IV. Acoustique Musicale et Electro–Acoustique

I Acoustique Musicale
1 Perception de la hateur tonale & Bandes critiques
2 Intervalle et Consonance
3 Intervalles et Harmoniques
4 Consonance et harmoniques
5 Gammes et altérations

II Electro-Acoustique
1 Principe d'un microphone et d'un HP
2 Courbe de réponse en fréquence
3 Diagramme polaire d'un HP

I.1 Perception de la hauteur tonale & Bandes Critriques

- La tonie est une échelle subjective caractérisant la perception de la fréquence d'un son.
- L'échelle des mels (proposée par Stevens, Volkmann, et Newman en 1937) est une échelle faisant la correspondance entre la fréquence et la tonie.
- C'est une échelle subjective basée sur une méthode de ratio (comme l'échelle des sones) de sons purs.
- La tonie est directement liée au seuil différentiel de hauteur.
- On peut relier l'échelle en mels au stimulus en Hz par une relation logarithmique :

  $\text{Mel} = 2595 \log (1 + f/700)$

En théorie de la musique on utilise 2 échelles logarithmiques le Savart et le Cent.

Echelle du Savart : $S = 1000 \log (f_2/f_1)$

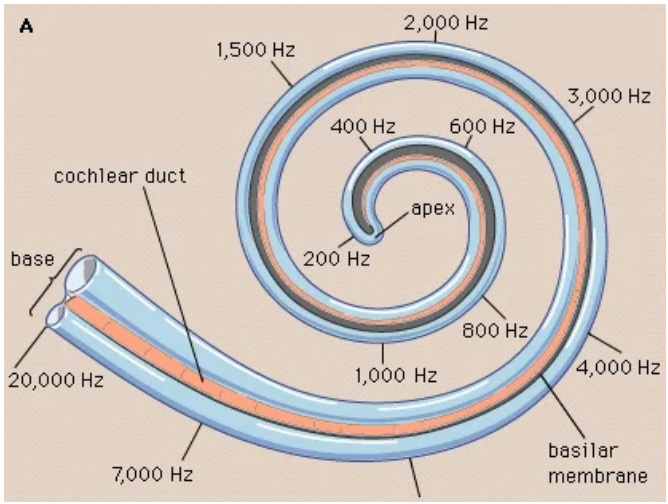
Echelle du Cent : $C = 1200 \log_2 (f_2/f_1)$

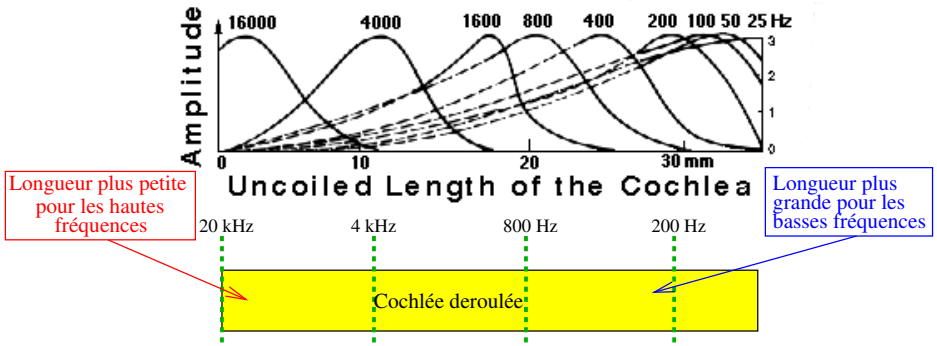
- Echelles basées sur le log du rapport de la fréquence de 2 sons.
- Un savart $\simeq$ plus petit intervalle décelable
- $1/2$ ton tempéré $\Rightarrow$ 100 cents.

Notion de bandes critiques :

- Ce sont des filtres naturels masquant la perception d'un 2^{eme} son si sa fréquence est trop proche du premier.
- Ces bandes sont reliées à l'effet de masque.

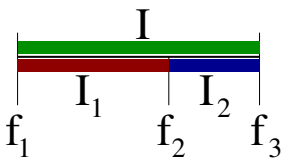
- Basse fréquence : $\Delta f \simeq 100$ Hz
- $f > 500$ Hz : $\Delta f \simeq 0,2 \times f$ (4 kHz, $\Delta f = 700$ Hz)





$I.2$ Intervalles et Consonance

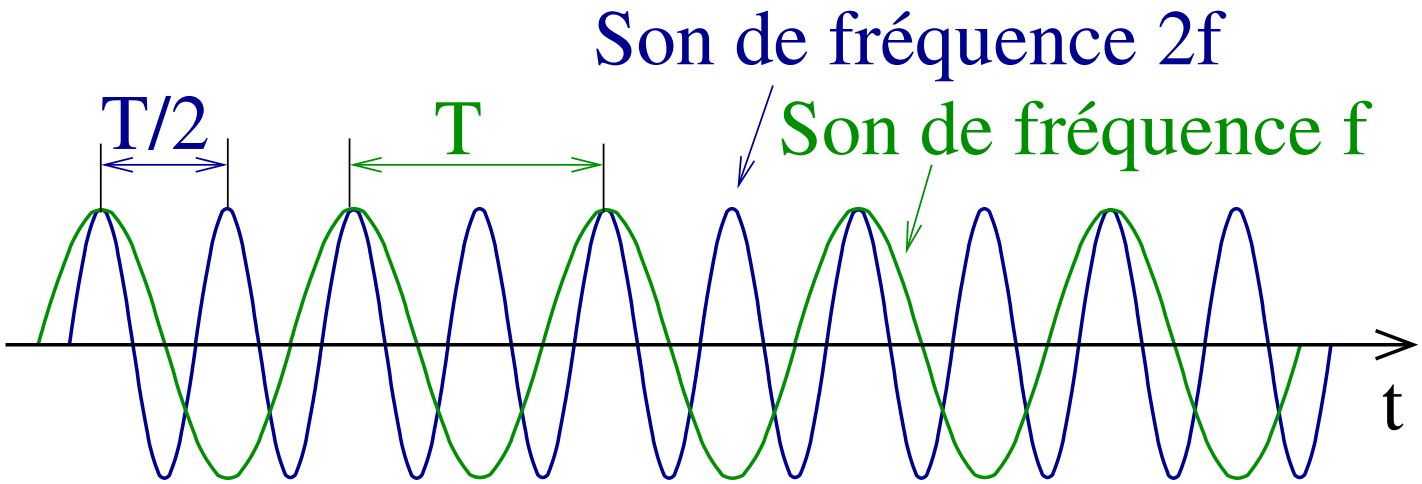
- Un intervalle se définit comme le rapport de 2 fréquences : $I = \frac{f_2}{f_1}$.
- Il représente l'écart en fréquence de 2 sons.
- L'octave est un intervalle valant 2.
- L'intervalle entre le fondamental et la 2^{eme} harmonique est une octave.
- La somme "auditive" de 2 intervalles s'exprime par le produit des intevalles.



$$I = \frac{f_3}{f_1} = \frac{f_3}{f_2} \times \frac{f_2}{f_1} = I_1 \times I_2$$

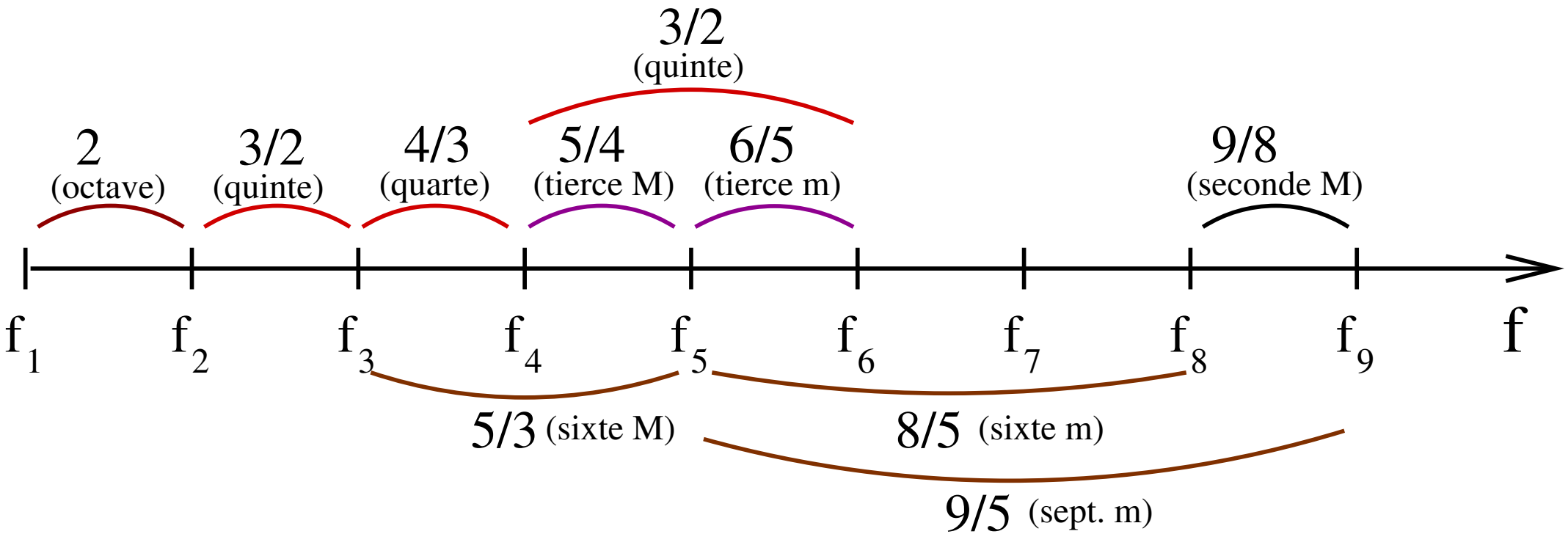
Un intervalle est consonant s'il produit une impression auditive agréable. Il est dissonant dans le cas contraire$\longrightarrow$ c'est une notion subjective.

- D'un point de vue physique, on s'aperçoit qu'un intervalle considéré comme consonant correspond à des sons dont les "battements" (ou maxima) coïncident à intervalles réguliers.
- A l'inverse, si les "battements" des sons ne coïncident jamais, le son résultant est dissonant.
- Par exemple pour une octave il y a coïncidence entre les maxima une fois sur deux pour le son de plus haute fréquence.



L'octave (intervalle entre f et $2f$) est considéré comme le plus consonant.

I.3 Intervalles & Harmoniques



- Fréquences des harmoniques : $f_n = n \times f_1$
- Exemple : $\left\{ \begin{array}{rcl} f_3 & = & 3 \times f_1 \\ f_2 & = & 2 \times f_1 \end{array} \right. \Rightarrow \frac{f_3}{f_2} = \frac{3}{2}$
- Ces intervalles entre harmoniques sont dits purs.
- Exemple :

tierce M.	$\times$	tierce m.	$=$	quinte
$\frac{5}{4}$	$\times$	$\frac{6}{5}$	$=$	$\frac{3}{2}$

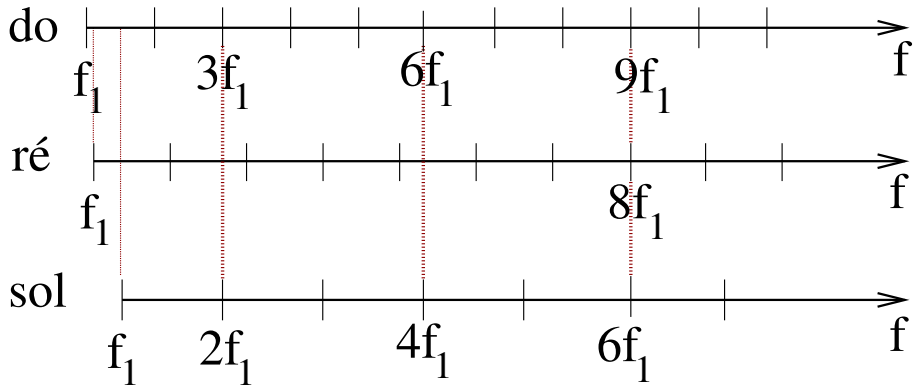
- Ces intervalles purs sont à la base de la construction des gammes (sauf la gamme tempérée).
- **Exemples :**
  - Gamme diatonique : Construite pour obtenir des quintes et des quartes pures.
  - Gamme de zarlino : Construite pour avoir également des tierces pures.

$I.4$ Intervalles consonants et harmoniques

- En solfège, les intervalles sont définis par le nombre de degrés séparant les notes.
- Ces intervalles se quantifient par une fraction irréductible.
- Il existe une hiéarchie des intervalles selon leurs consonances.

octave	2	consonance parfaite
quinte juste quarte juste	3/2 4/3	consonance forte
tierce Majeure tierce mineure sixte Majeure sixte mineure	5/4 6/5 8/5 5/3	consonance imparfaite
seconde Majeur quinte diminuée quarte augmentée	9/8 45/32 64/45	dissonance

- Cette consonance est liée au recouvrement des harmoniques des 2 notes constituant l'intervalle.
- Plus ce recouvrement est fréquent $i.e.$ plus les 2 notes ont des harmoniques en commun, plus le son est consonant.
- do-ré (seconde majeur) est moins consonant que do-sol (quinte juste).



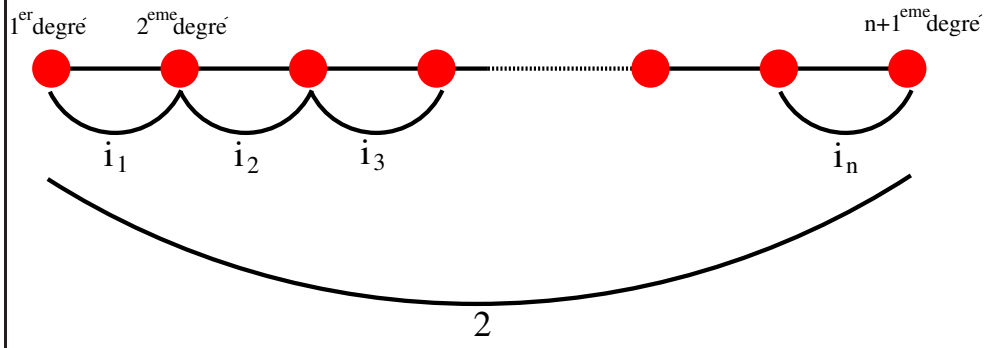
Correspondance entre les harmoniques du do, du ré et du sol

- Seconde majeure do-ré : $I_{\text{do-ré}} = \frac{f_1(\text{ré})}{f_1(\text{do})} = \frac{9}{8}$, soit $9f_1(\text{do}) = 8f_1(\text{ré})$. La 9ème harmonique du do correspond à la 8ème harmonique du ré.
- quinte juste do-sol : $I_{\text{do-sol}} = \frac{f_1(\text{sol})}{f_1(\text{do})} = \frac{9}{8} \times \frac{9}{8} \times \frac{256}{243} \times \frac{9}{8} = \frac{3}{2}$, soit $3f_1(\text{do}) = 2f_1(\text{sol})$. La 3ème harmonique du do correspond à la 2ème harmonique du sol.

$I.5$ Construction d'une Gamme

- Une gamme représente un arrangement spécifique des fréquences des notes qui la compose (on parle de degré).
- On cherche à construire des intervalles séparant les degrés d'une gamme de manière à avoir les intervalles les plus consonants possibles.
- Du fait de la consonance de l'octave, il est l'intervalle de base dans la construction des gammes dites mélodiques.
- On part du constat que l'octave est l'intervalle le plus consonant et l'on va subdiviser l'octave en sous intervalles.
- Cette construction est faite avec des choix arbitraires sur le nombre d'intervalles distincts, sur le nombre de degrés...

- Nous avons la condition suivante :
  $i_1 \times i_2 \times i_3 ... \times i_n = 2$
- Ces intervalles ne peuvent être compris qu'entre 1 et 2.
- Pour être consonant l'intervalle ne peut s'écrire que sous forme d'une fraction irréductible :
  $i = \frac{p}{q}$ (p et q entiers).



- La gamme sera d'autant plus agréable que le nombre d'intervalles distincts sera réduit.
- On utilise typiquement 2 intervalles distincts : Le ton (τ) et le demi-ton (δ) : Gamme diatonique ou tempérée.
- La gamme de Zarlino utilise 3 intervalles distincts.

La gamme diatonique

- En musique occidentale, on divise l'octave en sept intervalles (5 tons et 2 demi-tons) donnant ainsi sept degrés (ou notes).
  Le ton $\tau = 3^2/2^3 = 9/8 = 1,125$
  Le demi-ton diatonique $\delta = 2^8/3^5 = 256/243 \simeq 1,053498\cdots$
- Cette gamme permet d'obtenir des accords et des intervalles parfaitement consonants.
- Ces intervalles sont organisés en modes (séquences des tons et demi-tons).
- **Exemples de modes :**
  Mode majeur : $\tau\ \tau\ \delta\ \tau\ \tau\ \tau\ \delta$
  Mode mineur (naturelle) : $\tau\ \delta\ \tau\ \tau\ \delta\ \tau\ \tau$

Do Majeur : Do $\xrightarrow{\tau}$ Ré $\xrightarrow{\tau}$ Mi $\xrightarrow{\delta}$ Fa $\xrightarrow{\tau}$ Sol $\xrightarrow{\tau}$ La $\xrightarrow{\tau}$ Si $\xrightarrow{\delta}$ Do

La mineur : La $\xrightarrow{\tau}$ si $\xrightarrow{\delta}$ Do $\xrightarrow{\tau}$ Ré $\xrightarrow{\tau}$ Mi $\xrightarrow{\delta}$ Fa $\xrightarrow{\tau}$ Sol $\xrightarrow{\tau}$ La

---

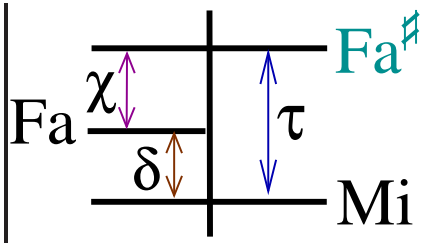
Fréquence des notes de la gamme en Do Majeur de la 3^{eme} octave : La note de référence est le La_3 (440 Hz). Les autres notes sont obtenues en multipliant (divisant) la fréquence par l'intervalle.

$\mathbf{Mi_3}$	$\mathbf{Fa_3}$	$\mathbf{Sol_3}$	$\mathbf{La_3}$	$\mathbf{Si_3}$	$\mathbf{Do_4}$	$\mathbf{Re_4}$
$330\,\text{Hz}$	$347,7\,\text{Hz}$	$391,1\,\text{Hz}$	$440\,\text{Hz}$	$495\,\text{Hz}$	$521,5\,\text{Hz}$	$586,7\,\text{Hz}$
	$\frac{347,7}{(256/243)}$	$\frac{391,1}{(9/8)}$	$\frac{440}{(9/8)}$	$440\times(9/8)$	$495\times(256/243)$	$521,5\times(9/8)$

Altération

Position du problème : Comment construire une gamme quelconque à 7 degrés?

- Si l'on définit une gamme autre que la gamme en Do majeur, les notes ainsi définies ne tombent pas obligatoirement sur les 7 notes correspondant à Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, Si.
- Il est ainsi nécessaire de définir des notes "altérées" (augmentées ou diminuées).
- L'altération consiste à appliquer un intervalle correspondant à la "différence" entre le ton (τ) et le demi-ton diatonique (δ) : le demi-ton chromatique (χ).



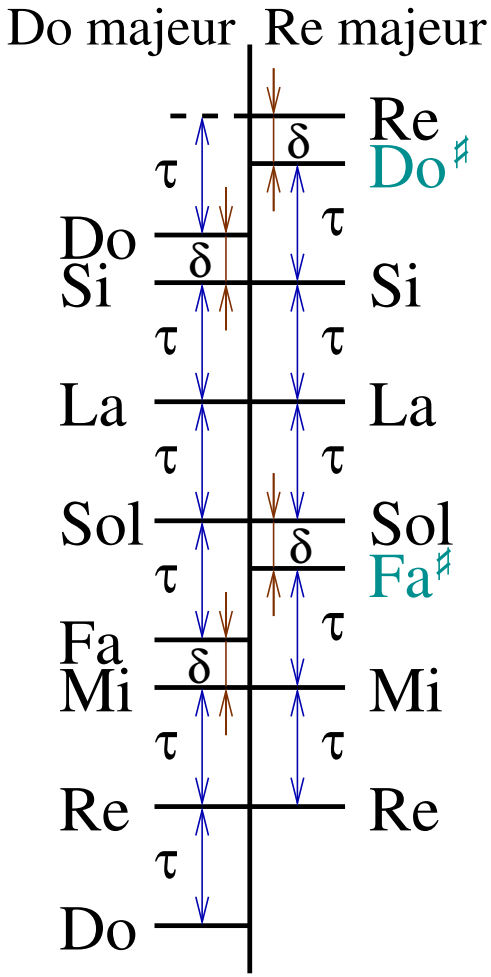
- $\tau = \chi \times \delta \Leftrightarrow \chi = \tau/\delta$

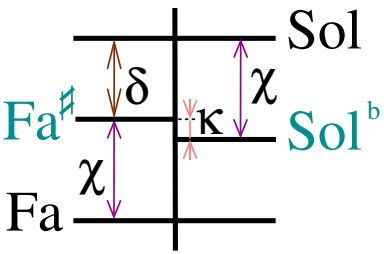
  $\chi = \frac{9/8}{256/243} = 3^7/2^{11} = 2187/2048 \simeq 1,06787...$
- Une note augmentée est notée avec un $\sharp$ en exposant et une note diminuée avec un $\flat$.

  Do$^\sharp$: Do augmenté d'un χ. $f_{\text{Do}^\sharp} = f_{\text{Do}} \times \chi$

  Ré$^\flat$: Ré diminué d'un χ. $f_{\text{Ré}^\flat} = f_{\text{Ré}}/\chi$

Exemple :

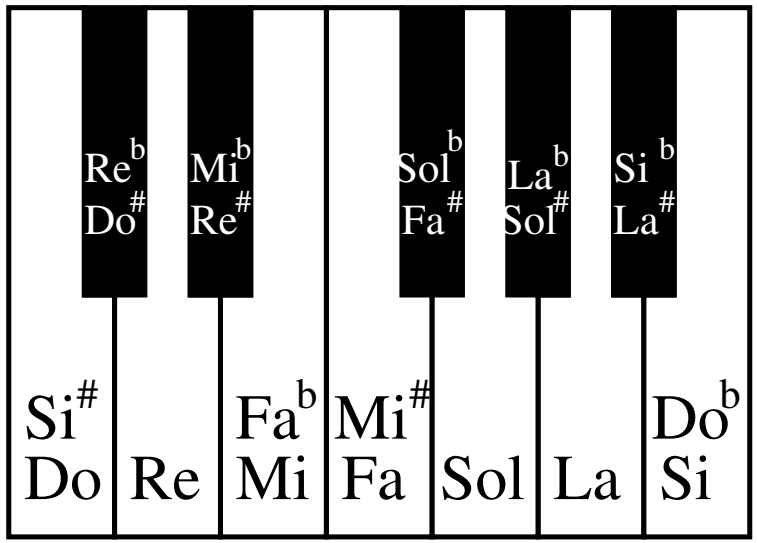




- L'inconvénient de cette gamme diatonique est que les demi-tons diatonique et chromatique ne sont pas égaux.
- Ils sont séparés d'un comma (κ) : $\kappa = \chi/\delta = \frac{2187/2048}{256/243} = 3^{12}/2^{19} = 531441/524288 \simeq 1,013643...$
- Cela correspond à une variation de fréquence quasi imperceptible.

Gamme tempérée

- La gamme diatonique pose un problème pour les instruments à clavier.
- En effet, si l'on considère les sept degrés de la gamme diatonique et toutes les altérations possibles, on obtient 21 notes.
- La solution est de considérer un seul demi-ton strictement égale à la moitié d'un ton : $\tau = \delta \times \delta = \delta^2 \Leftrightarrow \delta = \sqrt{\tau} = \tau^{1/2}$
- On obtient ainsi la gamme tempérée.

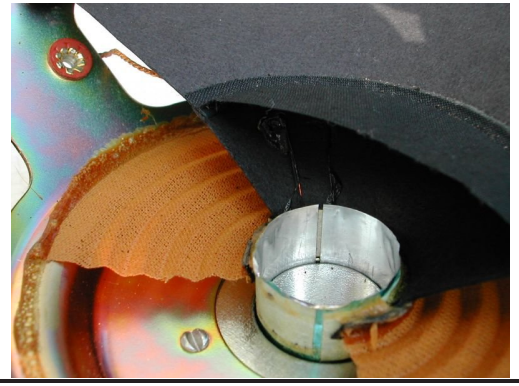


- La division de l'octave devient : $\tau \times \tau \times \delta \times \tau \times \tau \times \tau \times \delta = 2 \Leftrightarrow \delta^{12} = 2$
- Dans la gamme tempérée le ton vaut $2^{1/6}$ et le demi ton $2^{1/12}$.
- Dans ces conditions, une note augmentée a la même fréquence que la note suivante diminuée : $f_{\text{Do}\sharp} = f_{\text{Ré}\flat}$, $f_{\text{Ré}\sharp} = f_{\text{Mi}\flat}$ ...
- De plus, la fréquence du Mi$^\sharp$ correspond au Fa (et inversement) et le Si$^\sharp$ correspond au Do de l'octave suivant (et inversement).
- L'inconvénient de cette gamme tempérée est qu'elle sonne faux (seul l'octave sonne juste).
- Cependant l'habitude culturelle de l'usage de cette gamme fait que cette dissonance n'est pas perçue.
- De plus, la variation de fréquence est très souvent inférieur aux seuils différentiels de fréquence et donc non perceptible.

II.1 Principe d'un transducteur

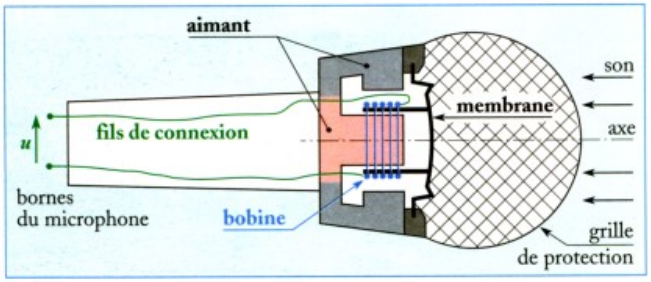
Un transducteur électro-acoustique transforme soit de l'énergie acoustique en énergie électrique (microphone) soit de l'énergie électrique en énergie acoustique (haut-parleur).

- Les transducteurs les plus courants sont dits à transduction électrodynamique :
- Une membrane est reliée à une bobine (enroulement conducteur).
- Cette bobine est placée dans un aimant permanent.



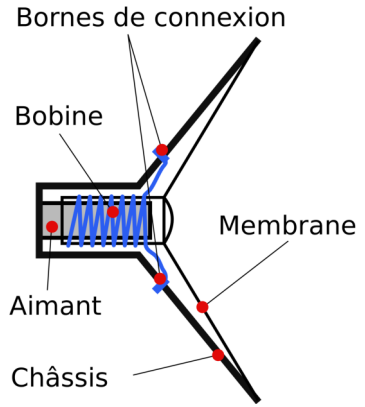
Microphone :

- La pression acoustique donne lieu à une force sur la membrane.
- Cette force induit un déplacement de la membrane (et donc de la bobine) dans l'aimant.
- Ce déplacement induit une tension électrique aux bornes de la bobine.



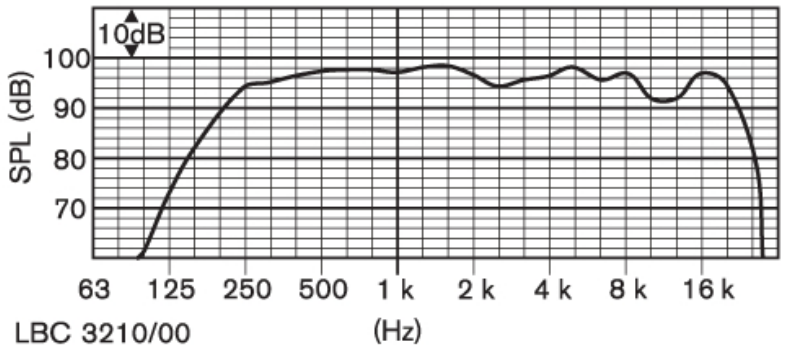
Haut-Parleur :

- On applique une tension aux bornes de la bobine.
- Le courant circulant dans la bobine va induire une force sur la bobine et donc sur la membrane.
- La membrane va se déplacer sous l'action de la force et créer une pression acoustique.

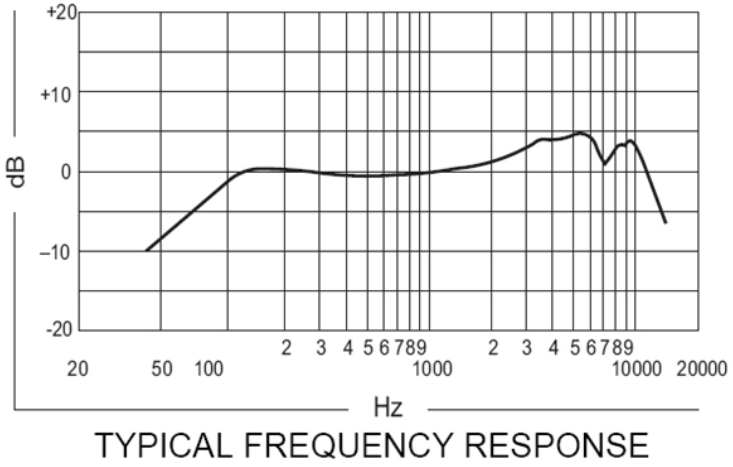


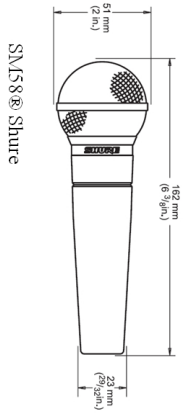
II.2 Courbe de réponse en fréquence

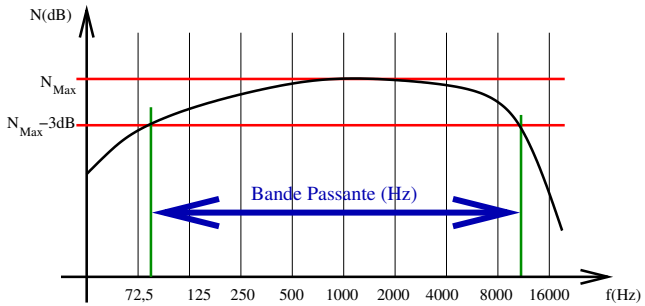
Une courbe de réponse permet de caractériser le rendu selon la fréquence d'un transducteur d'entrée ou de sortie (micro ou HP).







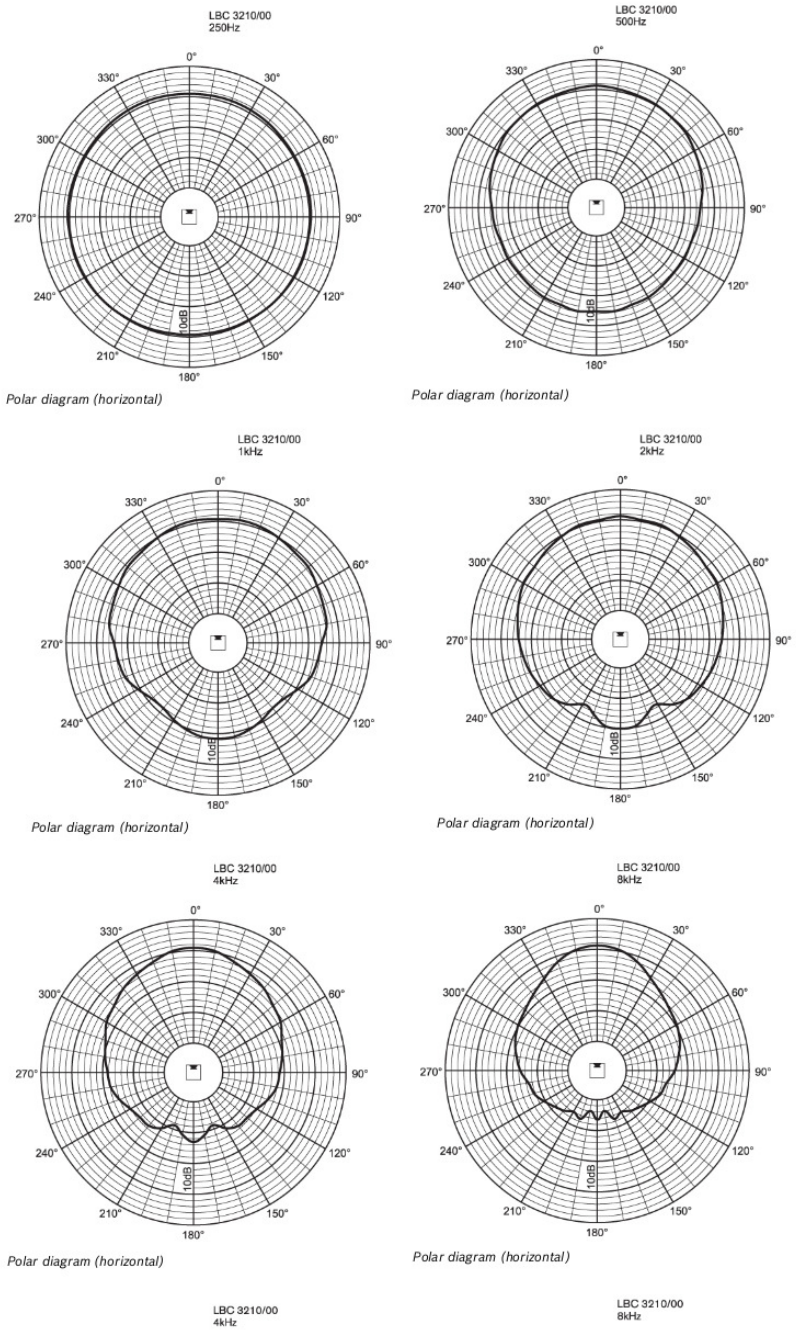




La notion de bande passante (intervalle défini en Hz) permet de caractériser simplement un transducteur.

- Pour un HP, on génère un son pur à une fréquence donnée et l'on mesure le niveau en sortie.
- On s'intéresse ici aux variations relatives de niveau.
- Plus la courbe de réponse est "plate" meilleur est le transducteur.
- Dans la pratique il faut vérifier si le transducteur est adpaté à son usage.
- Pour estimer l'importance des variations, on peut utiliser le fait qu'une variation de 10 dB correspond approximativement au doublement de la sensation auditive.

II.3 Diagramme polaire



- Permet de caractériser les variations de niveau selon la position de l'auditeur.
- Du fait de la diffraction, ces diagrammes dépendent de la fréquence :
  - Basse :
    Forte diffraction $\Rightarrow$ Omnidirectionnelle.
  - Trèble :
    Faible diffraction $\Rightarrow$ Très directif.
- Ces courbes sont obtenues en produisant un son pur à une fréquence donnée.
- On mesure le niveau produit en se plaçant à différentes position autour du HP.
- Chaque cercle correspond à un niveau. On prend comme référence (0 dB) le niveau en face du HP.
- Si la courbe est concentrique, la source est Omnidirectionnelle.
- Si la courbe se resserre $\Rightarrow$ Direction privilégiée d'émission.

