

Notions d'acoustique appliquées à la voix

Dr Gérard CHEVAILLIER

gerard.chevaillier@lrb.aphp.fr

O.R.L.- Phoniatre

Module 2 : Phonation

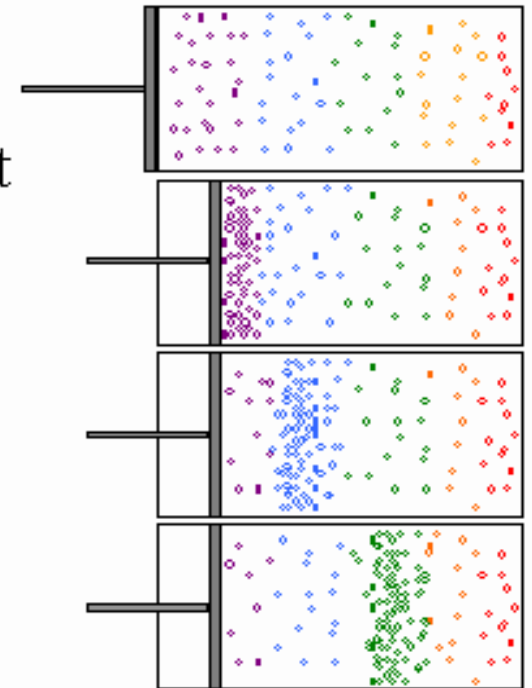
Alain Ghio, Ingénieur de Recherche au CNRS

Qu'est ce qu'une onde acoustique

- Une onde acoustique correspond à un ébranlement de l'air, qui se propage de proche en proche (comme le renversement d'une rangée de dominos)



- Mouvement sur place des molécules d'air
⇒ un haut-parleur puissant ne crée jamais de courant d'air



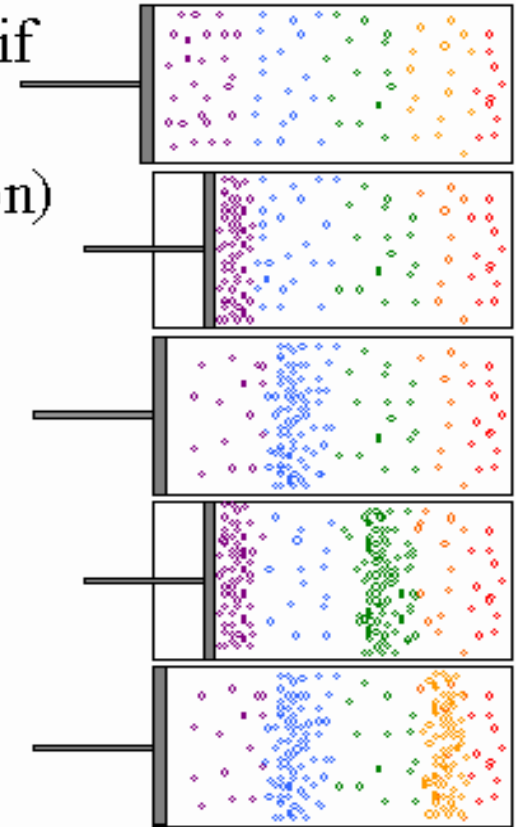
Propagation d'une onde acoustique

- Nécessité d'un support de transmission
exemple : air, eau, métal, verre,
⇒ une onde acoustique ne se propage pas dans le vide
- La vitesse de propagation dépend de l'élasticité du support
 - 340 m/s dans l'air
 - 1450 m/s dans l'eau
 - 3500 m/s dans les os
 - 6000 m/s dans l'acier

GAZ		LIQUIDES		SOLIDES		
NATURE	CELERITE en m/s	NATURE	CELERITE en m/s	NATURE	CELERITE (en m/s)	
					ONDE LONG.	ONDE TRANS.
Air	340	Eau	1500	Aluminium	6400	5240
Iode	110	Chloroforme	980	Fer	5850	5170
Vapeur d'eau	410	Pétrole	1330	Plomb	2400	1250
Hydrogène	1300	Glycérine	1950	Terre	10000	6000

Qu'est-ce qu'un son ?

- Un son correspond à un ébranlement répétitif des molécules d'air (vibration locale de surpression et dépression)
- Les pressions acoustiques sont faibles...
 - 0.00002 Pa \Leftrightarrow seuil d'audibilité
 - 1 Pa \Leftrightarrow son moyen
 - 200 Pa \Leftrightarrow seuil de douleur
- ... comparées à la pression atmosphérique
 - $\sim 100\,000$ Pa

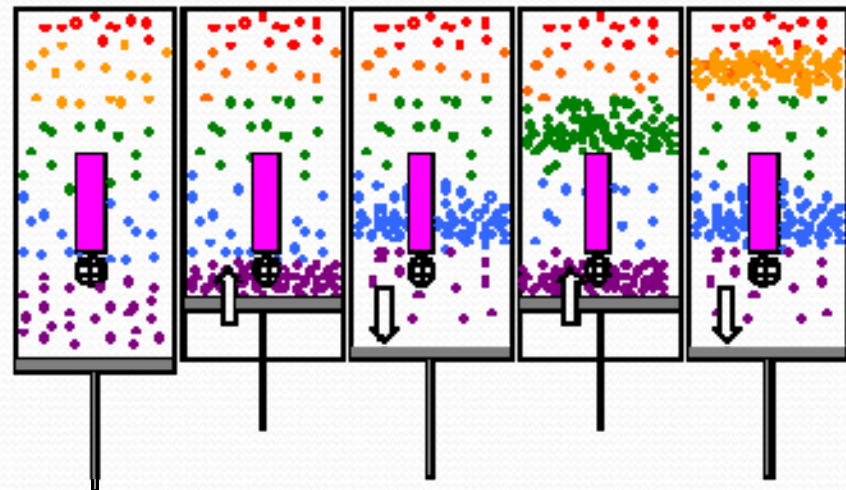
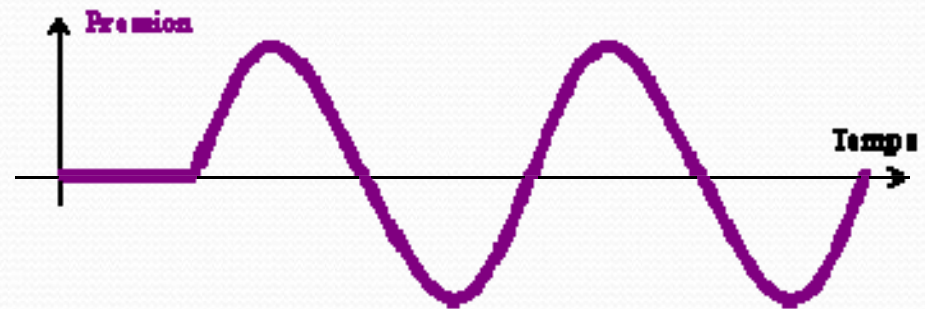


L'enregistrement d'un son

- **La saisie d'un son nécessite un *microphone*, capteur qui transforme les variations de pression de l'air en un courant ou une tension électrique.**
- **Cette transformation est nécessaire car les signaux électriques sont faciles à mesurer.**
- **L'amplitude moyenne du signal électrique en sortie du microphone est de quelques centaines de mV (valeurs faibles)**
- ➔ **nécessité d'amplifier**

Comment enregistrer et mesurer un son : notion de signal

- Un microphone enregistre les variations de pression de l'air
- Un microphone fournit une tension électrique proportionnelle aux variations de pression



L'oscilloscope

- Pour visualiser et mesurer un signal électrique, ou même plusieurs signaux simultanément, on utilise un appareil appelé oscilloscope

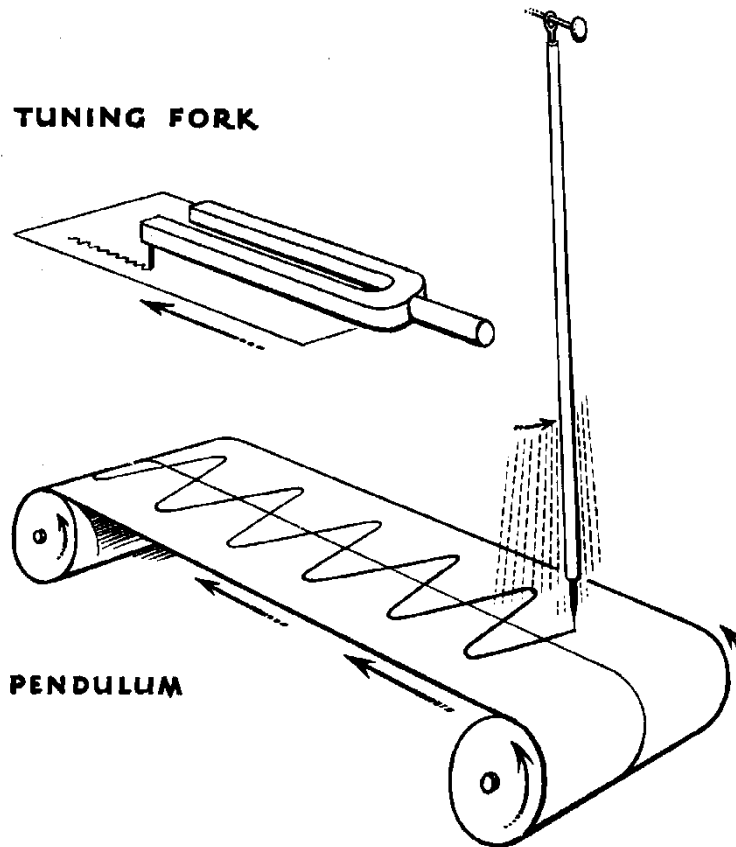


Les sons purs

- Ces sons sont rares dans la nature
 - Sons d'audiométrie
 - Diapason

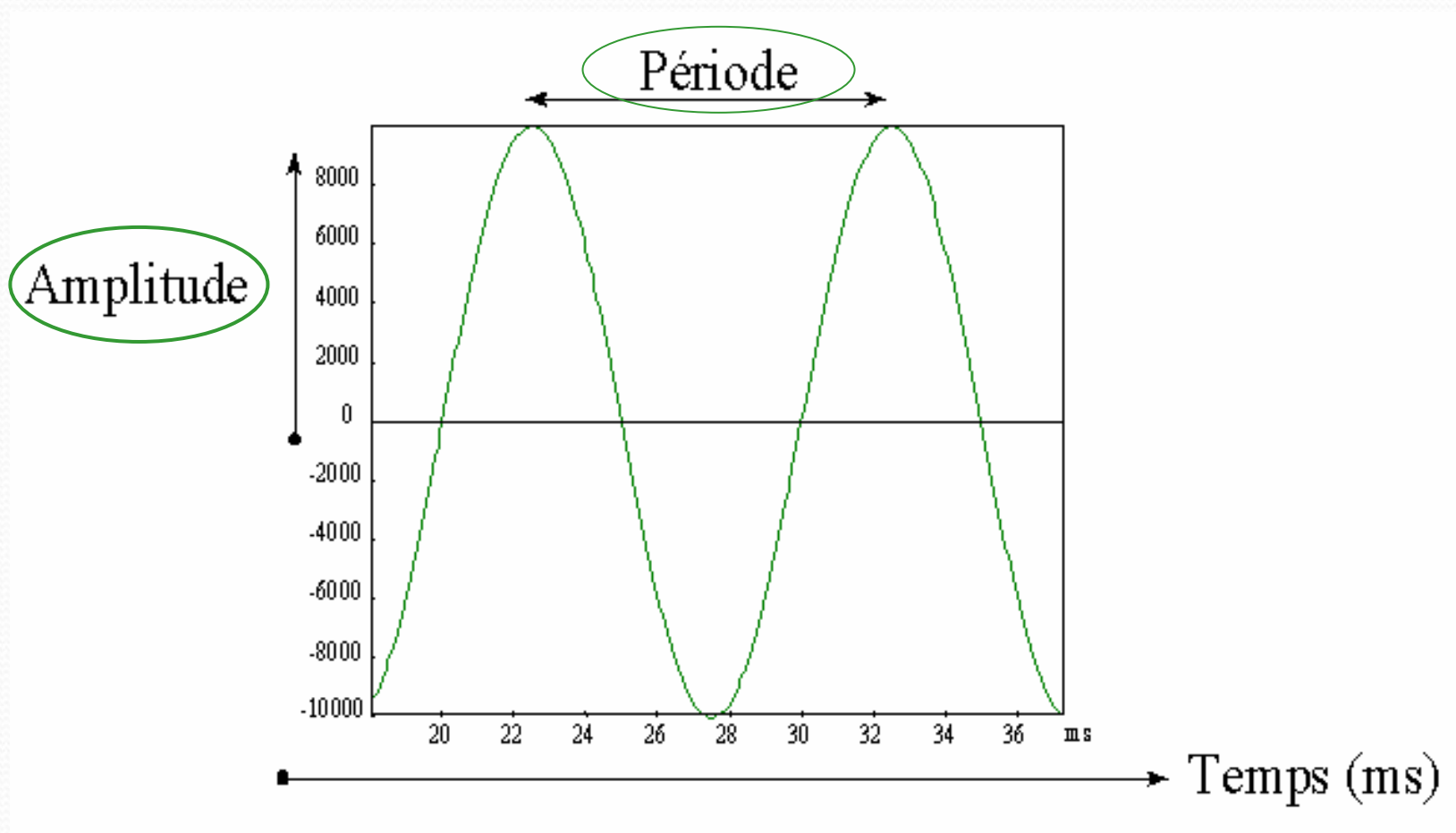


Analogie avec le pendule



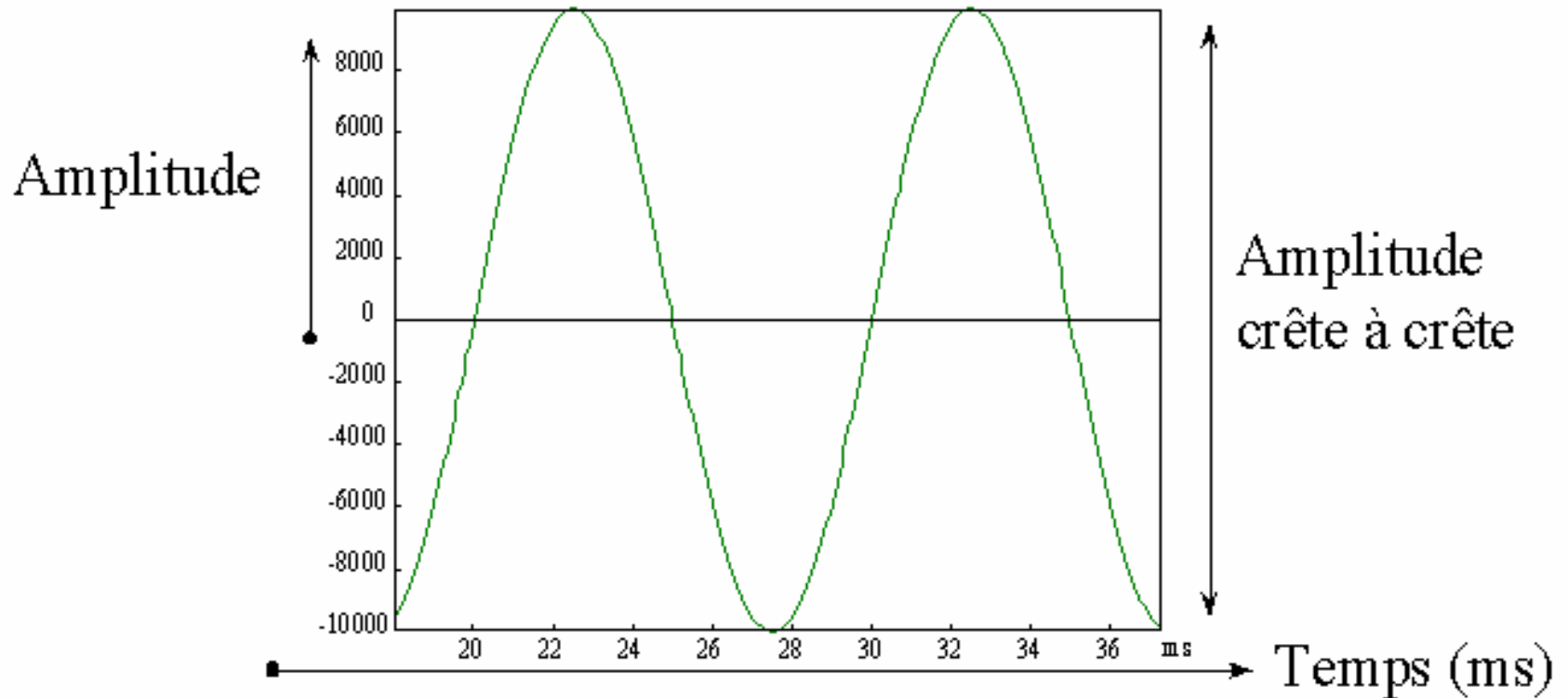
- La sinusoïde :
$$y(t) = A \sin (2\pi f_1 t)$$
- Les unités de mesure
 - la fréquence : nombre de cycle/s, en **Hertz**.
 - La période : intervalle de temps compris entre deux oscillations, en **seconde**
 - l'amplitude : c'est l'ampleur de l'élongation, en **Pascal**

Grandeurs physiques du son pur



Amplitude d'un son pur

- L'amplitude A correspond à l'ampleur de la vibration



C'est aussi la valeur maximale de l'élongation

L'unité de mesure de l'amplitude : le Pascal (Pa)

- L'amplitude s'exprime en Pascal (mesure acoustique)
 - La gamme de valeur est très étendue :
 - de 0.00002 Pa (seuil d'audibilité)
 - à 200 Pa (seuil de douleur)
- ⇒ rapport $10\ 000\ 000$ (difficile à manipuler)

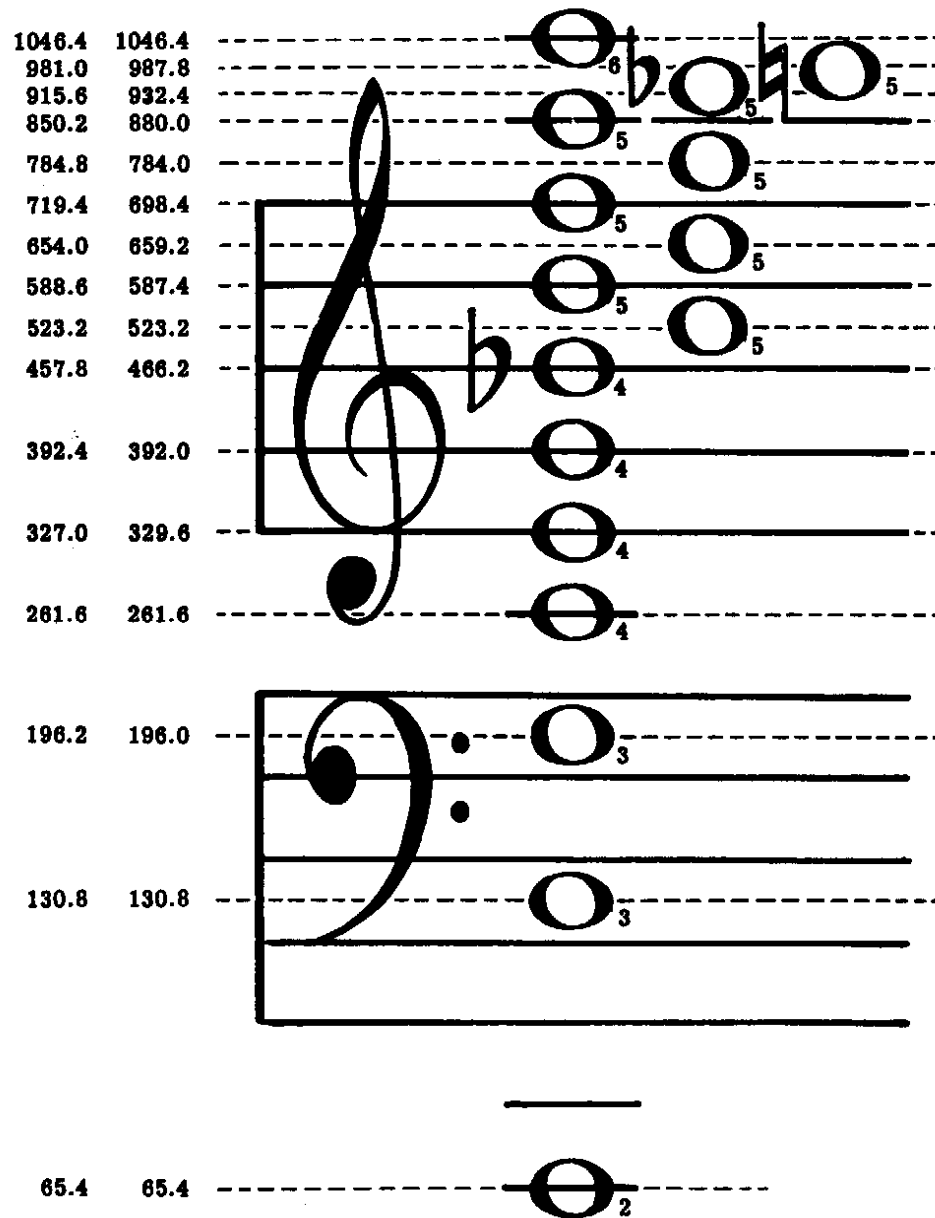
Pa	Bar	dB SL	Puissance (W)	Correspondance
2000 000	20	220	10 000 000 000	
200 000	2	200	100 000 000	
101 300	1.013	194	25 118 864	Pression atmosphérique.
20 000	0.200	180	1000 000	Fusée.
2000	0.020	160	10 000	
200	0.002	140	100	Avion à réaction.
20	0.000 200	120	1 Watt	Seuil de douleur.
2	0.000 020	100	0.01	Discothèque.
0.2	0.000 002	80	0.000 100	Grand orchestre.
0.02	0.000 000 200	60	0.000 001	Rue, lieu public.
0.002	0.000 000 020	40	0.000 000 010	Conversation normale.
0.000 200	0.000 000 002	20	0.000 000 000 100	Chuchotement.
0.000 020	0.000 000 000 200	0 dB	0.000 000 000 001	Unité d'échelle de normalisation.
0.000 002	0.000 000 000 020	-20	0.000 000 000 000 010	

On préfère parler de l'amplitude A en décibel (dB)

- Le déciBel (du nom de l'inventeur du téléphone G.Bell) est 10 fois le logarithme base 10 d'un rapport de deux grandeurs.
- On définit alors le niveau d'une onde sonore par son rapport à une valeur de référence. Par conséquent la grandeur en Bel n'a de signification physique que si l'on connaît la valeur de référence.

L'intensité SPL en dB

- L'intensité SPL « Sound Pressure Level » est équivalente à une pression acoustique
 - $\text{SPL en dB} = 20 \text{ Log}_{10}(P/P^{\circ})$
- Intensité SPL doublée correspond à + 6 dB



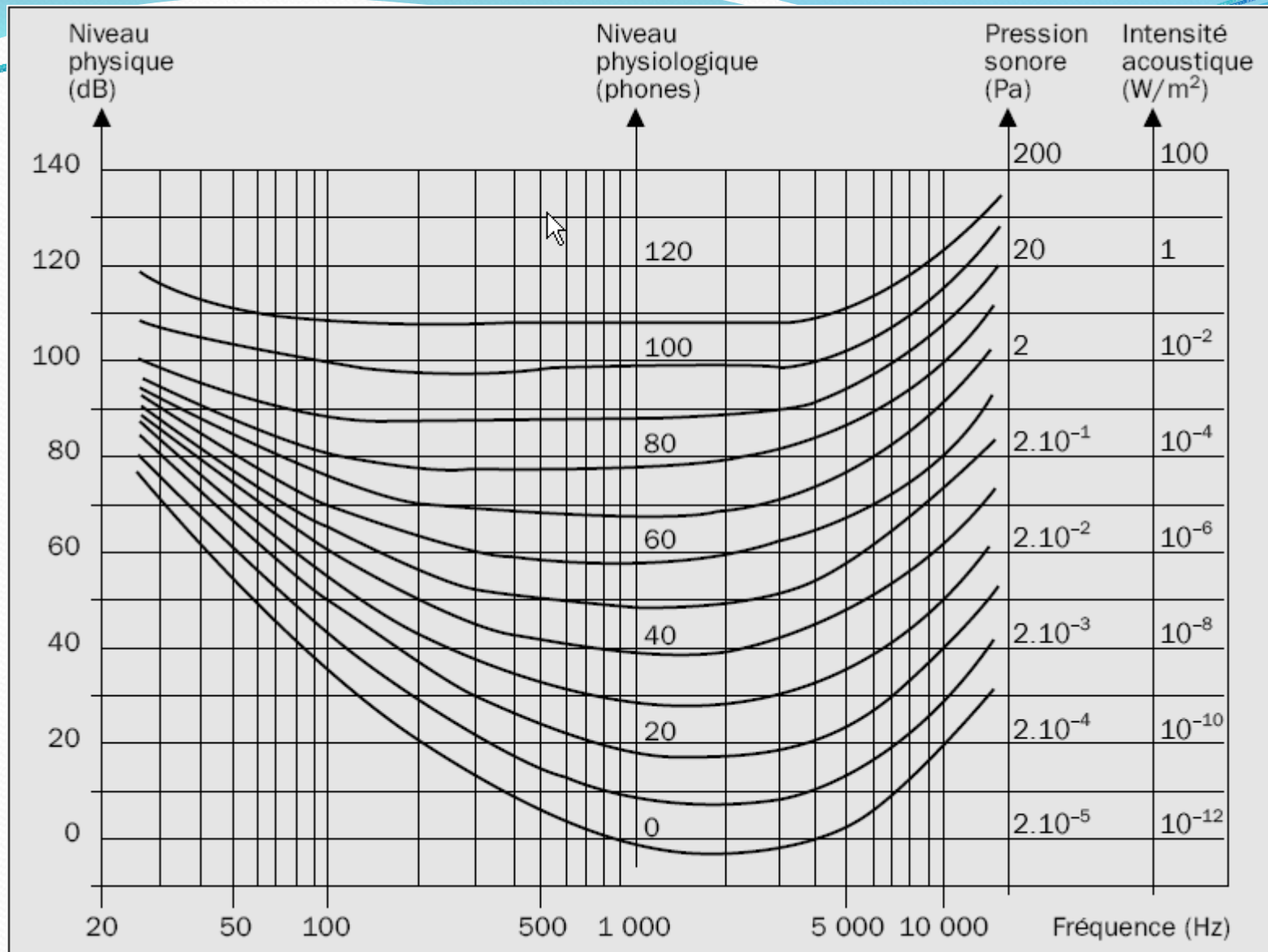
Do5

Do4

Do3

Do2

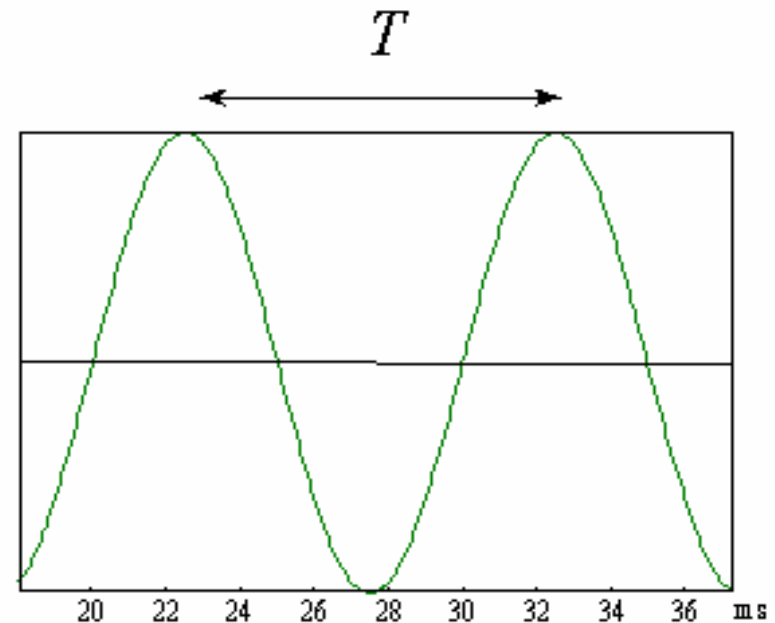
Do1



Les courbes d'isophonie permettent de caractériser la sensation auditive de l'oreille humaine. Les sonomètres effectuent des corrections sur les mesures de pressions acoustiques de façon à tenter de reproduire cette sensation.

Fréquence d'un son pur

- La période T correspond à la durée d'une vibration. Elle s'exprime en seconde (s) ou en milliseconde (ms)
 - La fréquence F correspond au nombre de vibrations par seconde (unité: hertz)
- ⇒ $F = 1/T$



Conversion période/fréquence

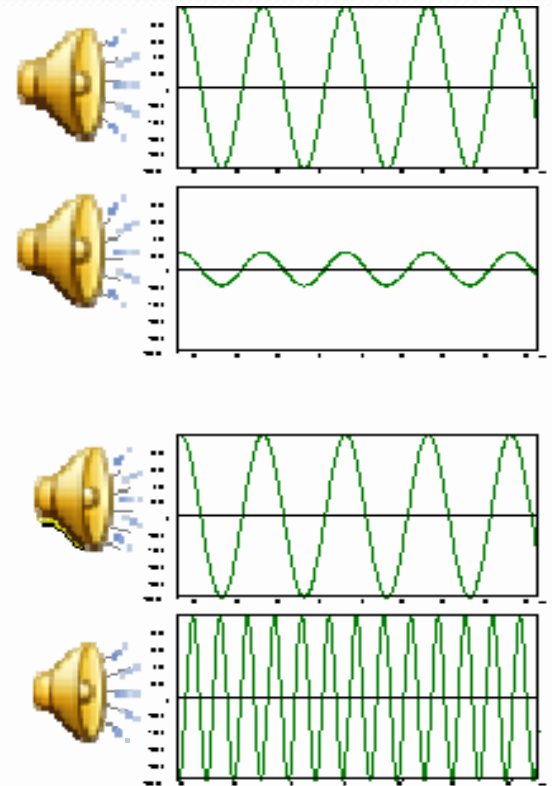
⇒ **Fréquence = 1/Période**

<i>Fréquence(Hz)</i>	<i>Période (s)</i>	<i>Période (ms)</i>
10	0.1	100
50	0.02	20
100	0.01	10
200	0.005	5
500	0.002	2
1000	0.001	1

Grandeurs physiques et sensations auditives



- Son fort \Leftrightarrow grande amplitude
- Son faible \Leftrightarrow petite amplitude
- Son grave \Leftrightarrow grande période
petite fréquence
- Son aigu \Leftrightarrow petite période
grande fréquence

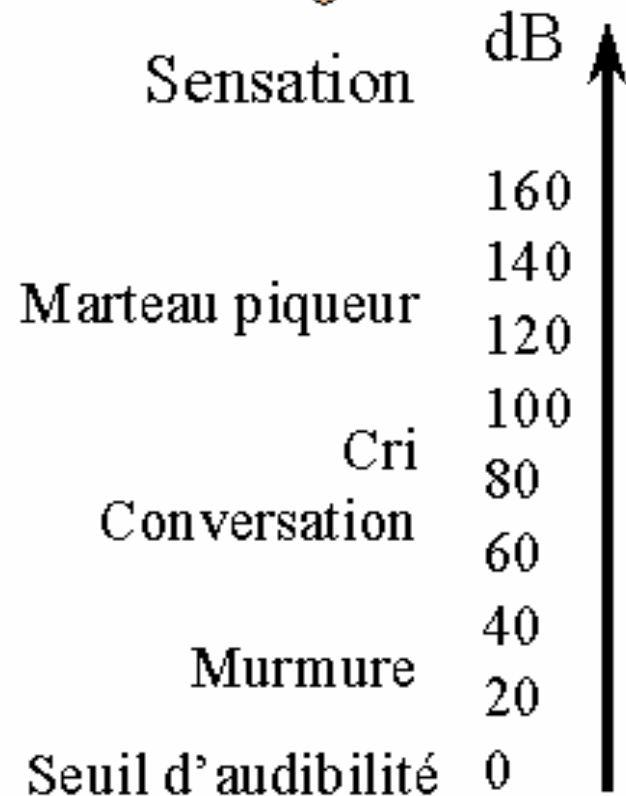


Classification des sons selon la perception auditive de l'amplitude

- Le décibel est une expression logarithmique qui rend compte de la perception logarithmique de l'amplitude

$$A(\text{dB}) = 20 \cdot \text{Log}_{10}(A/A_{\text{ref}})$$

où $A_{\text{ref}} = 0.00002 \text{ Pa}$



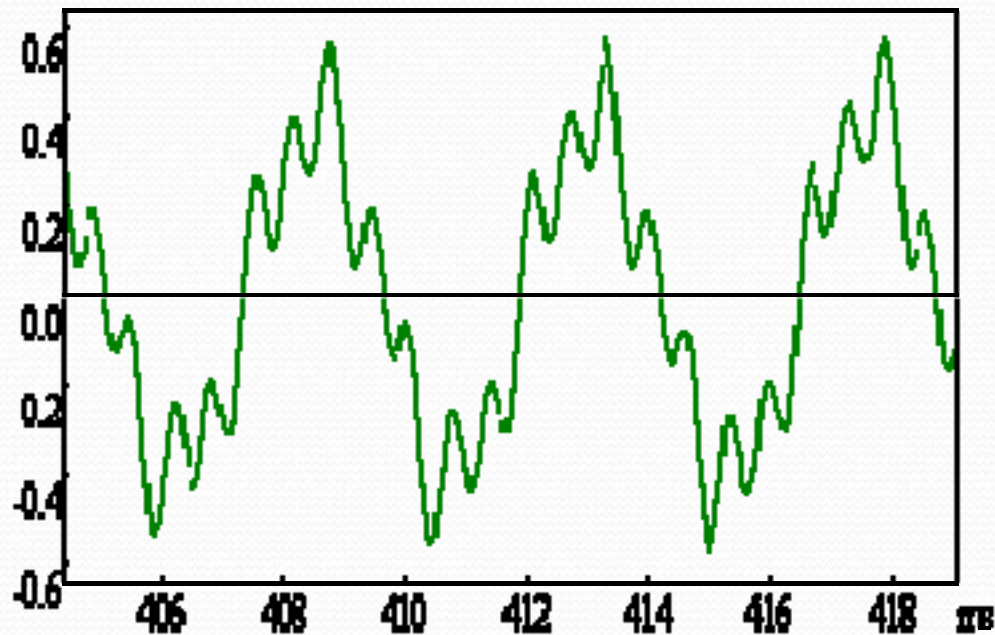
Les sons complexes

- Ce sont les plus fréquent des sons rencontrés
 - les instruments de musique
 - la voix humaine



Les sons complexes

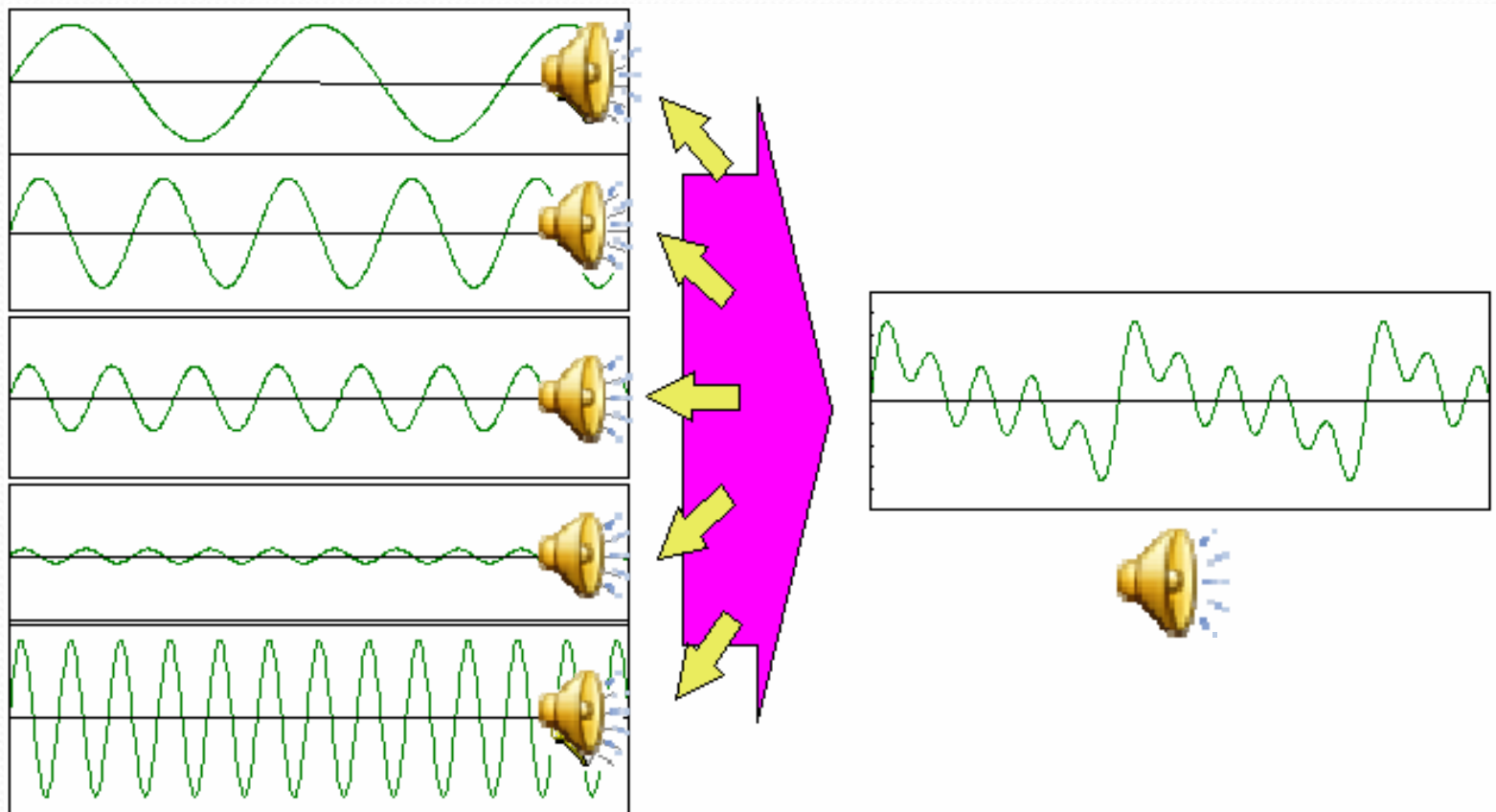
- **Un son complexe est formé d'une superposition de vibrations simples ayant des amplitudes et des fréquences différentes**



Le théorème de Fourier

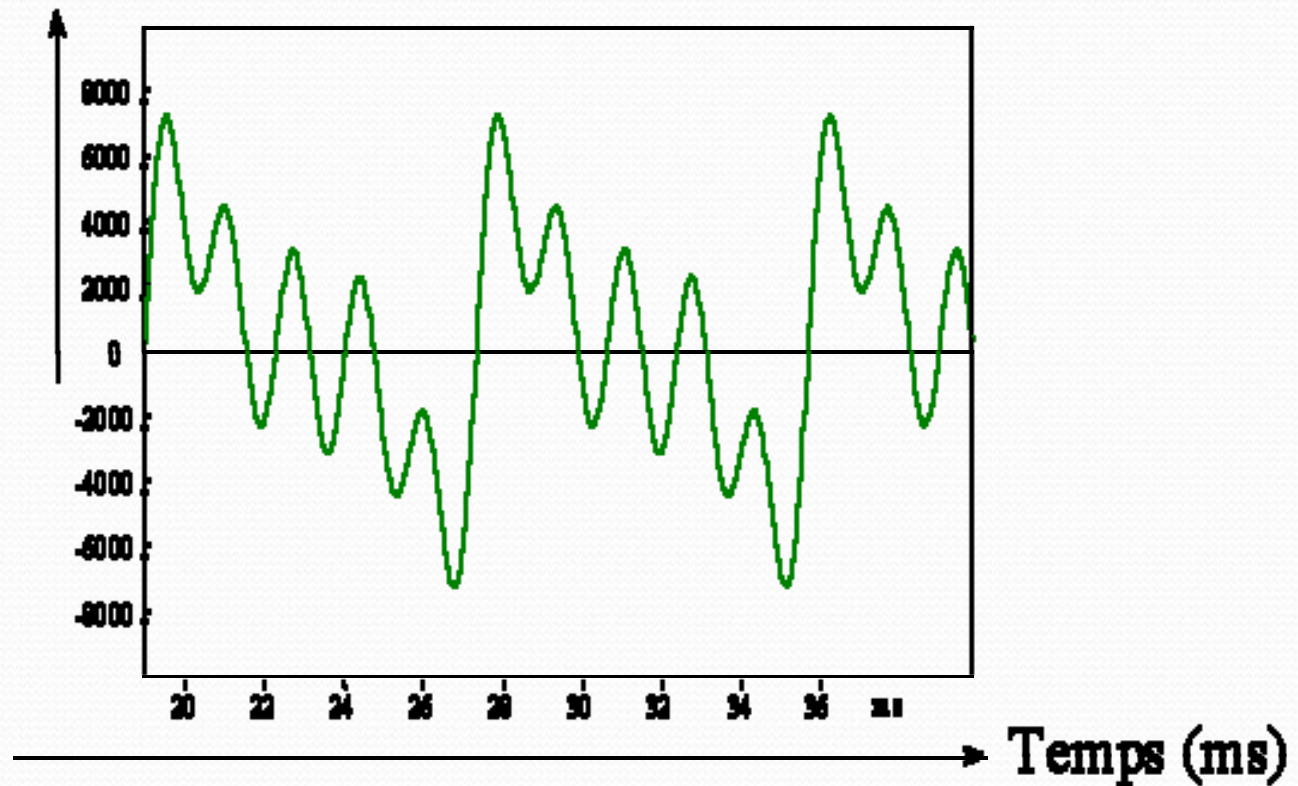
- Le théorème de Fourier démontre qu'un signal de forme quelconque peut être décomposé en un ensemble de signaux élémentaires d'amplitude et de fréquences déterminées
- Inversement, un mélange de signaux sinusoïdaux émis simultanément produit un signal complexe.

Décomposition et synthèse de Fourier



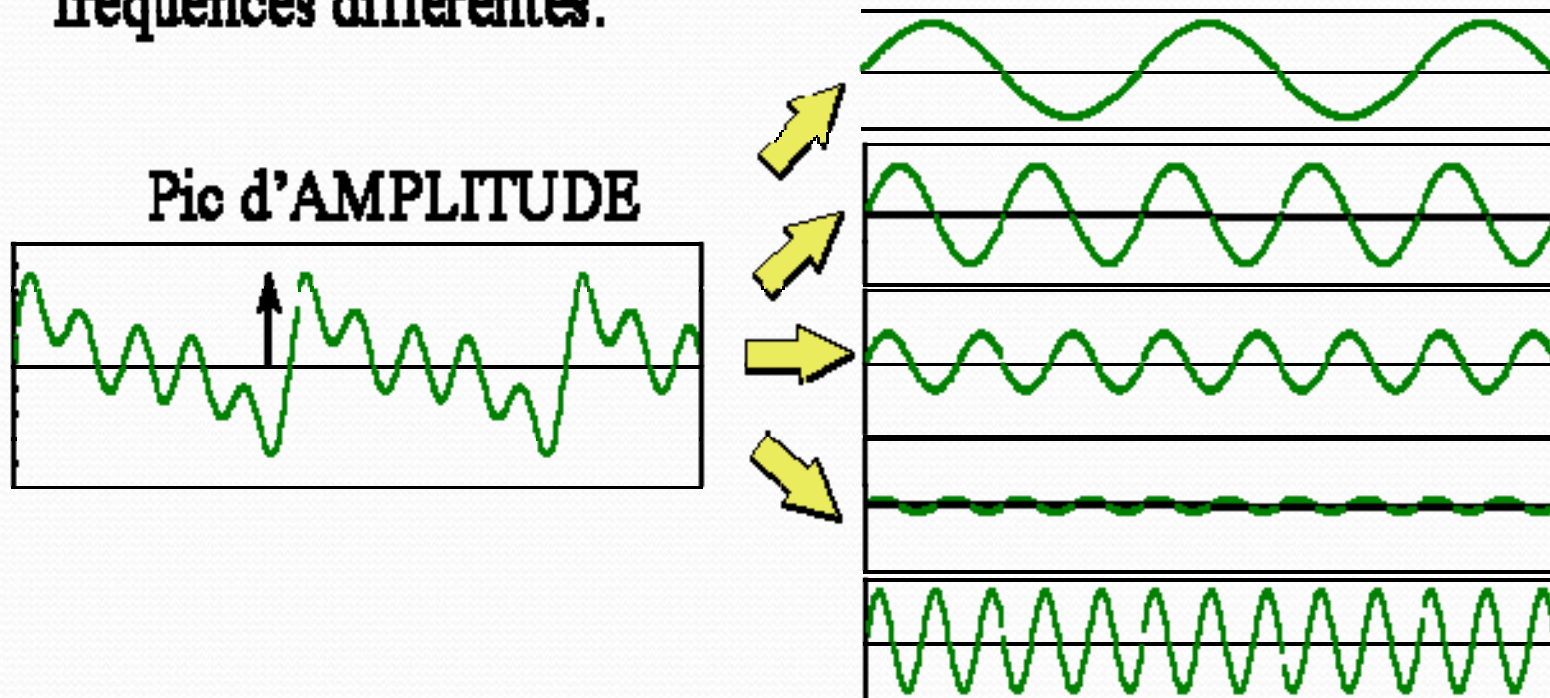
Les grandeurs physiques d'un son complexe

Amplitude



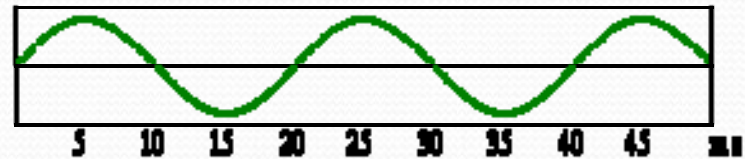
« Amplitude » d'un son complexe

- Il est délicat de parler d'amplitude pour un signal complexe car il est composé de signaux élémentaires à amplitudes et fréquences différentes.

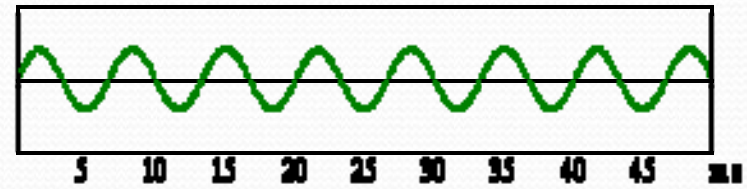
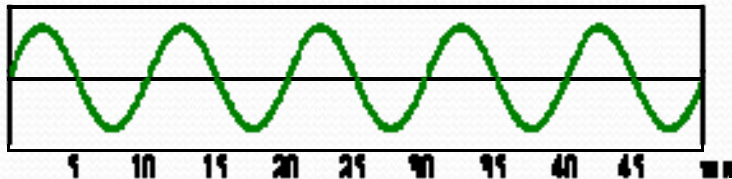


Fréquence d'un son complexe

- Un son est dit périodique s'il oscille de façon régulière (cyclique). Le cycle de base correspond à la fréquence fondamentale F_0 .



- Les fréquences multiples de la fondamentale sont appelées les harmoniques. On distingue parfois les harmoniques pairs ($2 F_0, 4 F_0, \dots$) et impairs ($3 F_0, 5 F_0, \dots$)

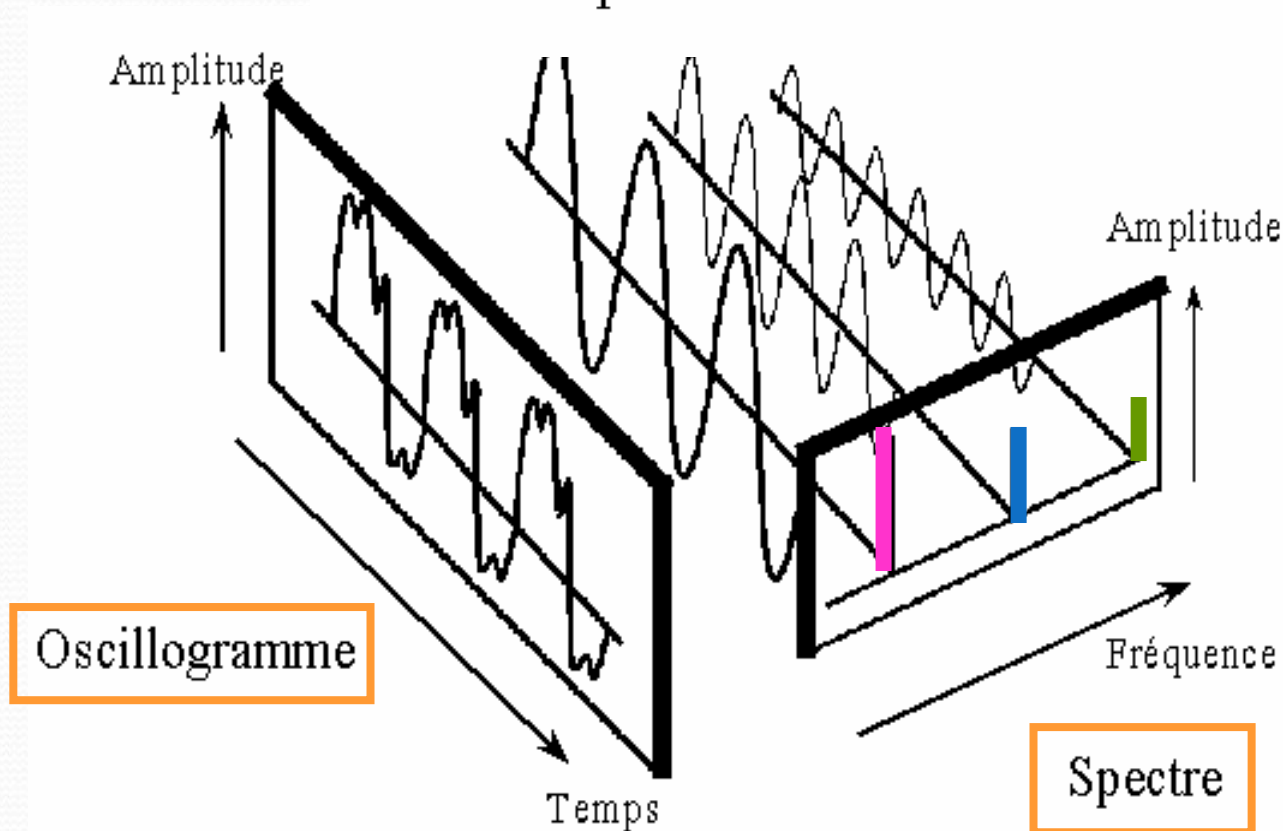


Notion de spectre

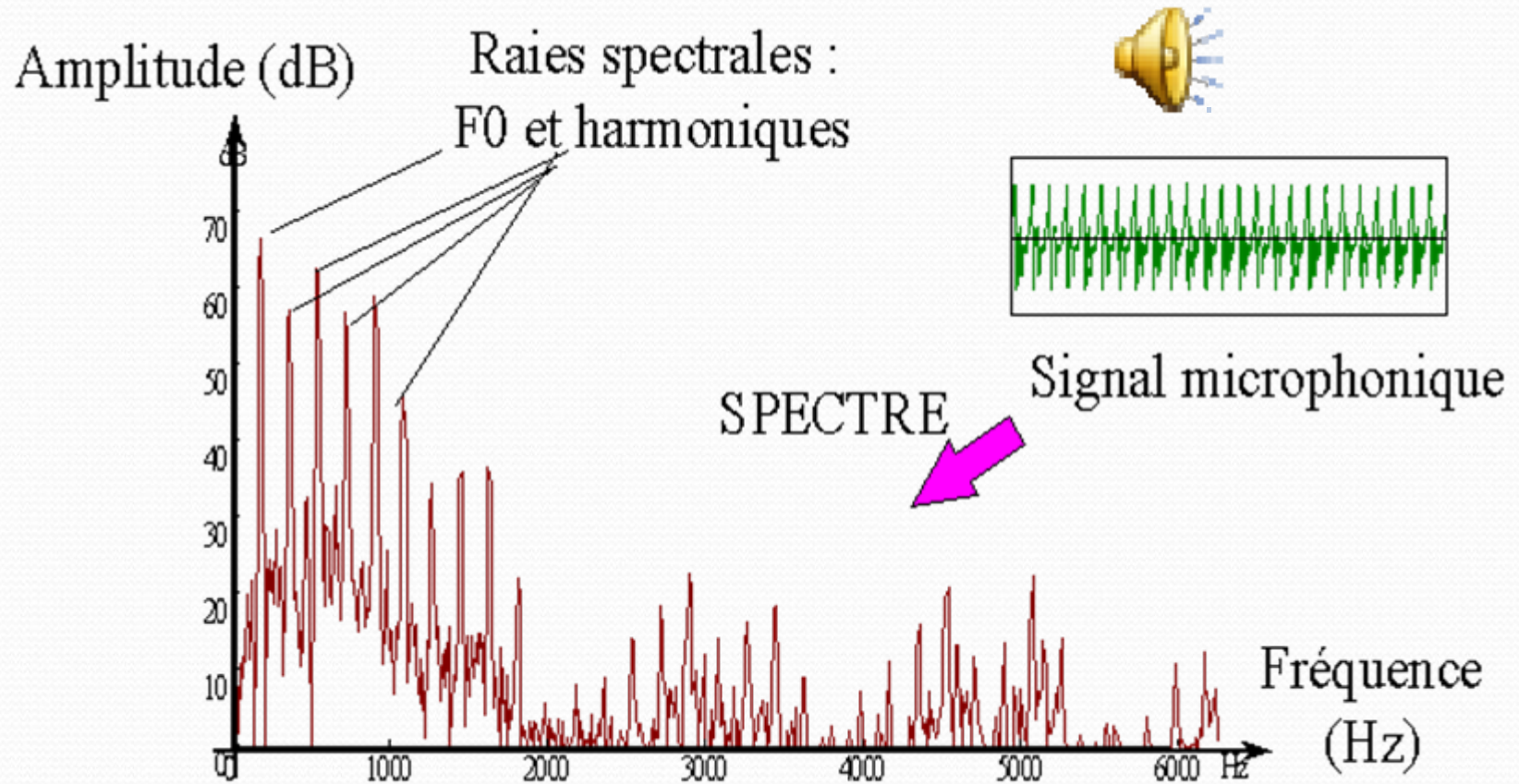
- Le spectre d'un signal indique les caractéristiques en amplitude et fréquence des ondes sinusoïdales élémentaires qui composent le signal.

Spectre

- Un spectre n'analyse qu'une partie du signal.
- Le spectre d'un signal périodique comporte des raies correspondant à la fréquence fondamentale et ses harmoniques



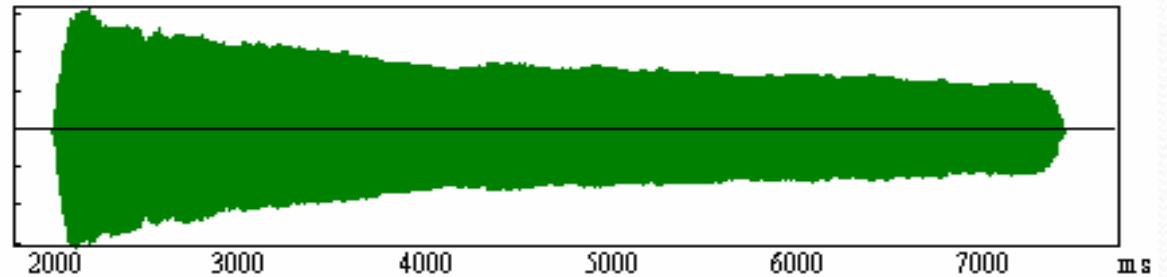
Spectre d'un « a » tenu



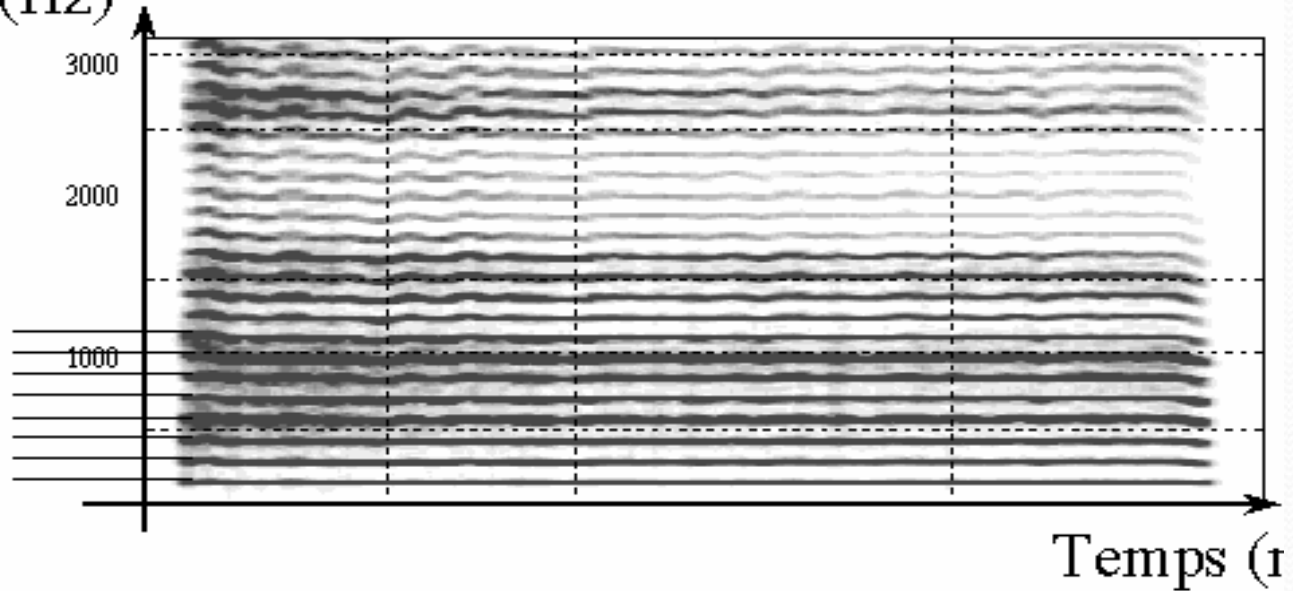
Spectrogramme Sonogramme



Fréquence (Hz)



Raies spectrales :
F0 et harmoniques

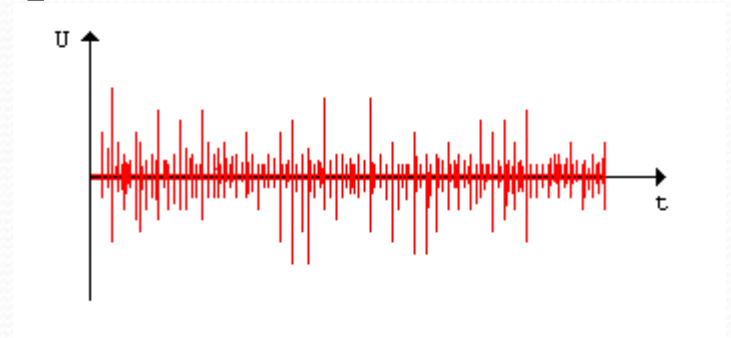


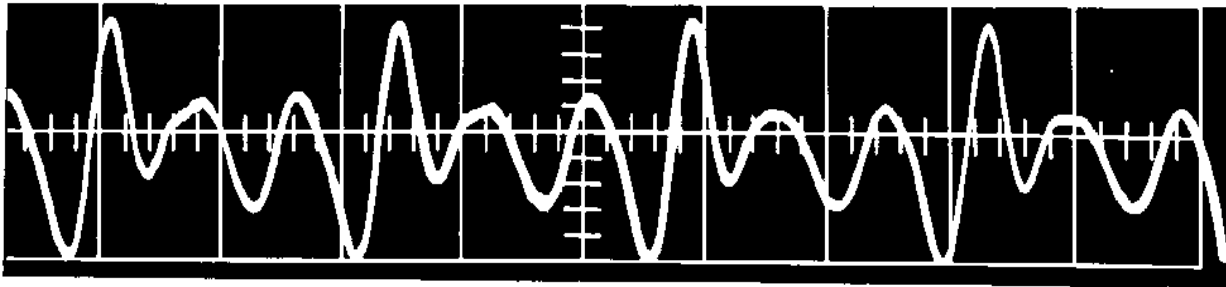
Spectrogramme

- Le spectrogramme d'un signal permet de visualiser l'évolution du spectre au cours du temps :
 - ① sélection d'une partie du signal (fenêtre de signal)
 - ② calcul du spectre
 - ③ représentation en « niveaux de gris vu de dessus »
 - ④ décalage de la fenêtre et répétition de l'opération

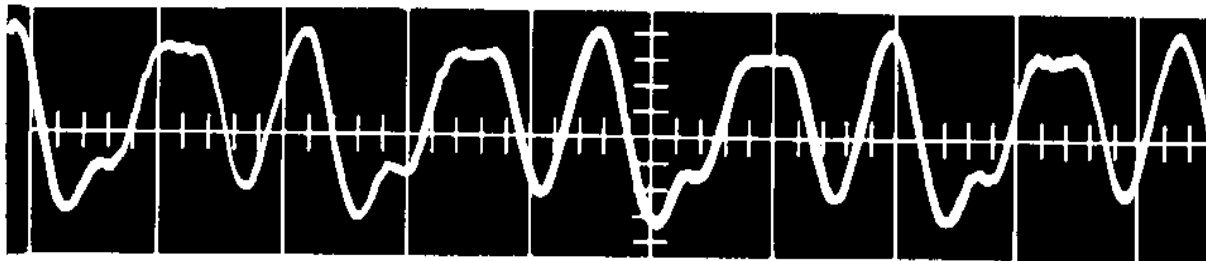
Le bruit

- C'est un son *apériodique*
- Il se compose de toutes les fréquences
- Exemples
 - le bruit blanc 📢
 - le tambour 📢
 - les consonnes sourdes
 - choc, explosion 📢

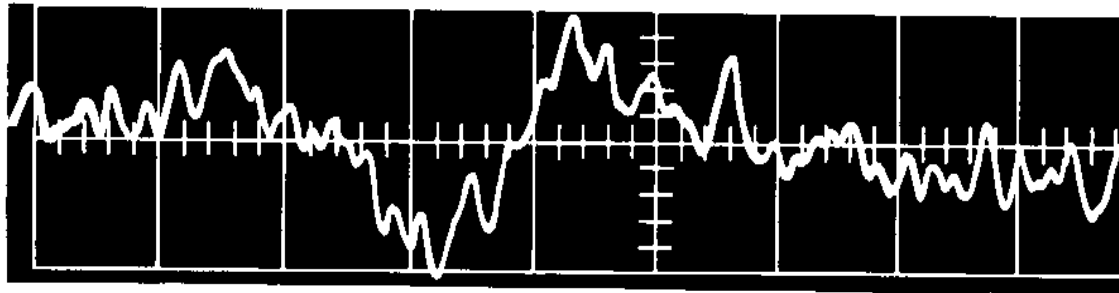




Son d'une trompette; son à fréquence et intensité constante; son complexe périodique.

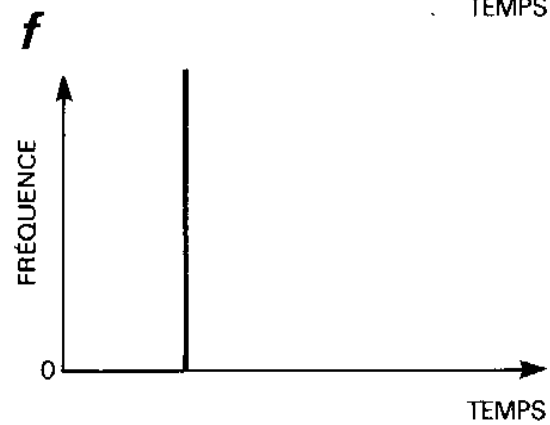
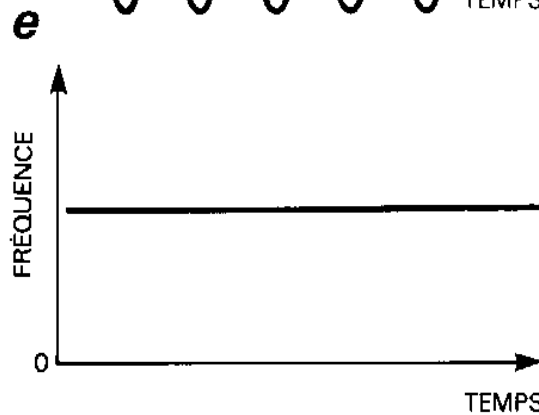
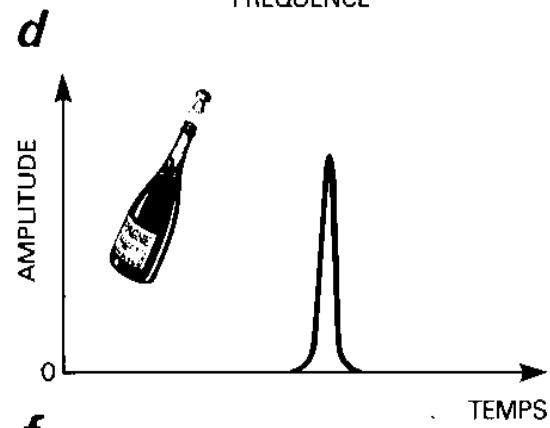
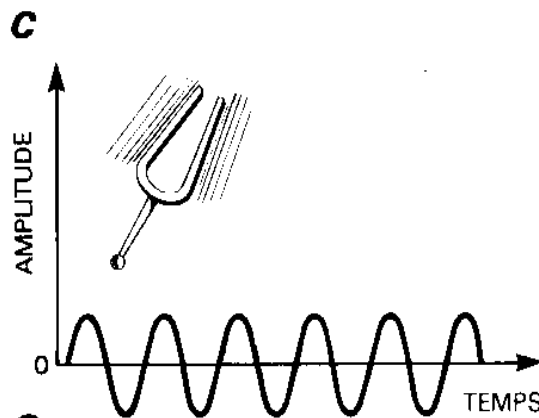
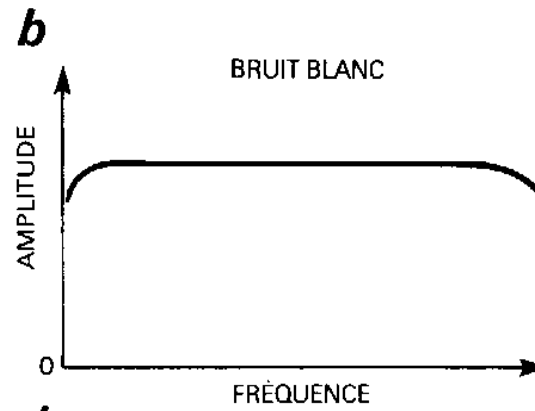
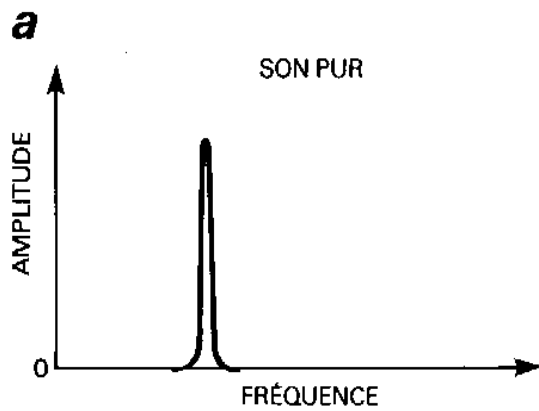


Le même son obtenu par oscillogramme; la même note obtenue par une clarinette.






Son complexe aperiodique; battement de tambour.

Fig. 32. — *Oscillogrammes d'instruments de musique.*



Le timbre

- Sensation auditive du spectre = richesse harmonique du son
- C'est la forme de l'onde qui conditionne la richesse harmonique
 - onde sinusoïdale = son pur 
 - onde carrée = spectre riche composés d'harmoniques impairs 
 - onde en dent de scie = harmoniques de tous rangs 

Notion de fréquence de résonance

- Chaque corps a une fréquence de vibration qui lui est propre : **fréquence de résonance**
- Cette fréquence dépend du poids, de la tension, du volume, de la forme et de la grandeur de son ouverture par rapport au volume

- Un corps lourd vibre plus lentement qu'un corps léger
- Un volume gros et rond vibre plus lentement qu'un volume petit et mince
- On peut augmenter la F° en diminuant le volume ou en augmentant l'ouverture

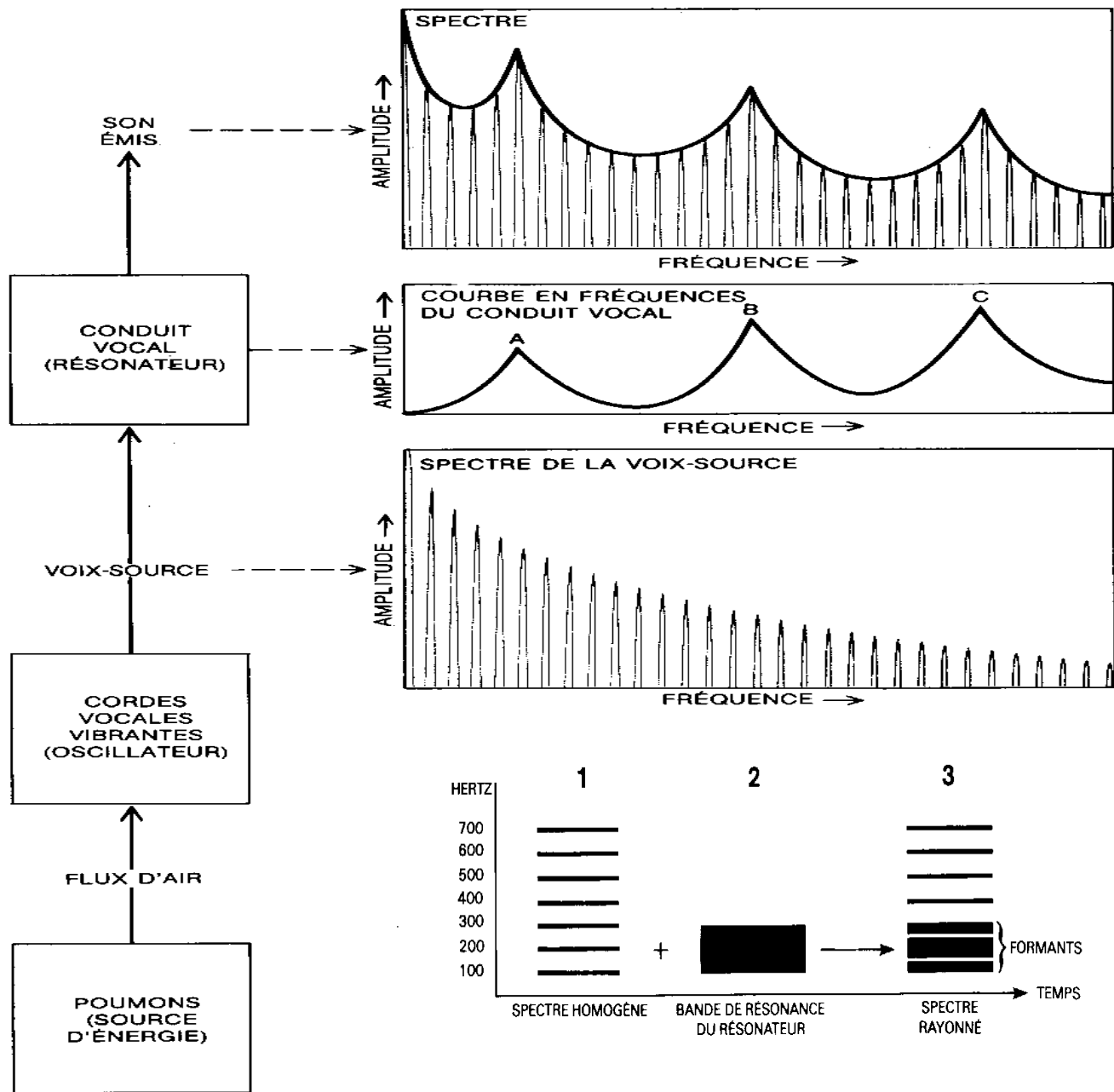
Qu'est-ce-qu'un résonateur

- C'est une **cavité aérienne** dont les dimensions sont voisines dans tous les axes
- Sa fréquence de résonance dépend de son **volume** et de la **section des orifices** de communication avec le milieu extérieur

La voix est un son complexe

- Elle nécessite un « **son source** » émis par la vibration des c.v. = *voix laryngée*
- Ce son est composé d'une fréquence fondamentale et d'un grand nombre d'harmoniques d'intensité décroissante
- Cette voix laryngée va être « **filtrée** » par le résonateur pharyngo-bucco-nasal

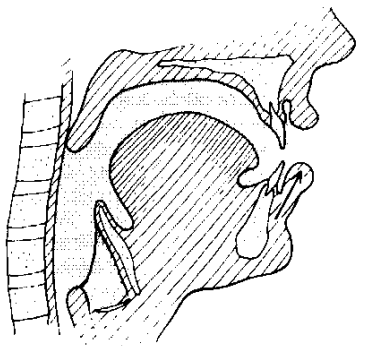
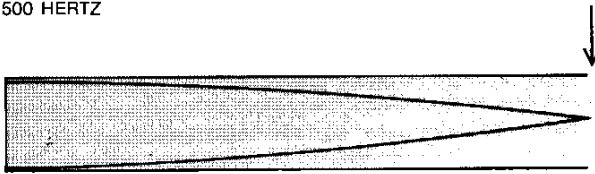
- C'est à ce moment que la voyelle s'élabore par renforcement ou atténuation de certains harmoniques : c'est le **timbre vocalique**
- C'est la fréquence de résonance des résonateurs qui permet l'amplification sélective de certains harmoniques
- Le tractus vocal possède 4 ou 5 fréquences de résonance qui sont à l'origine des **formants**



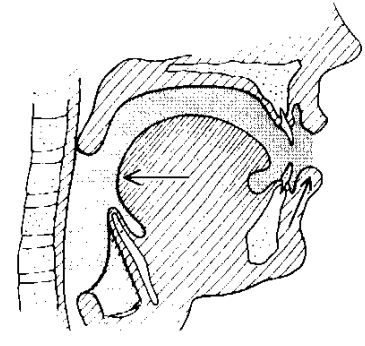
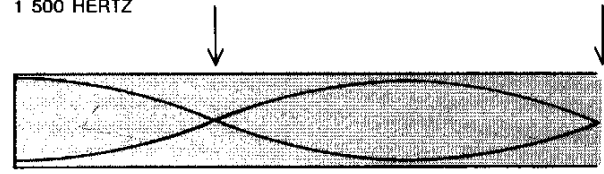
- C'est l'organisation de ces formants les uns par rapport aux autres qui va permettre la distinction des voyelles entre elles
- La discrimination des voyelles sera d'autant plus nette que les formants sont amplifiés
- Chaque formant est associé à une onde stationnaire dont l'amplitude maxima est au niveau des CV : le ventre ; et le nœud au niveau de la bouche

- Premier formant : 500 Hz
- Deuxième formant : 1500 Hz
- Troisième formant : 2500 Hz
- Quatrième formant : 3500 Hz
- Tout changement de la section du tractus vocal va changer l'emplacement des formants
- Le resserrement du conduit vocal au niveau d'un nœud provoque la disparition du formant, sa dilatation, l'effet inverse

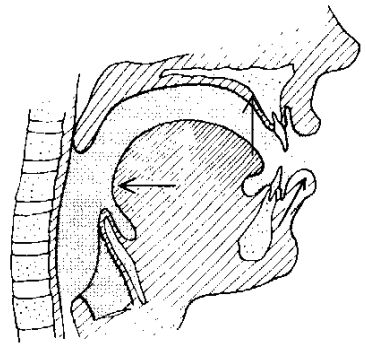
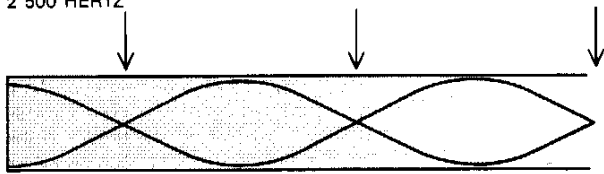
PREMIER FORMANT
1/4 DE LONGUEUR D'ONDE
500 HERTZ



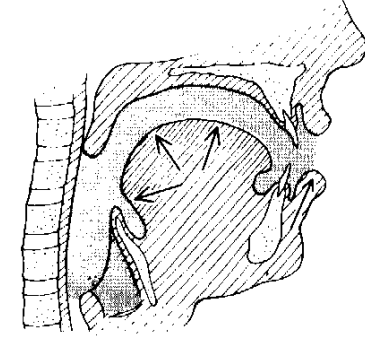
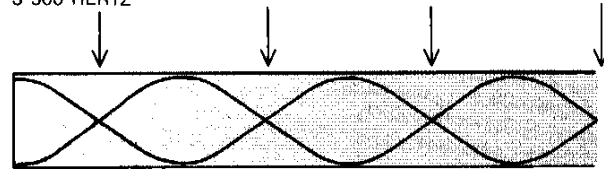
DEUXIÈME FORMANT
3/4 DE LONGUEUR D'ONDE
1 500 HERTZ



TROISIÈME FORMANT
5/4 DE LONGUEUR D'ONDE
2 500 HERTZ



QUATRIÈME FORMANT
7/4 DE LONGUEUR D'ONDE
3 500 HERTZ



Modification des formants

- La mâchoire joue sur le premier formant : fermeture à l'origine & ouverture à l'extrémité
- Le corps de la langue joue plus sur le deuxième formant
- La pointe de la langue sur le troisième

- Le premier formant pharyngé varie entre 250 et 700 Hz
- Le deuxième formant buccal varie entre 700 et 2700 Hz
- Deux formants suffisent à définir une voyelle
- On a décrit 10 timbres vocaliques fondamentaux
- Les autres formants apportent des nuances individuelles

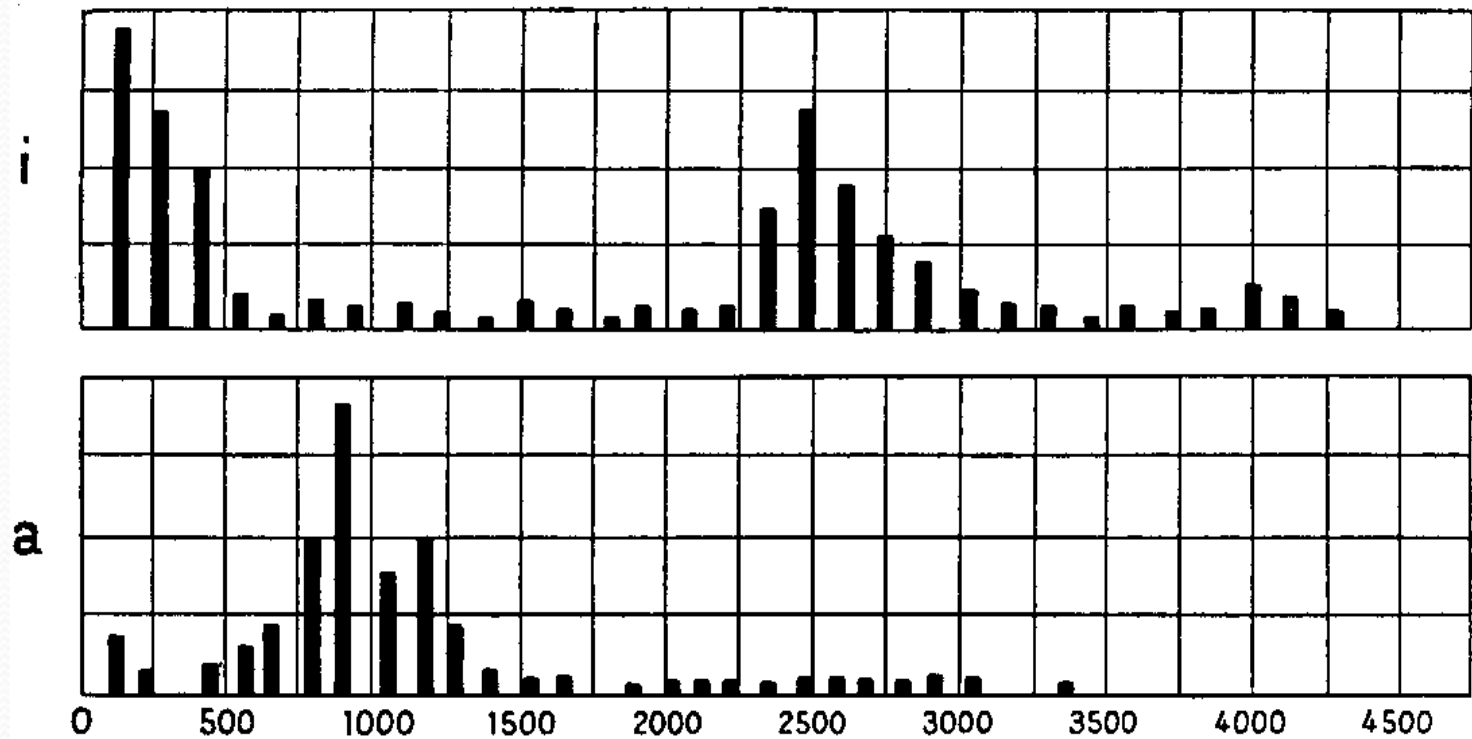
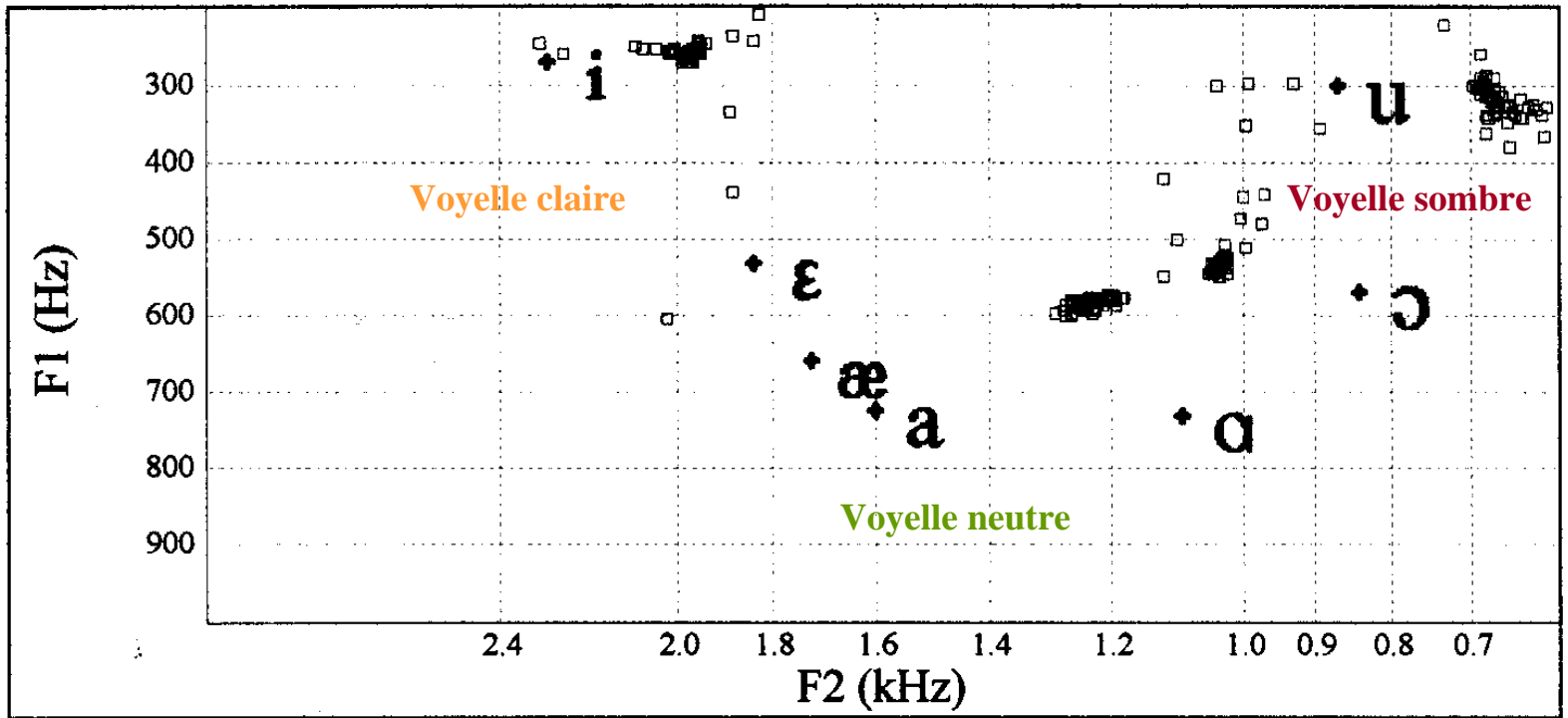


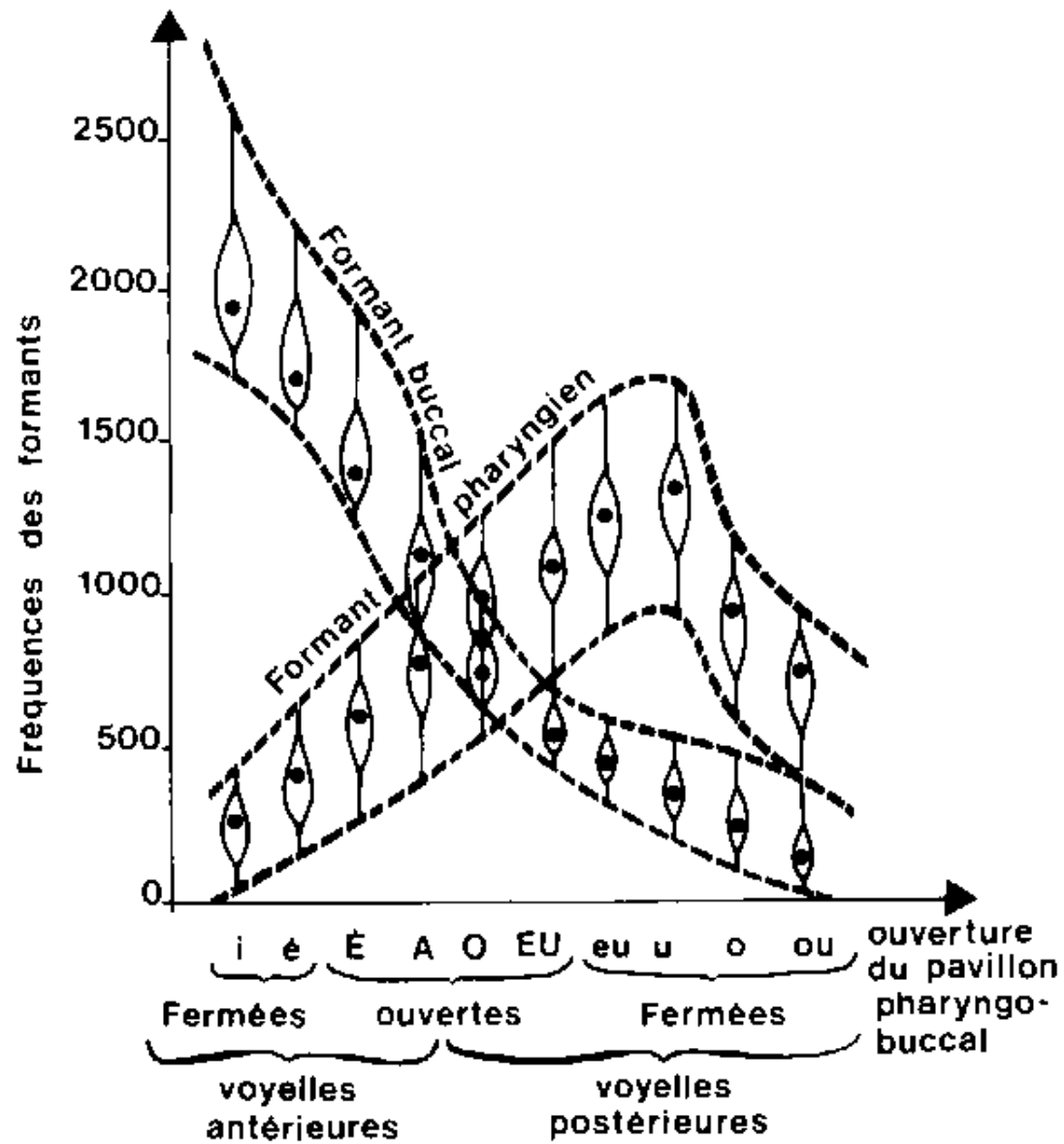
Fig. 10. (D'après Fletcher.)

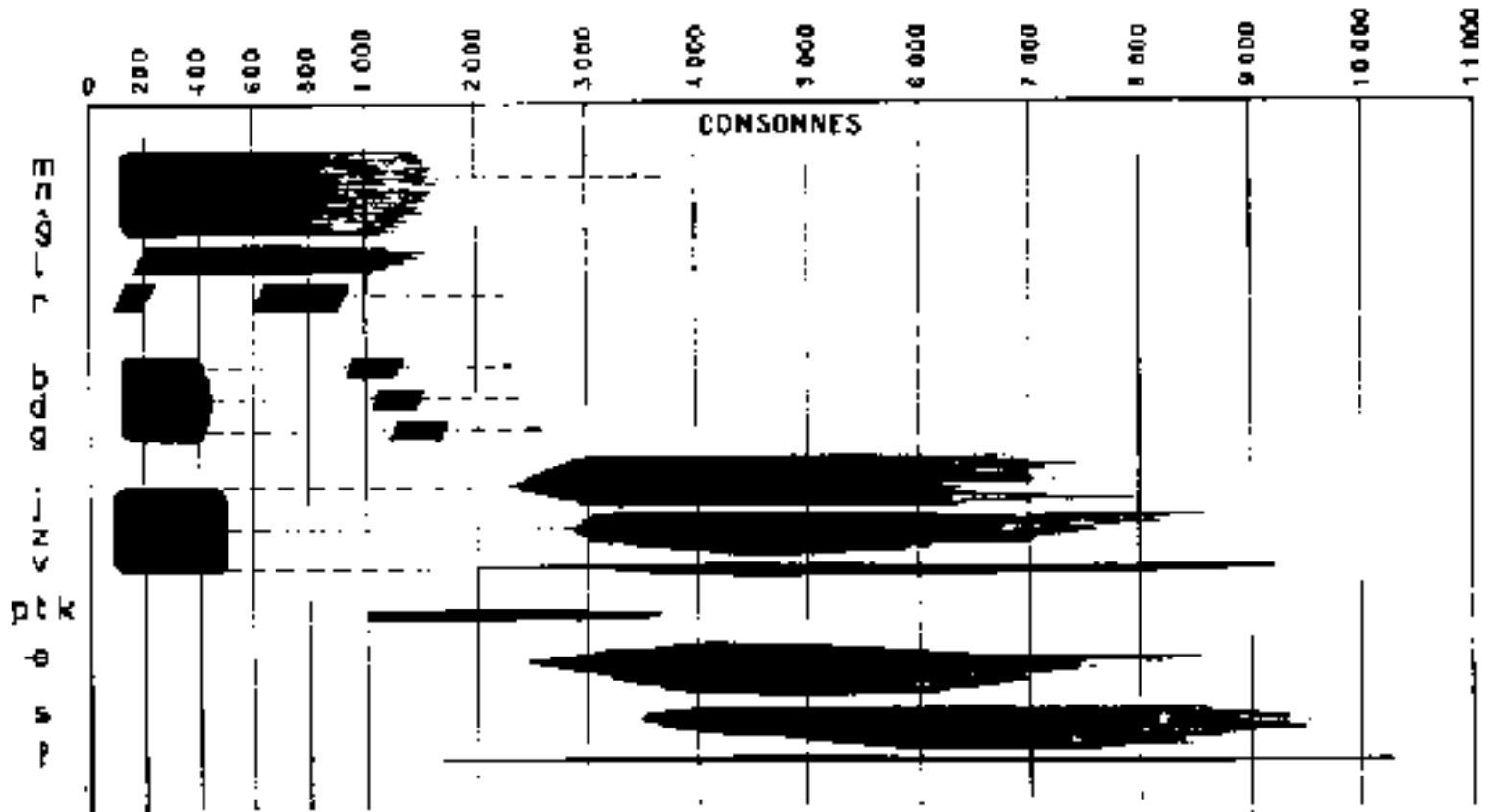
i = type diffus, les deux formants sont séparés

a = type compact, les deux formants sont au milieu du spectre



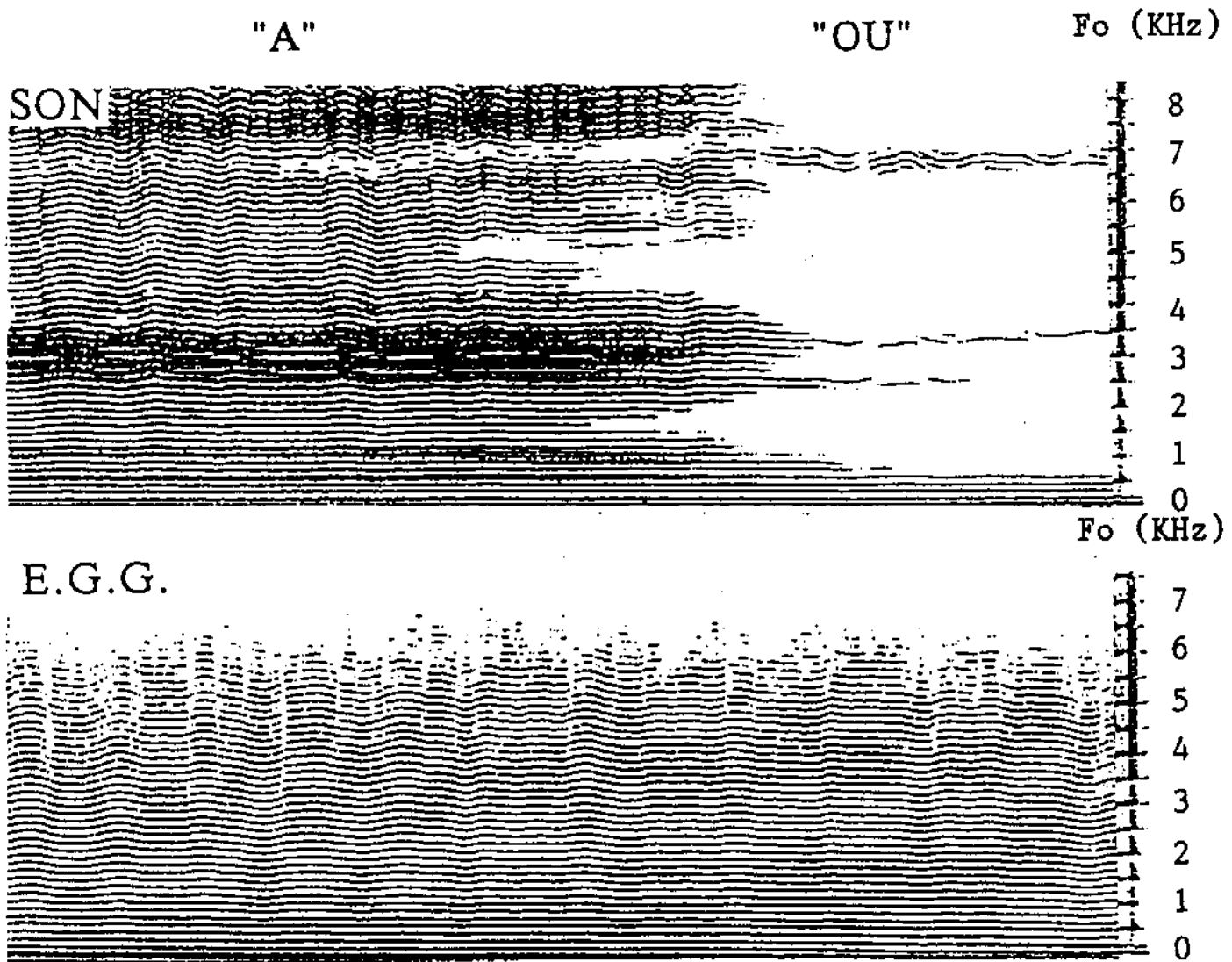
	A		
voyelles ouvertes	O	EU	È
voyelles fermées	o	eû	é
	ou	u	i
	voyelles sombres		voyelles claires





Les consonnes sourdes sont des bruits, donc des sons non périodiques
 Les harmoniques ne sont pas des multiples du fondamental ;
 on les appelle des « partiels »

- Le spectre de l'EKG montre bien que le changement de voyelle s'effectue au niveau résonanciel, le son source étant constant : notion de formant vocalique
- Par contre la richesse du timbre est déterminée au niveau de la source
- Le terme « timbre » s'applique à la fois à la carte d'identité vocale d'un individu et au timbre des différentes voyelles, indépendamment des locuteurs



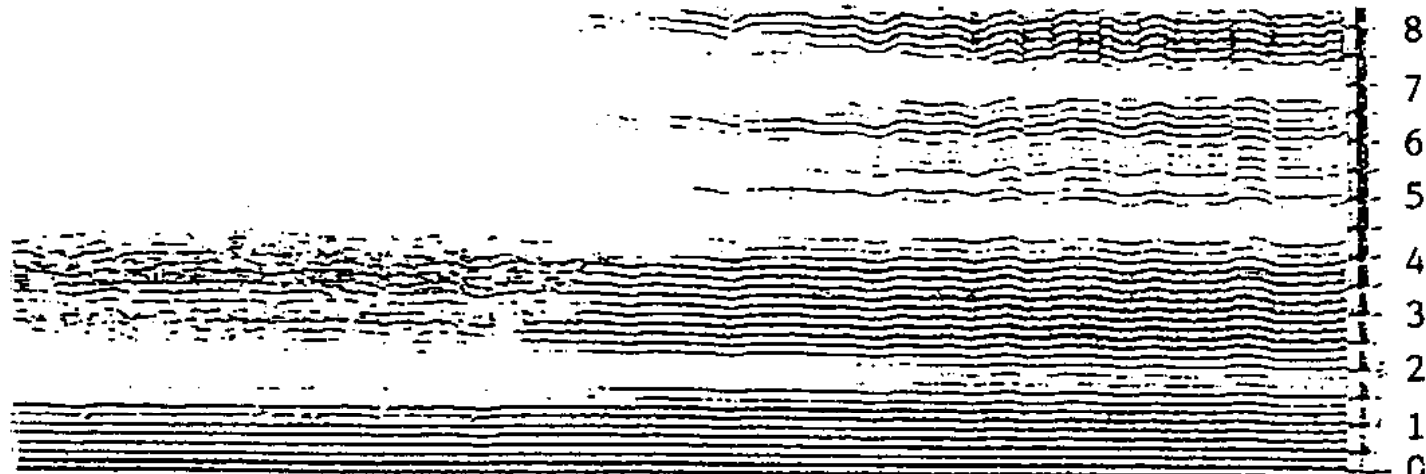
Thèse : Bernard ROUBEAU : Mécanismes vibratoires laryngés et contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale, Paris Sud - centre Orsay - 4 mai 1993

"SOUFFLÉ"

"TIMBRÉ"

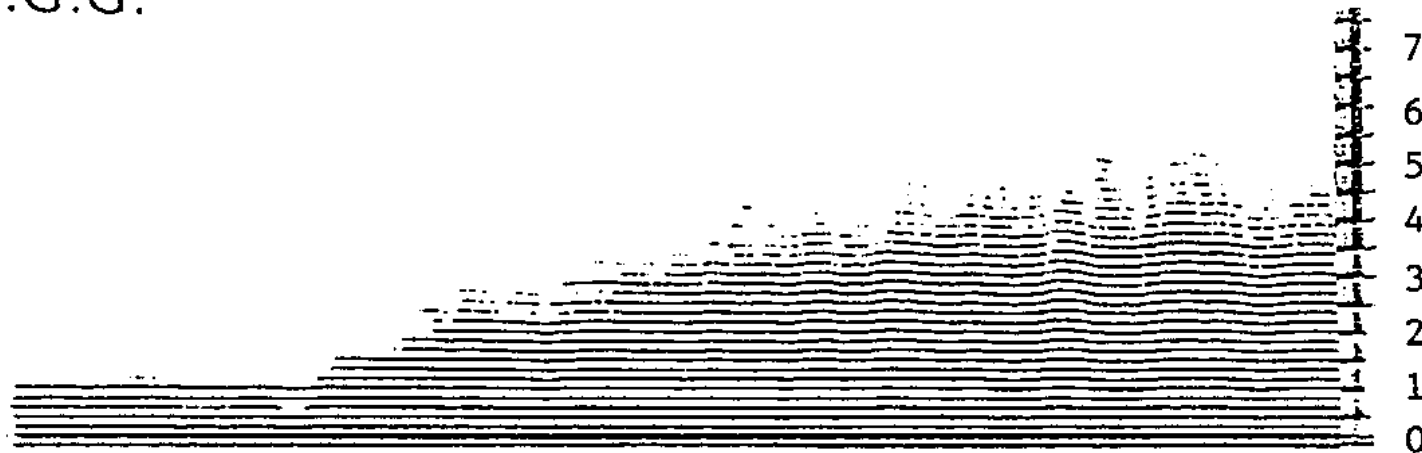
SON

F₀ (KHz)



E.G.G.

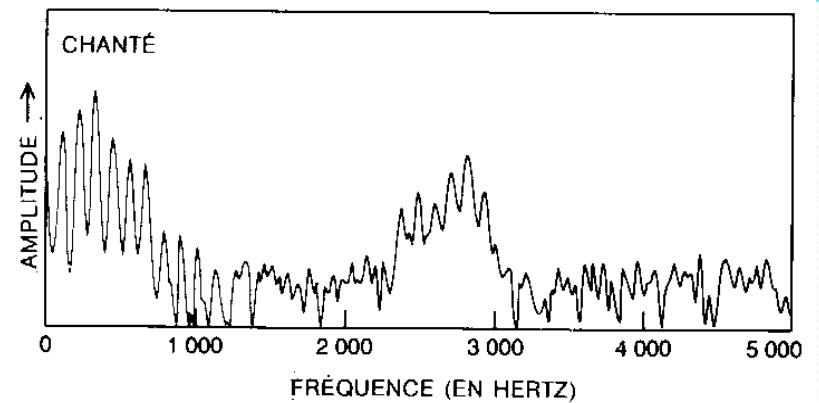
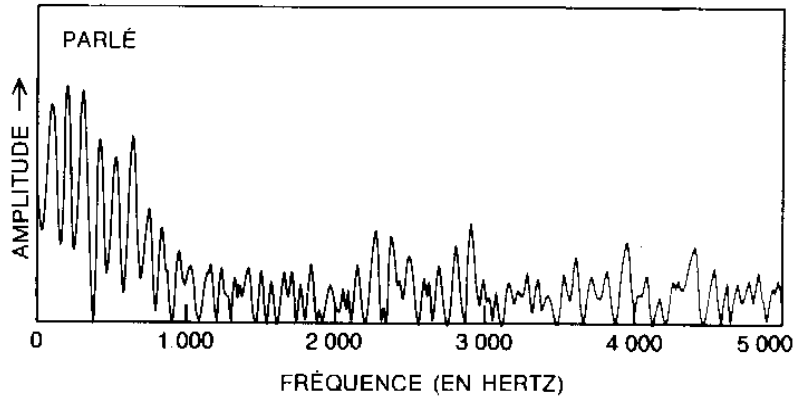
F₀ (KHz)



Thèse : Bernard ROUBEAU : Mécanismes vibratoires laryngés et contrôle neuro-musculaire de la fréquence fondamentale, Paris Sud - centre Orsay - 4 mai 1993

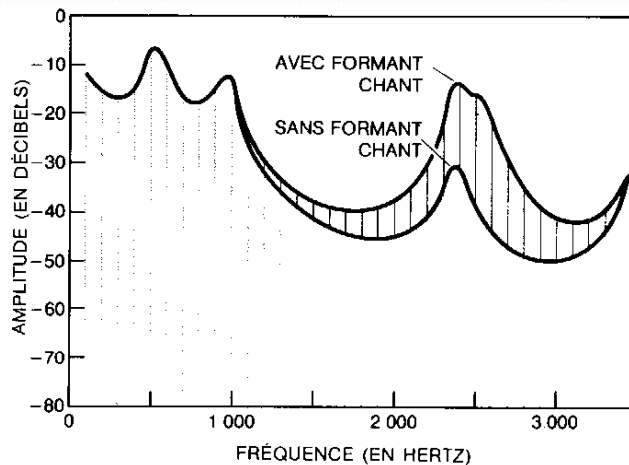
Le singing formant des « chanteurs »

- C'est un formant spécial situé entre 2500 et 3000 Hz entre le 3ème et 4ème formant
- Il permet à la voix du chanteur de « passer » par dessus l'orchestre dont la fréquence moyenne est 450 Hz
- De plus, ce formant est dans la zone de plus grande sensibilité de l'oreille

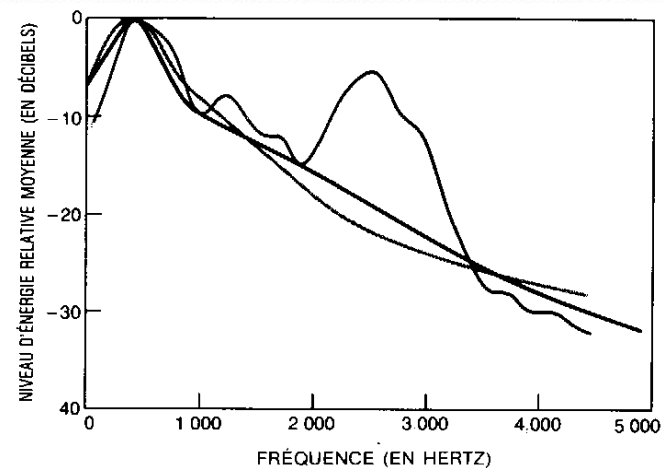


5. LES SONS-VOYELLES SONT DIFFÉRENTS dans la voix parlée et dans la voix chantée : cette différence apparaît dans l'enregistrement de leurs spectres. On compare ici les spectres du son-voyelle *ou*, parlé (à

gauche) et chanté (à *droite*) par un chanteur d'opéra. La différence significative est le pic d'énergie apparaissant entre 2 500 et 3 000 hertz sur le spectre du chant. Ce pic est appelé le « formant-chant ».



6. L'ORIGINE DU FORMANT-CHANT, ainsi que son utilité pour le chant, sont expliquées ici. On a inséré un formant supplémentaire entre les troisième et quatrième formants habituels au cours d'une expérience utilisant un résonateur électronique en guise de conduit vocal (à *gauche*). Le formant supplémentaire accroît de plus de 20 décibels l'amplitude des harmoniques proches de lui ; de même, un formant supplémentaire (qui apparaît lorsque le larynx est abaissé) insère le pic à haute fréquence dans le spectre d'une voyelle chantée. Les trois courbes (à *droite*)



représentent la répartition de l'énergie sonore moyenne pour une musique orchestrale (*en noir*), pour la voix parlée ordinaire (*en gris*) et pour la voix du ténor Jussi Björling chantant avec un orchestre (*en couleur*). Les courbes de distribution d'énergie pour la voix parlée et pour l'orchestre sont très voisines et ce, dans toute la gamme de fréquences. C'est la voix du chanteur d'opéra qui produit le pic apparaissant sur la courbe en couleur, entre 2 000 et 3 000 hertz. Dans cette région la voix du chanteur couvre le son de l'orchestre.

L'accord phono-résonancier

- L'ouverture de la bouche du chanteur est différente en voix parlée et chantée
- Plus il monte dans l'aigu plus il ouvre la bouche
- Ceci a pour conséquence de déplacer le premier formant et de le placer proche du fondamental chanté pour augmenter la portée de la voix

- Ceci est important quand le formant est placé avant le fondamental car il contient beaucoup d'énergie
- Le chanteur travaille ainsi l'homogénéité entre les voyelles et la puissance de sa voix
- Inconvénient : perte de l'intelligibilité

