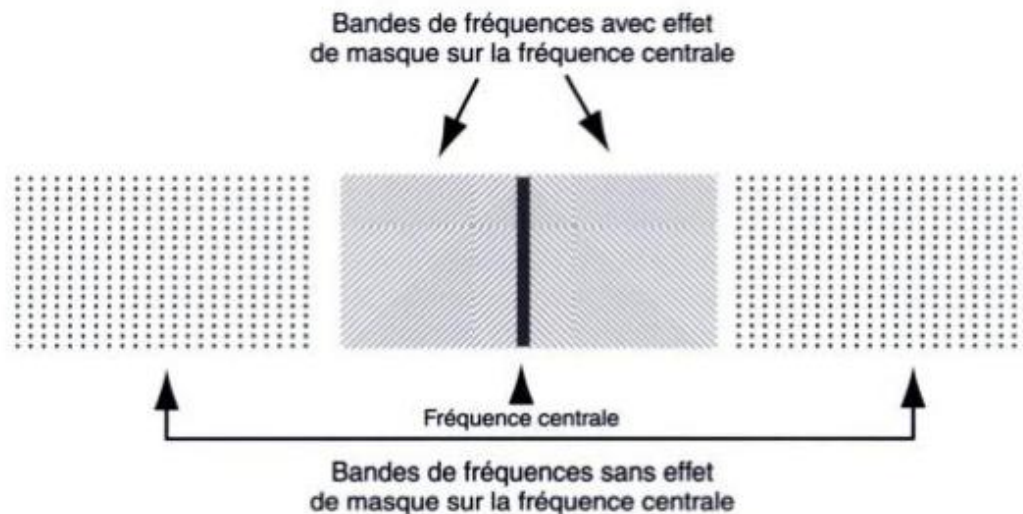
La bande critique est la largeur de bande des « filtres auditifs » de l'oreille interne. Elle peut donc être comparée à un filtre passe-bande psychoacoustique centré sur une fréquence. En quelque sorte, l'oreille interne (la cochlée) se comporte comme une banque de filtres passe-bande qui « analysent » les sons complexes faisant vibrer la membrane basilaire et les décomposent en leurs composantes sinusoïdales (cf. figure ci-après).



Les bandes critiques se manifestent de différentes manières, notamment dans l'effet de masque et la sensation d'intensité sonore en cas de sommation.

Dans le cas de la sonie de deux sons purs simultanés d'intensité moyenne ou forte et de fréquences voisines, la sonie reste la même tant que l'écart de ces deux fréquences est inférieur à la largeur de la bande critique. Dès que cet écart dépasse la valeur critique, la sonie augmente.

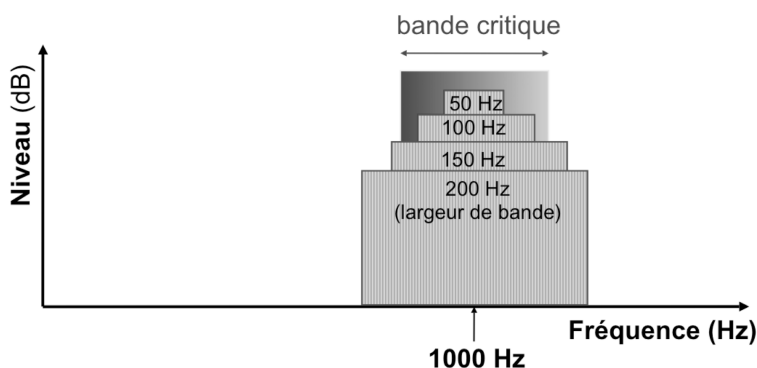
Dans le cas de l'effet de masque à faible intensité, un son pur est essentiellement masqué par les fréquences contenues dans cette bande critique centrée sur sa propre fréquence. Si le niveau d'intensité s'élève, la zone masquée s'étend.



5.3.2 Largeur de la bande critique

Une expérience classique permettant d'évaluer la largeur de la bande critique consiste à présenter à l'auditeur des bandes de bruit de différentes largeurs mais d'énergie constante (au-

trement dit, si la largeur de bande est réduite de moitié, l'énergie de la bande est accrue de 3 dB, donc doublée, afin de conserver l'énergie totale constante). Dans ce contexte, la largeur de la bande critique correspond à la largeur de la bande de bruit en-deçà de laquelle la sonie reste constante. Dans l'exemple représenté ci-dessous, l'auditeur percevrait une différence de sonie entre la bande de 150 Hz et la bande de 100 Hz de large, mais il ne percevrait pas de différence de sonie entre la bande de 100 Hz et la bande de 50 Hz de large, puisqu'elles sont toutes les deux situées à l'intérieur de la bande critique.



La largeur de bande ERB – *Equivalent Rectangular Bandwidth*

Les différentes méthodes utilisées pour la mesure de la bande critique (par Zwicker, Moore, etc.) expliquent l'obtention de résultats expérimentaux menant à l'établissement de plusieurs modèles qui diffèrent légèrement, surtout dans les basses fréquences.

L'ERB (*Equivalent Rectangular Bandwidth*) est mesurée à l'aide de la méthode du bruit à bande réjectée (*notched-noise*) plutôt que via les expériences classiques de masquage impliquant un bruit masquant à bande étroite et un son pur masqué (*cf.* sections suivantes). Les psychoacousticiens modernes utilisent la formule suivante pour estimer la largeur de bande ERB :

$$\text{ERB} = 24,7(4,37 F + 1) = 108 F + 24,7 \quad \text{où } F \text{ est la fréquence centrale en kHz du filtre auditif correspondant.}^1$$

Exemple : À 1 000 Hz, $\text{ERB} = 24,7((4,37 \times 1) + 1) = 132,6 \text{ Hz}$

f	ERB	(ERB/f)	f	ERB	(ERB/f)	f	ERB	(ERB/f)
100 Hz	35,5 Hz	(35 %)	500 Hz	78,7 Hz	(16 %)	1300 Hz	165 Hz	(12,7 %)
150 Hz	41 Hz	(27 %)	600 Hz	89,5 Hz	(15 %)	1500 Hz	186,6 Hz	(12,5 %)
200 Hz	46,3 Hz	(23 %)	700 Hz	100,3 Hz	(14 %)	1700 Hz	208,2 Hz	(12,2 %)
250 Hz	51,7 Hz	(21 %)	800 Hz	111 Hz	(13,8 %)	2000 Hz	240,6 Hz	(12 %)
300 Hz	57 Hz	(19 %)	900 Hz	121,8 Hz	(13,5 %)	2250 Hz	267,6 Hz	(11,9 %)
350 Hz	62,5 Hz	(18 %)	1000 Hz	132,6 Hz	(13,2 %)	2500 Hz	294,5 Hz	(11,8 %)
400 Hz	68 Hz	(17 %)	1150 Hz	148,9 Hz	(13 %)	3000 Hz	348,5 Hz	(11,6 %)

Dans ce tableau, on peut voir que la largeur relative du filtre auditive diminue avec la fréquence. À basse fréquence, la largeur de la bande critique vaut approximativement 30 % de la fréquence centrale (l'équivalent d'une quarte). À haute fréquence, la largeur de la bande critique tombe à 12 % de la fréquence centrale (l'équivalent d'une seconde majeure).

¹B. C. J. Moore and B. R. Glasberg, « A revision of Zwicker's loudness model », 1996.

L'échelle de Bark

L'échelle de Bark est une échelle plus ancienne mais qui est encore utilisée. Elle a été proposée par Eberhard Zwicker² en 1961. Son nom évoque le psychoacousticien Heinrich Barkhausen qui proposa la première mesure subjective de la sonie. L'échelle de Bark est divisée en 25 bandes critiques.

Une formule permettant d'évaluer la largeur de la bande critique en Bark a été proposée par H. Traunmüller³ :

$$z = \frac{26,81}{(1 + 1960/f)} - 0,53 \quad \text{où la fréquence centrale } f \text{ est exprimée en Hz.}$$

Bande critique	Fréquence (Hz)		
	Minimum	Maximum	Largeur
0	0	100	100
1	100	200	100
2	200	300	100
3	300	400	100
4	400	510	110
5	510	630	120
6	630	770	140
7	770	920	150
8	920	1080	160
9	1080	1270	190
10	1270	1480	210
11	1480	1720	240
12	1720	2000	280
13	2000	2320	320
14	2320	2700	380
15	2700	3150	450
16	3150	3700	550
17	3700	4400	700
18	4400	5300	900
19	5300	6400	1100
20	6400	7700	1300
21	7700	9500	1800
22	9500	12000	2500
23	12000	15500	3500
24	15500	22050	6550

De la bande 0 à la bande 3, la largeur est constante (accroissement linéaire)

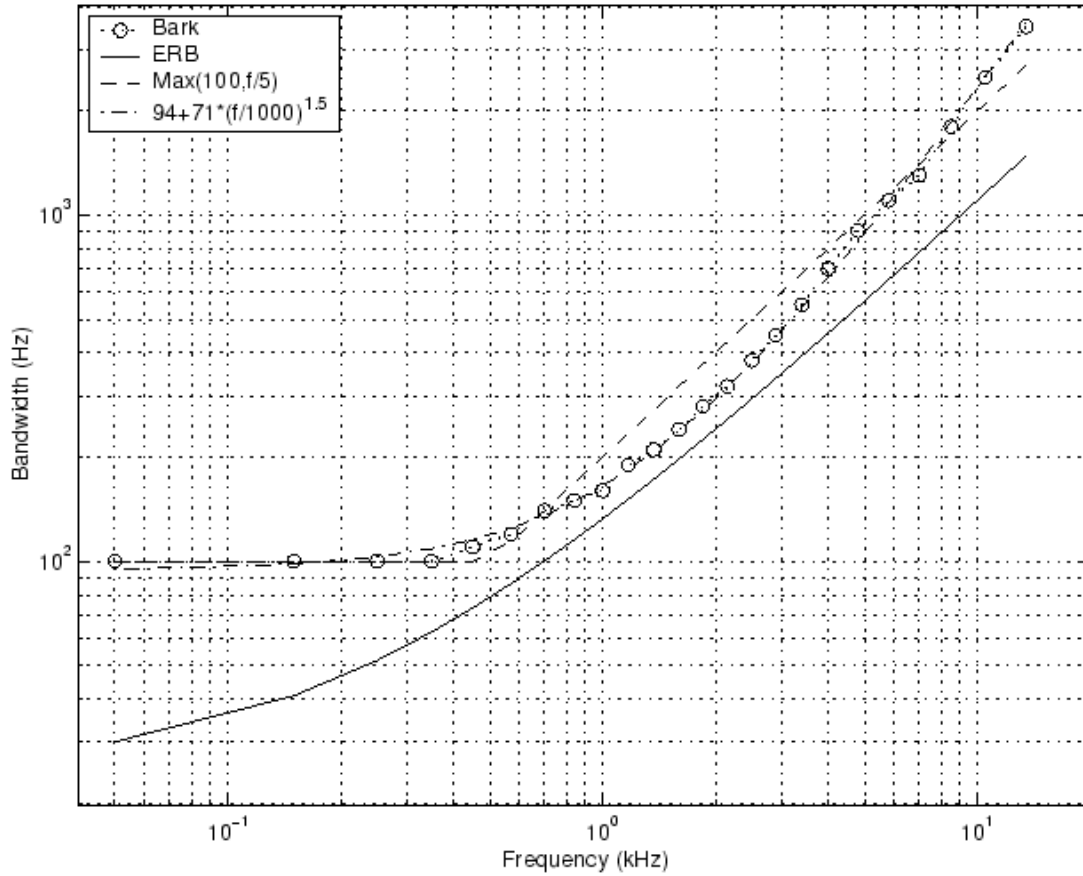
À partir de 4^e bande, la largeur augmente logarithmiquement et vaut approximativement 20 % de la fréquence minimum, ce qui correspond à une tierce mineure.

²Zwicker, E. (1961), « Subdivision of the audible frequency range into critical bands », The Journal of the Acoustical Society of America, 33.

³H. Traunmüller (1990), « Analytical expressions for the tonotopic sensory scale », The Journal of the Acoustical Society of America, 88 : 97-100.

Comparaison de l'échelle ERB et de l'échelle de Bark

Comme on peut l'observer sur le graphique ci-dessous, l'échelle de Bark (représentée par des cercles) et l'échelle ERB (représentée par un trait continu) s'écartent dans les basses fréquences. Ces écarts s'expliquent par l'utilisation de méthodes de mesure différentes pour l'évaluation de la bande critique.



5.4 Sommation d'énergie ou de sonie

Les bandes critiques permettent d'expliquer les comportements variables de notre système auditif pour la perception de l'intensité selon que les composantes du son perçu sont proches ou éloignées, stimulant une bande critique unique ou plusieurs bandes critiques adjacentes.

Ainsi, si la largeur d'une bande de bruit est inférieure à la bande critique, il y a une **sommation de l'énergie**. Appliquant la loi de puissance de Stevens, on obtient :

$$\text{sonie totale} = k (I_1 + I_2 + I_3 + \dots)^{0,3}$$

où $I_1, I_2, \dots$ sont les intensités des composantes fréquentielles du bruit.

Si la largeur de bande de bruit est supérieure à la bande critique, il y a une **sommation de sonie**.

$$\begin{aligned}\text{sonie totale} &= \text{sonie}_1 + \text{sonie}_2 + \text{sonie}_3 + \dots \\ &= kI_1^{0,3} + kI_2^{0,3} + kI_3^{0,3} + \dots\end{aligned}$$

où sonie_n est la sonie dans la bande critique n . Dans ce cas, la sonie totale obtenue est plus élevée que dans le cas de la sommation d'énergie.

La sommation de la sonie s'applique dans le cas d'un son complexe harmonique par exemple, du moins pour les composantes dans les basses fréquences qui se retrouvent dans des bandes critiques distinctes. On pourrait considérer par exemple un son complexe comprenant trois partiels d'intensité 4, 5 et 6 respectivement. Si les trois composantes se situent dans la même bande critique, on obtient une sonie proportionnelle à :

$$(4 + 5 + 6)^{0,3} = 2,25$$

Mais si les trois composantes se situent dans des bandes critiques distinctes, on obtient une sonie plus élevée et proportionnelle à :

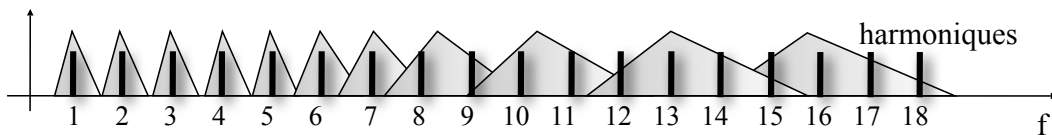
$$(4^{0,3} + 5^{0,3} + 6^{0,3}) = 4,85$$

puisque que ce sont les sonies qui sont additionnées dans ce cas, et non plus les énergies.

5.5 Autres implications des bandes critiques

La résolution des harmoniques d'un son complexe

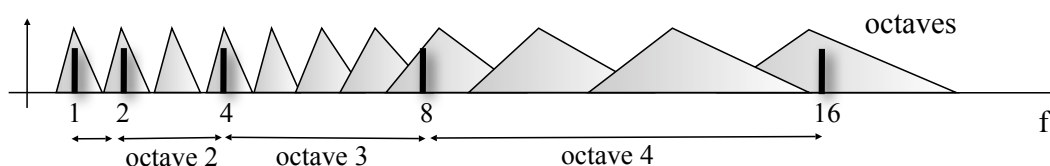
Comme d'une part, les harmoniques d'un son complexe sont réparties linéairement le long de l'axe des fréquences (puisqu'elles sont séparées par des intervalles exprimés en Hz constants) et que d'autre part, la largeur absolue des bandes critiques augmente avec la fréquence, on peut en déduire que les bandes critiques comprennent de plus en plus d'harmoniques vers les hautes fréquences. Les premières harmoniques sont donc facilement discriminées, mais les harmoniques d'ordre plus élevé ont tendance à fusionner en un objet auditif unique. On dira qu'elles ne sont pas « résolues » indépendamment.



La distance fréquentielle minimale entre les voix

Dans ce cas-ci, on va plutôt considérer la largeur relative des bandes critiques (rapport de la largeur de bande critique absolue et de la fréquence centrale : ERB/f) et la répartition des octaves le long de l'axe des fréquences, que l'on définit par des puissances de 2 (1, 2, 4, 8,

16, etc.) La largeur relative des bandes critiques diminue avec la fréquence et de ce fait, les bandes critiques correspondent à des intervalles musicaux de plus en plus petits vers les hautes fréquences. Comme illustré sur la figure ci-dessous, les bandes critiques peuvent s'étendre sur de larges intervalles dans le grave (jusqu'à une octave selon l'échelle de Bark) tandis que dans l'aigu, plusieurs bandes critiques séparent les extrémités d'une octave. Ceci explique pourquoi, pour bien distinguer les voix dans le registre grave, elles doivent être séparées davantage que les voix dans le registre aigu. Par exemple, dans l'opéra classique, on retrouve généralement un intervalle d'octave entre une voix de basse et une voix de ténor, mais juste une tierce entre une voix de contre-alto et une voix de soprano.



5.6 Le phénomène de masquage

5.6.1 Définitions

L'**effet de masque** ou le **masquage** désigne le phénomène par lequel la présence d'un son peut empêcher la perception d'un autre son qui autrement serait audible. Autrement dit, le seuil d'audibilité d'un son, appelé « signal », est élevé par la présence d'un autre son, appelé « son masquant » ou « masque ». Cet effet est important dans le contexte de l'analyse de la scène auditive, du mixage, de l'écriture musicale, des techniques de compression destructives (comme le minidisc et le MP3) etc. On peut trouver des similitudes avec le masquage visuel.

Le **son masquant** est donc un son dont la présence rendra plus difficile la perception du « signal ». On aurait pu conserver le mot « bruit », qui dans le contexte de la communication d'information, a le même sens⁴, mais le terme « bruit » désignant dans de nombreuses expériences un type de son de laboratoire bien particulier, mis la plupart du temps en opposition avec « son pur », le terme de « masquant » évite toute confusion.

Le **son masqué** est le son qu'on cherche à percevoir et dont on mesure le seuil en présence du « masquant ». Le son masqué est normalement constitué d'un son pur, ou d'une bande étroite de bruit. Le son masqué peut aussi s'appeler « son test » (en anglais : *probe tone*).

La **courbe d'effet de masque** (*masking pattern*) ou **seuil masqué** est une courbe similaire à la courbe de seuil d'audition (courbe de plus bas niveau parmi les courbes d'isotonie). Elle s'obtient de la même manière et représente en abscisse la fréquence du signal (son masqué), et en ordonnée l'intensité qu'il doit avoir pour être tout juste perceptible, avec la différence que le signal est entendu en même temps qu'un son masquant dont les caractéristiques doivent être décrites avec précision.

⁴Dans le domaine des télécommunications, la mesure du *rapport signal-sur-bruit* (ou SNR pour *Signal-to-Noise Ratio*) est fondamentale.

Dans les **expériences de masque**, on cherche à connaître la répartition spatiale (en fonction de la fréquence) de l'activité neurologique provoquée par le masquant qui constitue le stimulus d'une telle expérience. L'effet de masque (du masquant), a pour effet d'élever le seuil de perception du masqué. On suppose que si le masqué ne peut plus être entendu, c'est que le masquant provoque l'activité des neurones qui, en son absence, auraient été excités par le masqué. La **courbe d'effet de masque** représente ainsi l'ensemble des régions, ou des cellules, excitées par le stimulus. Le niveau d'élévation du seuil du « son test » constitue donc une mesure quantitative de l'effet de masque, lui même nous informant sur l'excitation provoquée par le stimulus.

Les **bruits** sont caractérisés par un spectre continu, pouvant présenter des concentrations d'énergie à certaines fréquences. Le **bruit blanc** est le bruit « idéal », en ce sens que l'énergie qu'il contient est statistiquement égale à toutes les fréquences. Il résulte de variations parfaitement aléatoires de la pression atmosphérique et il ne présente donc aucune périodicité. Dans les expériences de masque, on utilisera souvent des **bandes de bruit**, qu'on obtient en filtrant le bruit blanc à l'aide de filtres de bandes passantes plus ou moins étroites. Plus on réduit la largeur du filtre, plus le bruit se rapproche d'un son sinusoïdal.

5.7 Mise en évidence de l'existence de bandes critiques : les expériences de masque

À partir du moment où on a découvert que l'effet de masque du masquant sur le masqué dépend à la fois de la fréquence du masqué et du spectre du masquant, on a utilisé ce phénomène dans d'innombrables expériences destinées à étudier le type d'analyse spectrale effectuée par le système auditif, un des sujets les plus controversés de l'histoire de la psychoacoustique. Parmi celles-ci, nous décrirons les plus classiques et dont les résultats mettent bien en évidence les principales caractéristiques connues de cet « analyseur auditif ».

Presque toutes ces expériences étudient l'interaction de diverses combinaisons de sons purs et de bruits. Quoique, à première vue, elles puissent paraître fort éloignées de la réalité, on verra au contraire qu'elles révèlent des phénomènes qui sont vécus si quotidiennement qu'on n'y prête jamais attention.

5.7.1 1^e expérience par Feldtkeller et Zwicker (1956) : masque d'un son pur par un bruit

Le son masquant est constitué d'un bruit et le son test d'un son sinusoïdal. La tâche à accomplir lors de cet expérience consiste à ajuster l'intensité du son test pour qu'il soit tout juste perceptible, la fréquence du son test effectuant un lent balayage de fréquences (selon la méthode de Békésy). Les niveaux ainsi obtenus donnent le seuil masqué du son test.

Résultats :

Si le masquant est un **bruit blanc**, le seuil masqué ne suit pas exactement la forme du spectre du bruit blanc, c'est-à-dire une courbe droite horizontale :

- Aux très basses fréquences, le seuil masqué rejoint le seuil absolu.
- Jusqu'à 500 Hz, la courbe est droite et semblable au spectre du bruit blanc.
- Au-dessus de 500 Hz, le seuil s'élève en fonction de la fréquence.

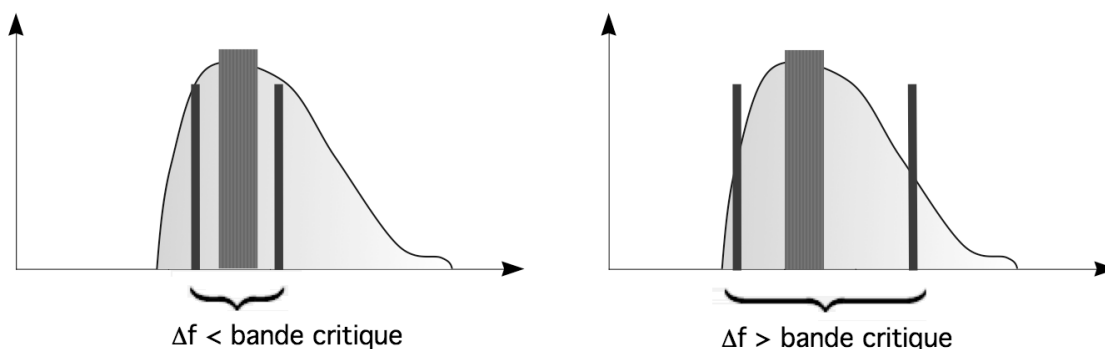
Tout se passe comme si, au-dessus de 500 Hz, l'oreille rassemblerait, pour masquer le son test, la puissance de zones de fréquences de plus en plus grandes. Ceci est d'ailleurs confirmé par toutes les autres expériences de masque.

Si le masquant est une **bande très étroite de bruit**, le seuil masqué apparaît comme une courbe remarquablement plus large que le spectre du masquant, surtout dans les fréquences supérieures à celle du masquant. On en déduit que le masquant excite une bande assez large de la membrane basilaire (et donc de l'organe de Corti). On appellera cette bande la bande critique et sa largeur sera définie comme celle des filtres, par les fréquences pour lesquelles le seuil masqué sera de 3 dB inférieur au seuil le plus élevé de la courbe d'effet de masque.

Si on refait l'expérience pour plusieurs fréquences du masquant, on découvre que la largeur de cette bande varie. Pour les fréquences inférieures à 500 Hz, elle est linéaire, c'est-à-dire qu'elle est constante, exprimée en nombre de Hz (environ 100 Hz). Au-dessus de 500 Hz, elle devient logarithmique, c'est-à-dire qu'elle est constante si on l'exprime comme un pourcentage de la fréquence du son masquant (environ 20%). On retrouve ces valeurs de largeur de bande critique dans l'échelle de Bark définie par Zwicker.

5.7.2 2^e expérience : masque d'une bande étroite de bruit par deux sons purs

Dans cette expérience, le participant reçoit comme masquant deux sons purs, dont les fréquences sont situées de part et d'autre de celle du masqué, une bande de bruit étroite, dont le niveau est augmenté progressivement jusqu'à ce qu'il soit tout juste audible (seuil). L'expérience est refaite plusieurs fois, pour des distances de plus en plus grandes entre les sons purs masquants.



Résultats :

On observe que le seuil masqué varie peu tant que la distance entre les deux masquants reste inférieure à une valeur « critique », au-delà de laquelle il décroît rapidement. Cette valeur Δf ($f_1 - f_2$) constitue une mesure de la largeur de la bande critique.

On explique ce phénomène par le fait que chacune des fréquences masquantes provoque l'excitation d'une région de la membrane basilaire. Quand elles sont rapprochées, elles font vibrer la région qui aurait du être excitée par le son test. Quand elles sont éloignées, leurs zones d'influence sont aussi éloignées et laissent non excitée la zone propre du son test qui pourra être perçu plus facilement. Autrement dit, si les sons masquants sont assez éloignés, ils ne fournissent

plus suffisamment d'énergie au filtre auditif centré sur le son masqué, et de ce fait, ne participent plus au masquage de ce dernier.

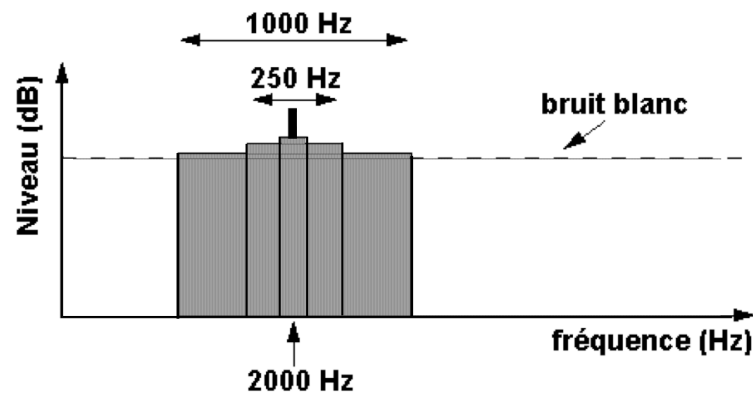
Le terme « critique » est important : il signifie que le passage du seuil masqué élevé au seuil masqué bas n'est pas représenté par une courbe décroissant progressivement en fonction de la distance entre les deux masquants, mais qu'elle présente un coude, qu'il y a un changement brusque à partir d'une valeur précise de cette distance.

NB : Cette expérience peut servir à la mesure des bandes critiques.

5.7.3 3^e expérience :

masque d'un son pur par une bande de bruit de largeur croissante

Cette 3^e expérience, proposée initialement par Fletcher dans les années 1940, confirme les résultats des deux précédentes. Au cours de cette expérience, le participant reçoit comme stimulus une bande de bruit d'abord étroite, et puis de plus en plus large, centrée sur la fréquence à laquelle sera ajusté le son test (par exemple 2000 Hz). À nouveau, on recherche le niveau pour lequel ce son test sera tout juste audible. Il est important de noter que l'intensité totale du masquant, est maintenue constante alors qu'on élargit la largeur de la bande. Ceci implique que l'on réduit le niveau de la bande de bruit de 3 dB à chaque fois que l'on double sa largeur de bande (largeur de bande $\times$ niveau du spectre = constante).



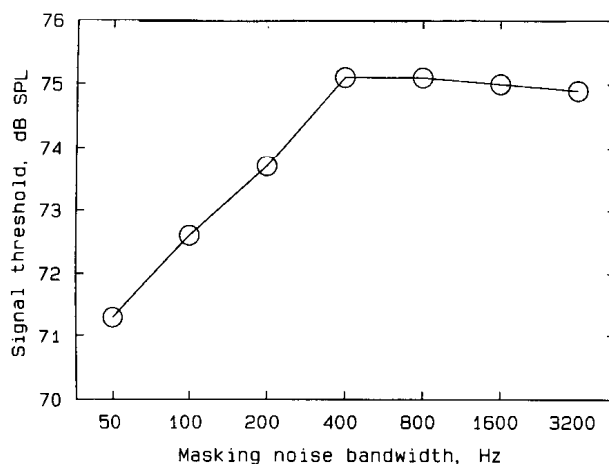
Résultats :

On constate que tant que la largeur de la bande de bruit reste inférieure à une valeur « critique », le seuil du masqué varie peu. Au-delà de cette largeur, il baisse rapidement.

On explique à nouveau ce résultat en supposant que dans un bruit à large bande, seule l'énergie contenue à l'intérieur d'une zone de fréquences limitée est utilisée pour masquer le son test. Quand la bande est étroite, toute l'énergie du son se trouve dans cette zone et l'effet masquant est très important. Quand la bande de bruit est large, l'énergie totale étant maintenue constante, la même zone de fréquences reçoit moins d'énergie et l'effet de masque est moins marqué.

Les auditeurs participant à ce type d'expérience sont généralement surpris du résultat, car à énergie totale égale, la sonie du son complexe à large bande est beaucoup plus grande, les participants s'attendent donc à un effet de masque plus important.

Dans le cas de ce 3^e type d'expérience de masque, la **bande critique** est la largeur de bande de bruit à partir de laquelle l'effet de masque commence à décroître. Le graphique ci-dessous, donnant le seuil du son masqué en fonction de la largeur de bande du bruit masquant, présente des résultats expérimentaux typiques. De 3200 à 400 Hz, le seuil du son masqué est constant. Mais en-deçà de 400 Hz, le seuil diminue car l'effet de masque commence à décroître. La bande critique correspond à la largeur de bande « critique » où le changement de comportement du système auditif se produit (dans ce cas-ci, ce serait 400 Hz).



Variante

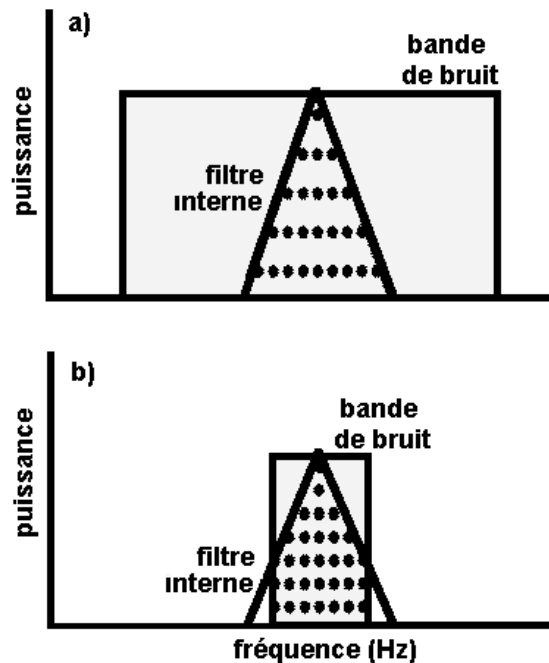
Une variante de cette expérience de masquage d'un son pur par une bande de bruit consiste à faire entendre un son pur à 2000 Hz présenté en 10 intensités décroissantes par paliers de 5 dB. Le son est masqué successivement par un bruit blanc, puis par des bandes de bruit de largeur 1000, 250 et 10 Hz respectivement, toutes centrées sur 2000 Hz, la fréquence du son masqué. Le participant doit compter le nombre de paliers qu'il entend dans chaque cas.

Si le niveau est bien ajusté, en l'absence du son masquant, on peut entendre les 10 paliers. Mais en présence du bruit blanc et des bandes de bruit larges, on peut seulement entendre 5 paliers environ. Il n'y a pas de changement lors du passage à des largeurs de 1000 et 250 Hz, alors que le son masquant est clairement perçu moins intense (à énergie totale égale, la sonie d'un son complexe à large bande est beaucoup plus grande). Lors du passage à 10 Hz de largeur de bande, on peut entendre plus de paliers (autour de 7 paliers typiquement). Ceci s'explique par le fait que la bande de bruit est alors plus étroite que le filtre auditif centré à la fréquence du son masqué, et il y a donc moins d'énergie qui vient perturber le son à 2000 Hz dans cette zone.

En résumé

Seule l'énergie contenue dans une bande critique a un effet masquant. Donc, si la largeur de bande du son masquant s'élargit, seule la partie qui se situe à l'intérieur de la bande critique masque le son masqué.

La figure suivante représente le « filtre interne » (triangle) en présence d'un bruit à large bande (a) et d'un bruit à bande étroite (b).



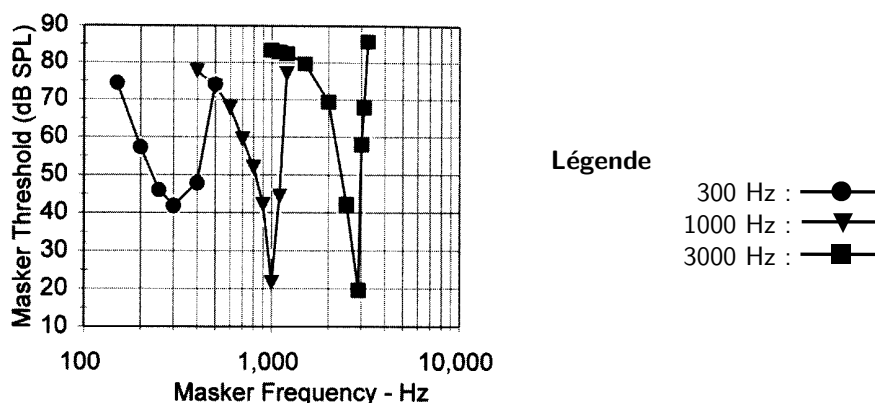
Le bruit à large bande (a) produit une puissance maximale à la sortie du filtre interne. Par contre, la largeur de bande du bruit à bande étroite (b) est inférieure à la largeur de bande du filtre interne (l'aire commune est plus petite). L'effet de masque sera donc plus important pour un signal dont la fréquence est au centre du filtre interne dans le cas du bruit à large bande car la totalité du filtre auditif est sollicitée.

5.7.4 4^e expérience : masquage tonal (masque d'un son pur par un son pur) et courbes d'accord psychophysique

Le masquage tonal consiste à masquer un son pur par un autre son pur. Plus le masque doit être fort pour couvrir le signal, moins le masque est efficace. Plus le masque est faible, plus il est efficace.

Les courbes d'accord psychophysique présentent, en fonction de la fréquence, le niveau d'intensité du son masquant nécessaire pour masquer le signal (qui est un son pur à une fréquence fixe). Plus on s'éloigne de la fréquence à masquer, plus le niveau du son masquant doit être élevé pour obtenir le même effet de masquage. Ces courbes d'accord psychophysique sont similaires aux courbes d'accord neural mesurée chez les animaux.

Sur la figure ci-dessous sont présentées trois courbes d'accord psychophysique pour le masquage simultané d'un signal à 300 Hz, 1000 Hz et 3000 Hz.

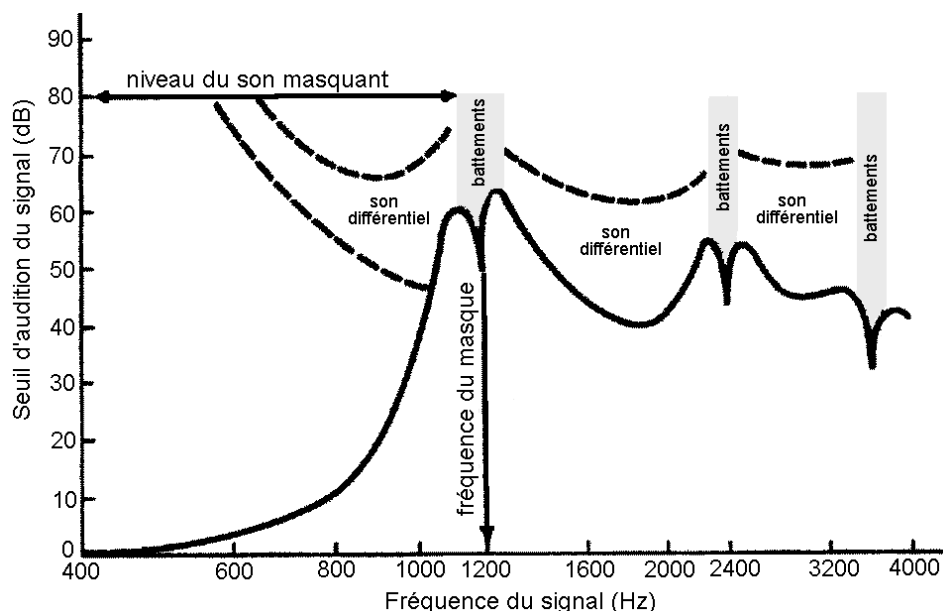


5.8 Les courbes d'effet de masque

Une étude classique menée par Wegel et Lane en 1924 visait à observer l'interaction entre deux sons purs présentés simultanément. Le son masquant (f_1) est présenté à un niveau fixe (en dB SPL) et le seuil masqué pour le signal à détecter (f_2) est déterminé pour différentes fréquences. La courbe obtenue est une *courbe d'effet de masque* qui représente la quantité de masquage produit par un son masquant donné en fonction de la fréquence du signal masqué.

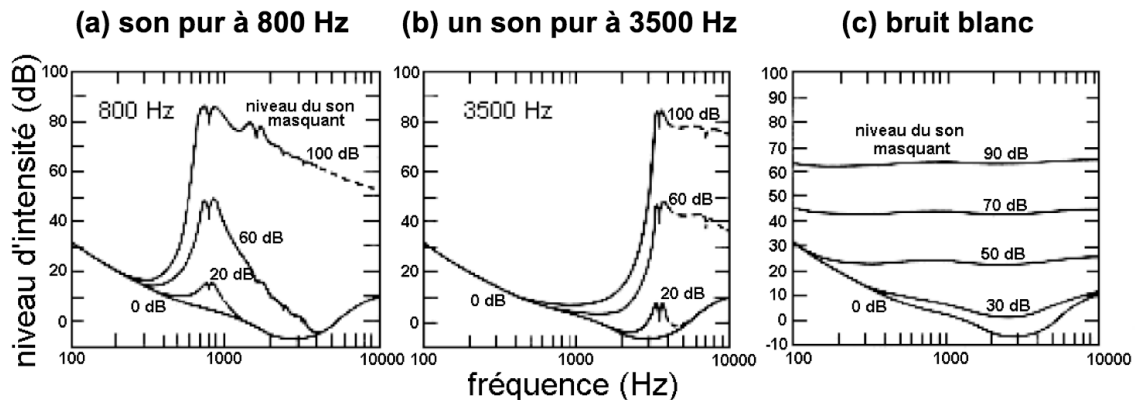
La courbe du seuil masqué ci-dessous met en évidence la présence des *non-linéarités* de l'oreille lorsque le son présenté est à fort niveau (le masque est ici à 80 dB SPL). Ces non-linéarités se manifestent par la présence de *battements* dans la région des fréquences harmoniques du signal ($2f_2, 3f_2, \dots$) et par la présence de *sons différentiels* qui sont des sons dont la fréquence correspond à la différence des deux sons en présence ($f_1 - f_2$).

On remarque aussi une forte *asymétrie* de l'effet de masque, qui est plus efficace pour des *fréquences supérieures* à la fréquence du masque. Ceci pourrait expliquer pourquoi il faut plus de femmes que d'hommes dans les chœurs pour obtenir un équilibre sonore.



Courbes d'effet de masque en fonction de l'intensité du son masquant

Les figures ci-dessous présentent des courbes d'effet de masque pour des sons purs (a, b) et du bruit blanc (c) et pour différentes valeurs de niveau d'intensité du son masquant⁵.



Dans le cas d'un masque « son pur » (a, b), on remarque encore ici l'asymétrie du masquage (*upward spread of masking* ou étalement du masquage vers le haut).

Dans le cas d'un masque « bruit blanc » (c), plus on augmente le niveau du bruit, moins le seuil du signal dépend de la fréquence (la courbe d'effet de masque s'aplatit).

Application de la courbe d'effet de masque à la compression audio

La compression audio a pour but de réduire la taille d'un fichier audio. Une compression audio est dite « destructrice » ou « avec perte » quand on ne peut plus récupérer les données originales à partir des données compressées. C'est le cas de la technique de compression MPEG-1/2 Audio Layer 3, mieux connue sous son abréviation de MP3, du standard MPEG-1 du Moving Picture Experts Group. Cet algorithme est basé sur un modèle psychoacoustique du phénomène de masquage et permet de réduire drastiquement la quantité de données nécessaire pour coder l'information sonore avec une perte de qualité sonore acceptable pour l'oreille humaine.

Des variantes de cet algorithme (OGG Vorbis, AAC, etc.) présentent des niveaux de qualité sonore différents (souvent meilleurs que le MP3) pour un taux de compression donné.

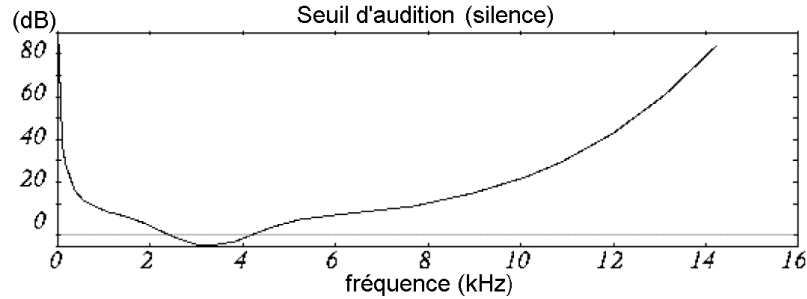
Voici la procédure appliquée dans un algorithme de compression audio de type MP3 :

- on utilise des filtres pour diviser le signal audio (échantillonné à 48 kHz, par exemple) en sous-bandes correspondant approximativement aux 32 bandes critiques ;
- on détermine le niveau de masquage pour chaque bande causé par des bandes voisines utilisant un modèle psychoacoustique ;
- si la puissance d'une bande est sous le niveau de masquage, on ne l'encode pas ;
- sinon, on détermine le nombre de bits nécessaire pour représenter le coefficient, de façon à ce que le bruit introduit par la quantification soit sous le niveau de masquage (1 bit de quantification introduisant 6 dB de bruit) ;
- et finalement, on forme le flux de bits.

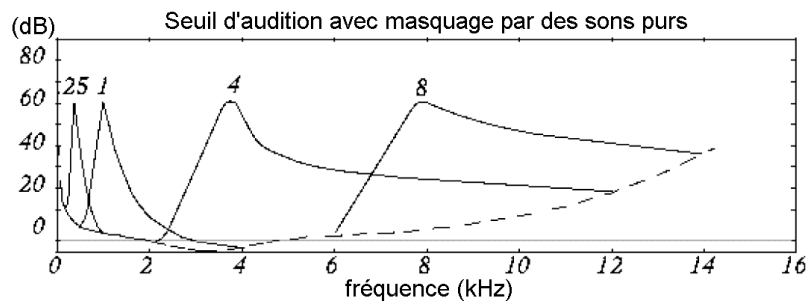
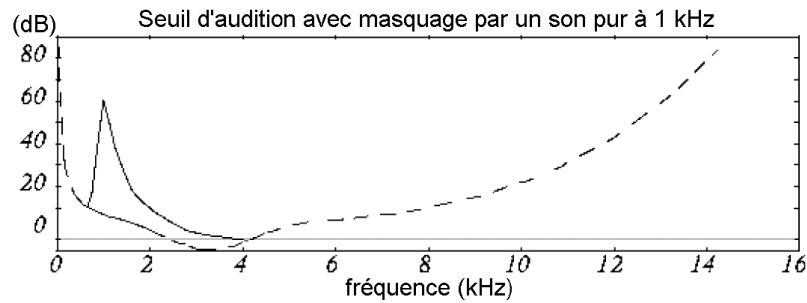
⁵Miller, Language and Communication, McGraw-Hill, N.Y., 1963, pp. 54-55.

Courbes d'effet de masque

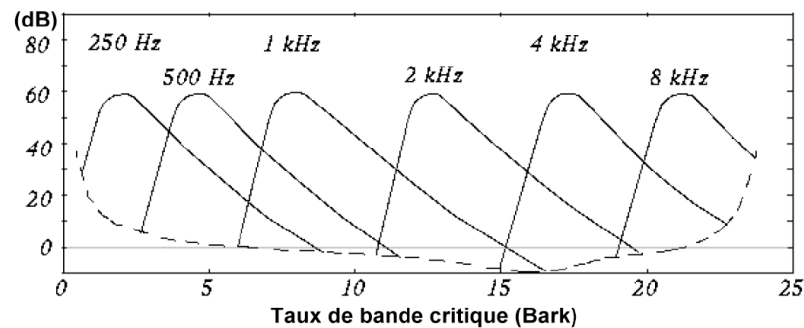
Le **seuil d'audition** est le niveau d'intensité du seuil de perception dans le silence en fonction de la fréquence. Cette courbe correspond à la première courbe d'isotonie à 4 phones.



Le **seuil de masquage par un son pur** est le niveau d'intensité du seuil de perception en présence d'un son pur masquant (à 1000 Hz par exemple) en fonction de la fréquence. Le seuil d'audition est déformé (vers le haut) dans la région du son masquant.

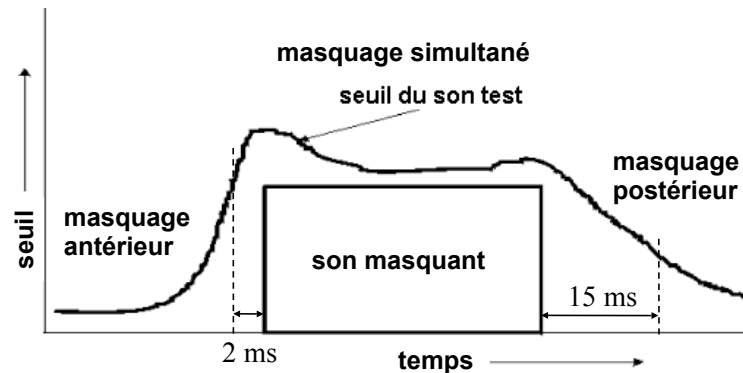


Représentées sur une échelle de fréquence en Bark (taux de bande critique), les **courbes d'effet de masque par des sons purs** ont la même largeur.



5.9 Le masquage temporel

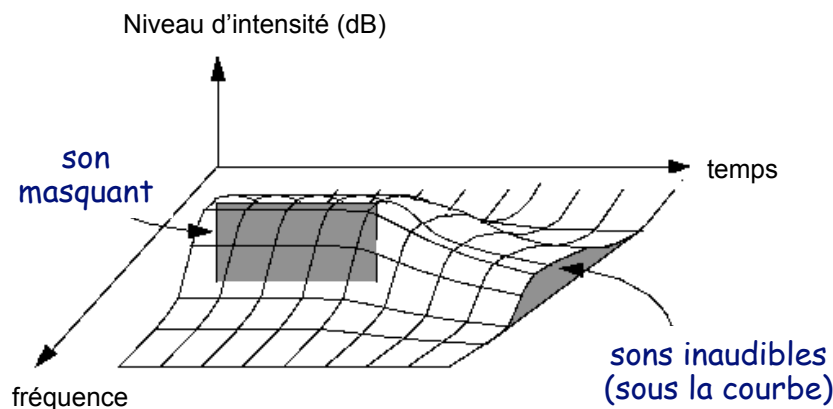
Le diagramme schématique représenté ci-dessous illustre le phénomène de masquage temporel se traduisant par un changement relatif du seuil d'audition du signal en fonction de la position temporelle du signal test par rapport au son masquant.



Le **masque postérieur** désigne le phénomène par lequel un son masquant cache un son masqué entendu postérieurement, et non plus simultanément. L'effet dépend de la durée du silence qui suit le stimulus et précède le son-test. Entre 0 et 3 ms, le seuil masqué est identique au seuil simultané ; à partir de 3 ms, il décroît progressivement, et disparaît après 200 ms. Ceci est important pour la musique, puisqu'on a calculé que les notes musicales ont des durées moyennes de 100 ms. Les attaques de notes séparées par des silences plus longs seront donc perçues plus nettes et plus percutantes car elles subiront moins de masquage temporel.

Le **masque antérieur** désigne le phénomène, à première vue plus surprenant, par lequel un stimulus peut masquer un son-test qui le précède immédiatement. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'ouïe a besoin d'un certain temps pour réagir et pour produire une sensation. Si le son antérieur est faible par rapport au son masquant, la sensation n'aura pas le temps de se former et son énergie sera intégrée à celle du son masquant.

La figure suivante représente dans un graphe à 3 dimensions le masquage simultané (en fonction de la fréquence) et le masquage temporel (en fonction du temps).



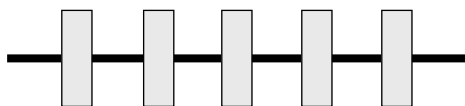
5.10 Induction auditive

Le phénomène de l'induction auditive a remplacé le phénomène de masque dans plusieurs expériences de mise en évidence de la bande critique et de recherche de la largeur de bande critique. Il a été d'abord découvert dans le domaine de la perception de la parole en présence de bruits, puis généralisé.

Dans l'expérience relative à la parole, on remplace, dans une phrase, une syllabe par un bruit perturbateur (toussotement par exemple). Si la phrase a un sens, le sujet entend très bien la syllabe manquante, même si, en enlevant le bruit perturbateur, on lui permet d'entendre le «trou». Dès qu'on représente le son bruité perturbateur à la place du trou, le sujet se remet à entendre la syllabe manquante. C'est ce qu'on pourrait appeler dans le domaine visuel le *picket fence effect* (l'effet des piquets de clôture).



Le phénomène de l'induction auditive a aussi été étudié avec des sons de laboratoire. Dans ce cas, l'auditeur reçoit en alternance des impulsions sonores de deux sons : le premier est typiquement une bande de bruit présenté à un niveau élevé, et le second est typiquement un son pur, qui sert de son-test, présenté à un niveau plus faible mais au-dessus du seuil de perception. Malgré que le son-test soit pulsé, il est perçu comme s'il continuait d'être présent en-dessous des impulsions de bruit. C'est ce qu'on appelle également le phénomène de *continuité apparente*.



Cette induction peut être observée à condition que le niveau du son-test soit inférieur à un seuil au-dessus duquel le sujet perd cette sensation de continuité et perçoit la pulsation comme telle. Une autre condition essentielle est que la fréquence du son-test doit être comprise dans le son «masquant» (le son plus fort) qui lui est perçu comme pulsé. Dès que la fréquence du son-test s'éloigne de celle du masquant, son intensité doit être de plus en plus faible pour que l'effet de continuité soit perçu. La courbe obtenue par ce nouveau type de seuil, appelé *seuil de pulsation*, est aussi une bonne représentation de la bande critique.

On en déduit une règle dont l'importance pourrait être capitale pour comprendre l'extraordinaire habileté de l'oreille musicienne à percevoir des lignes musicales dans un contexte polyphonique : s'il y a, de par le contexte, une probabilité qu'un son puisse être présent à un instant donné, et si certaines des unités périphériques excitées par un son plus fort incluent celles qui le seraient par le son plus faible anticipé, alors ce son plus faible peut être entendu comme s'il était effectivement présent.

5.11 En conclusion

Lorsqu'on parle de bandes critiques, on réfère à un dispositif du système auditif dont le mécanisme de fonctionnement permet l'analyse spectrale de l'information sonore, intégrant des zones de fréquences de façon préférentielle et différemment des autres zones.

Il ne faut pas cependant imaginer cet analyseur auditif comme composé de «filtres» de bandes passantes absolument fixes et parallèles. Tout ce passe comme si les caractéristiques du «filtre» étaient déterminées et ajustées selon le type de stimulus qui se présente, et en partie aussi, selon l'information que l'auditeur cherche à recevoir. Ce dernier aspect est essentiel : le système périphérique, l'organe récepteur, semble à tout instant télécommandé par le système nerveux central. Des études anatomiques, l'observation du fonctionnement mécanique et neurologique ne peuvent à eux seuls rendre compte de tous les phénomènes psychoacoustiques qui exigent l'attention, la coopération du sujet, sa volonté d'entendre.

La notion de bande critique interviendra chaque fois qu'on étudiera les sensations provoquées par des sons complexes, et en particulier pour l'étude de la sonie des sons complexes.

Étant donné ce mode de fonctionnement de l'ouïe, l'analyse spectrale des sons, lorsqu'on veut les mettre en rapport avec leur perception, aura souvent avantage à être faite par des filtres logarithmiques, ceux de 1/3 d'octave pouvant, sauf aux basses fréquences, constituer des approximations valables des bandes critiques auditives. On remarquera qu'une analyse de Fourier qui représente toutes les harmoniques séparément et également éloignées les unes des autres, ne rend pas compte de cette caractéristique absolument essentielles de l'audition.

