II. Acoustique de la voix parlée

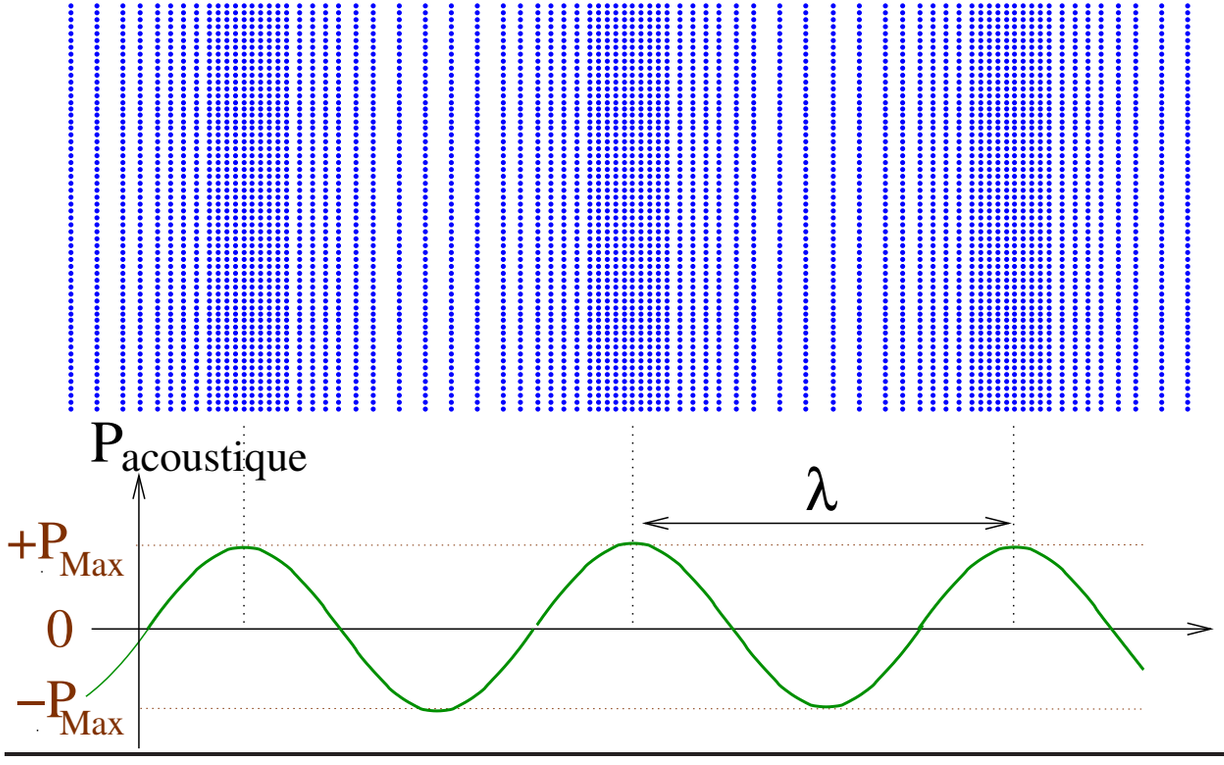
I
1. Notion de propagation d'un son
2. La longueur d'onde
3. Notion de diffraction
4. Notion de réverbération

II
1. Notion de son complexe et de son pur
2. La corde vibrante
3. Fréquences propres de la corde vibrante
4. Spectre d'un son harmonique

III
1. Résonateurs acoustiques
2. Formants et résonance : Spectrogramme
3. Spectrogramme de voyelles
4. Spectrogramme de fricatives
5. Spectrogramme d'occlusives
6. Présentation de cas : Voix sous hélium, chant diphonique

I.1 Notion de propagation d'un son

Définition : Une onde est une perturbation en mouvement qui transporte de l'énergie mais sans transport de matière

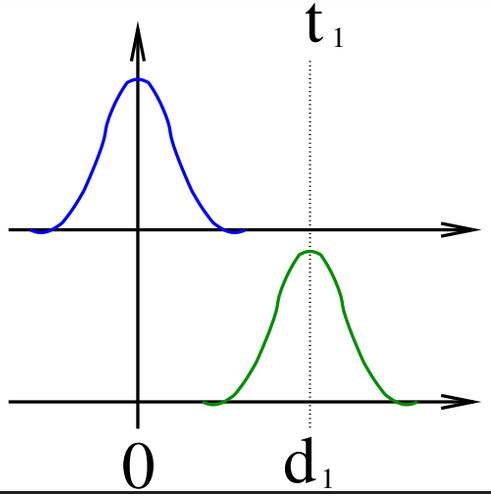


- A un instant donné, une onde acoustique correspond à des variations locales de la densité (et donc de la pression).
- Ces variations locales de la pression se déplacent de proche en proche (effet domino).
- Les molécules d'air ne font que "vibrer" au voisinage de leurs positions

- La Pression acoustique correspond à la variation de la pression par rapport à la pression permanente *i.e.* la pression atmosphérique : $P_{\text{acoustique}} = P - P_{\text{atm}}$
- Une des caractéristiques de l'onde est son amplitude maximum (P_{Max}).
- La période spatiale de l'onde de pression est la longueur d'onde λ (unité : mètre)

I.2 Longueur d'onde et période

Position du problème : Comment relier la période spatiale (λ) et temporelle (T)?



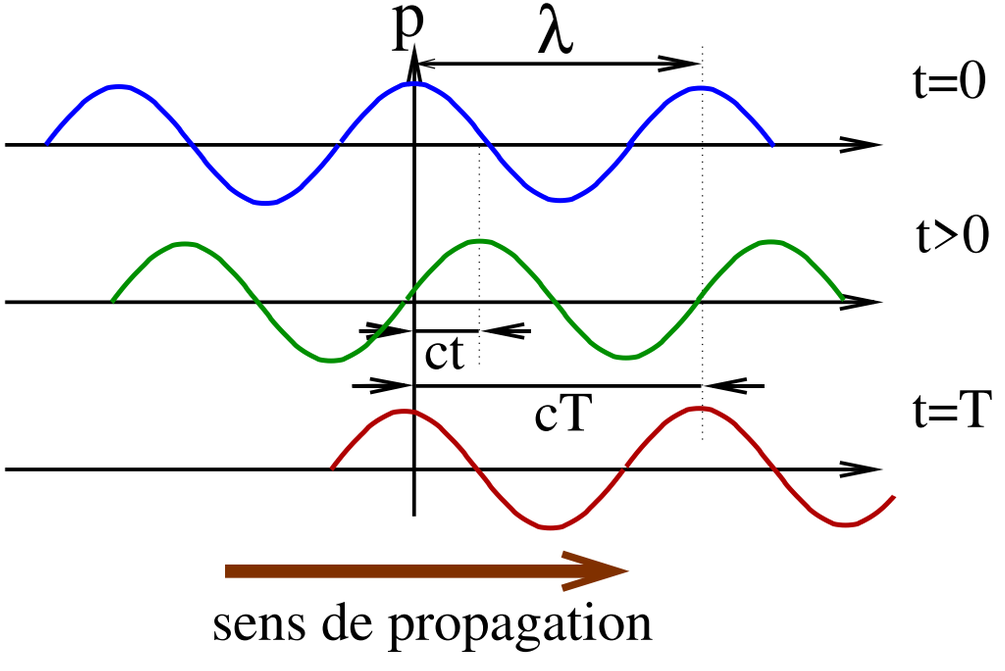
propagation d'une impulsion

- A l'instant $t = 0$ l'impulsion est à l'origine
- A l'instant t_1 l'impulsion s'est déplacée en d_1
- Si l'onde a une célérité c (m/s) $\Rightarrow d_1 = c.t_1$

Onde harmonique

- A la date $t = T$ l'onde s'est déplacée d'une longueur d'onde λ
- La longueur d'onde et la période sont liées par la célérité de l'onde dans le milieu

$$\lambda = cT$$



Bande passante de l'audible

Bande passante de l'oreille :

Fréquence :	$20\,\text{Hz}$	$\Longleftrightarrow$	$20\,\text{kHz}$
Période :	$50\,\mu\text{s}$	$\Longleftrightarrow$	$50\,\text{ms}$
Longueur d'onde :	$17\,\text{mm}$	$\Longleftrightarrow$	$17\,\text{m}$

remarque : A $20\,^\circ$C, $c = 340$ m/s.

Valeurs remarquables :

- Basse : $f < 100$ Hz
- Trèble : $f > 2$ kHz

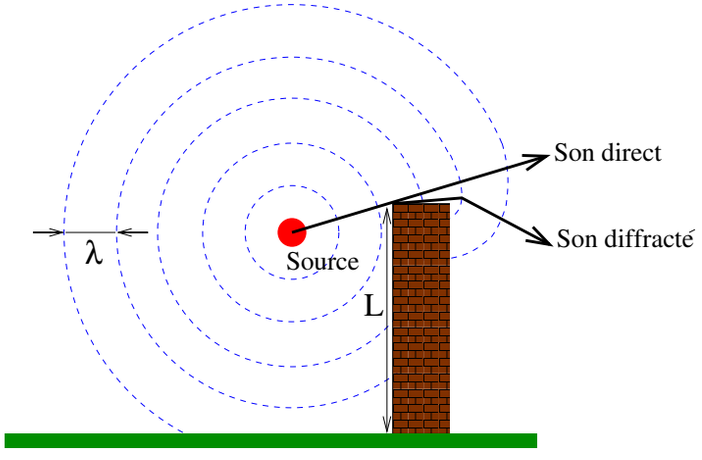
Inaudible :

- Infrason : $\begin{cases} F < 20\,\text{Hz} \\ T > 50\,\text{ms} \\ \lambda > 17\,\text{m} \end{cases}$
- Les infrasons sont ressentis sous forme de vibrations.
- Utilisés par les élephants pour communiquer.
- Ultrason : $\begin{cases} F > 20\,\text{kHz} \\ T < 50\,\mu\text{s} \\ \lambda < 17\,\text{mm} \end{cases}$
- Utilisés pour l'écho-location par les chauves-souris.

- La propagation des sons dépend de la longueur d'onde.
- Les sons sont "déviés" différemment par les objets selon leurs longueurs d'onde.

$I.3$ Notion de diffraction

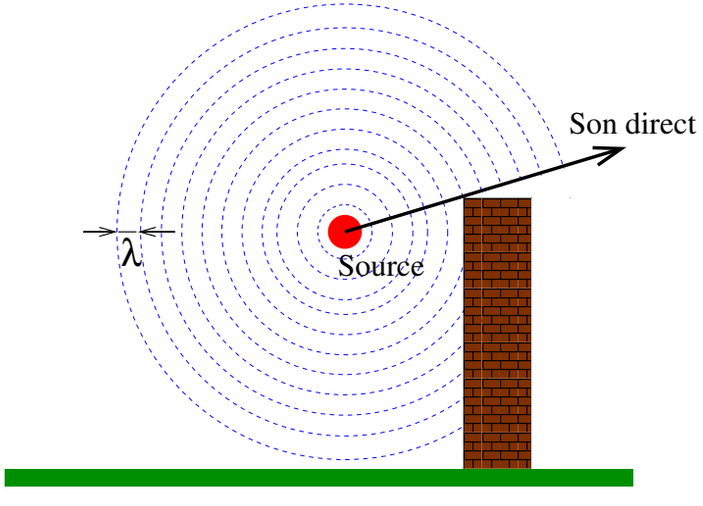
Basse :



$$\lambda \simeq L$$

- Les ondes sonores semblent "accrocher" (diffracter) sur les objets.
- La diffraction dépend de λ et des dimensions des objets.
- Elles sont perçues même en présence d'un objet masquant.

Trèble :



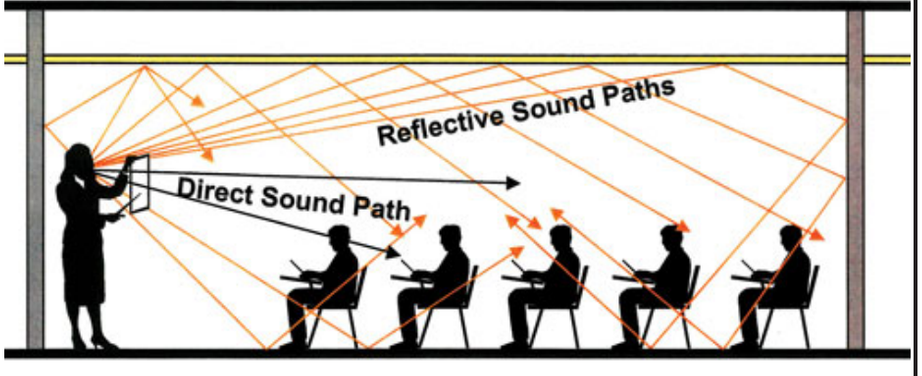
$$\lambda \ll L$$

- Les ondes sonores ne sont pas perturbées par les objets.
- Un objet masquant va arréter l'onde et empécher sa perception.
- On parle de son "détimbré" quand les hautes fréquences sont atténuées.

$I.4$ Notion de réverbération

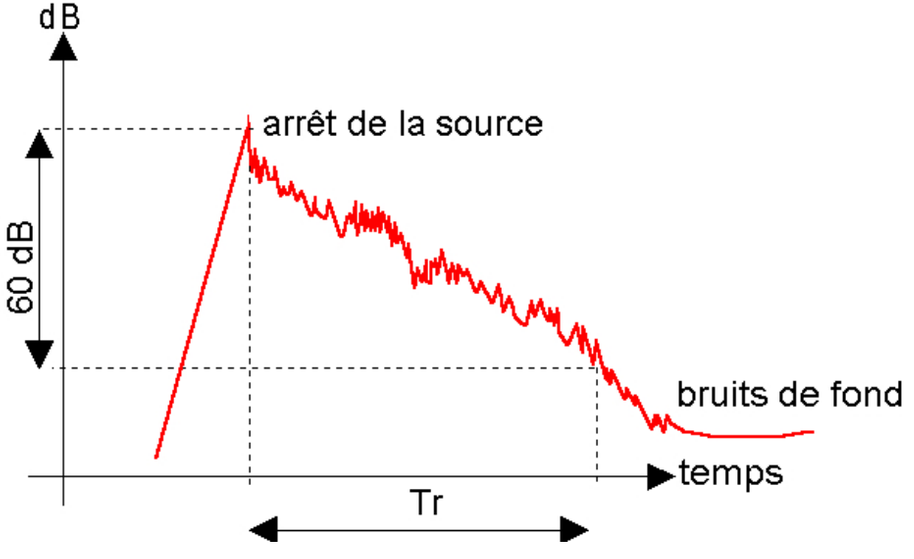
La réverbération est la persistance d'un son dans un milieu après l'interruption de la source sonore.

- Dans une salle, un son est diffusé par les parois.
- Un auditeur perçoit : { Le son direct / Le son réverbéré



- Le son réverbéré dépend :
  - Du volume de la salle
  - De l'absorption des parois
- Du fait de la persistance du son, on a un renforcement de l'intensité acoustique.
- Il est possible de créer artificiellement un effet de réverbération pour de la musique.

- Une grandeur permettant de le caractériser est **le temps de réverbération** T_r



Formule de Sabine : $T_r = \frac{0{,}16.V}{A}$

V : Volume de la pièce, S :Surface des parois, $A = \alpha.S$, avec α coefficient d'absorption des parois.

- Pour la voix parlée, il est préférable d'avoir un T_r petit.
- Pour la musique, un plus grand T_r apporte de l'harmonie (église).

Calcul du temps de réverbération

Le Coefficient d'absorption se définit comme :

α = Energie absorbée/Energie incidente

- Si $\alpha = 0$, la paroi est totalement réfléchissante.
- Si $\alpha = 1$, la paroi est totalement absorbante.
- α dépend de la fréquence.

Exemples :

f (Hz)	125	500	2000
Draperie	$0,05$	$0,35$	$0,40$
Béton	$0,32$	$0,22$	$0,19$

Une draperie de 2 m^2 et $\alpha = 0,35$ à 500 Hz possède une absorption $A = 0,7$ m^2. Cela correspond à une surface de $0,7$ m^2 d'un matériau parfaitement absorbant.

Pour une salle hétérogène il faut additionner les absorptions de tous les matériaux :

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \ldots$$

Calcul du $\mathbf{T_r}$:

Salle de volume 750 m^3 et de surface 550 m^2. Les parois ont un coeff. d'abs. $0,15$. Un mur est orné d'une draperie de dim. 6 m $\times$ 4 m et de coeff $0,7$.

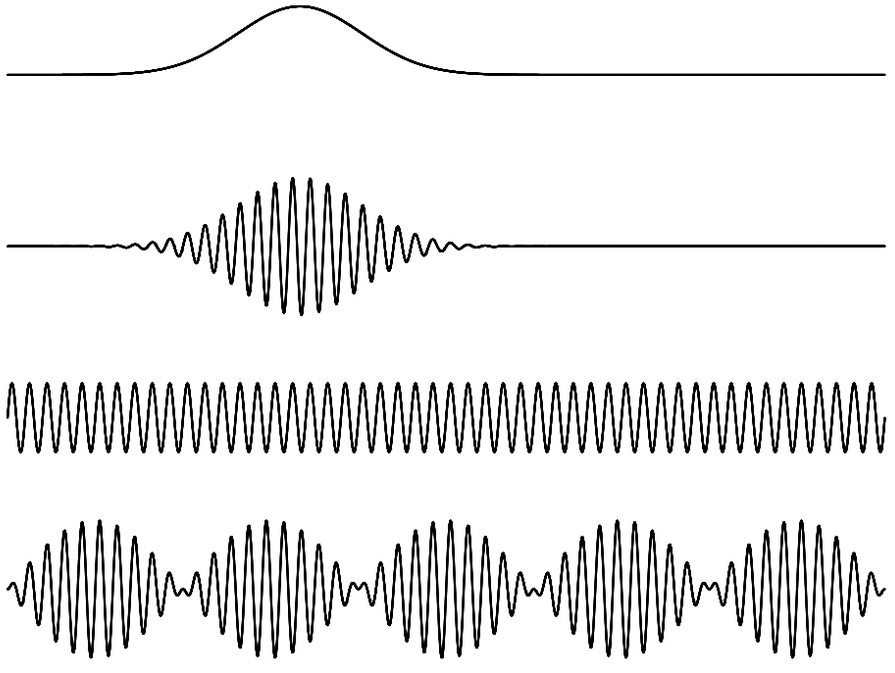
$$A = (550 - 6 \times 4) \times 0,15 + 6 \times 4 \times 0,7 = 96\,\text{m}^2$$

$$T_r = 0,16 \times 750/96 = 1,25\,\text{s}$$

Valeurs typiques :

Bureau individuels	$< 0,6$ s
Salle de cours	$< 0,4\ s$
Salle de musique	< 1 s

II.1 Notion de son complexe et de son pur



Formes d'ondes:

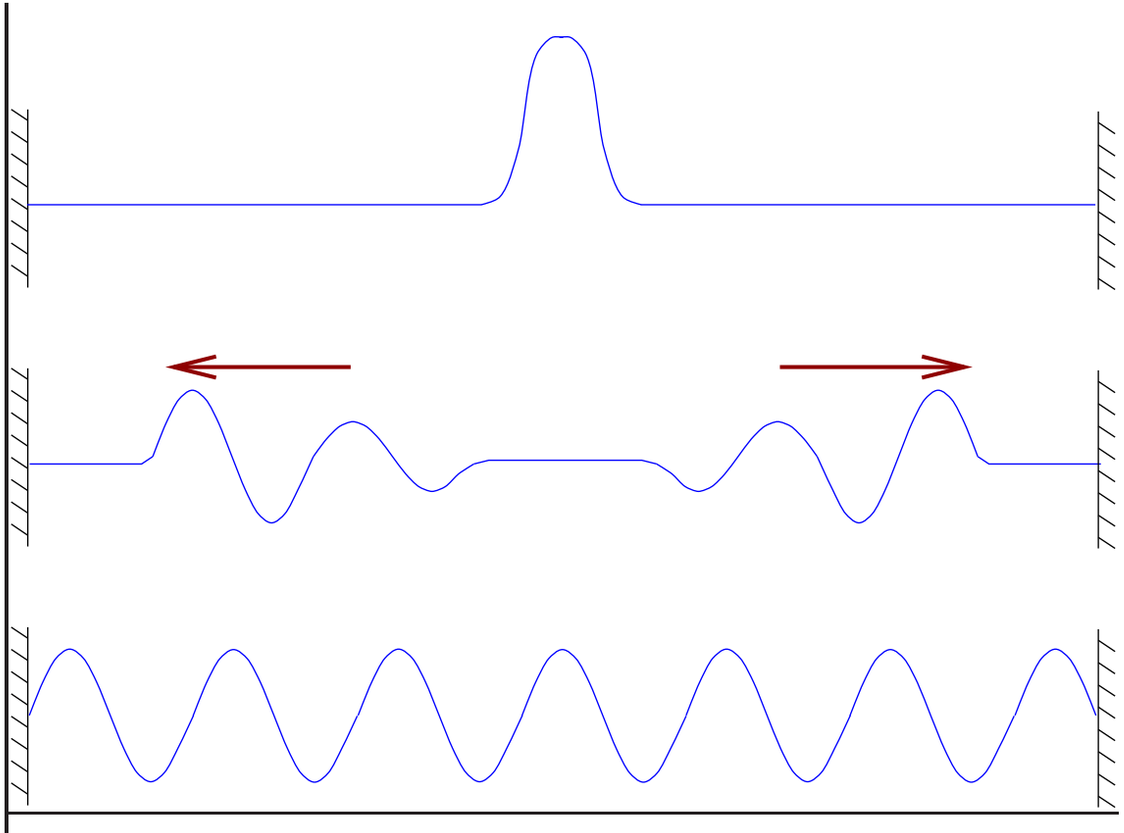
- Impulsion : Front d'onde unique $\rightarrow$ onde de choc.
- Paquet d'ondes : Correspond à un son "complexe". C'est la somme d'un grand nombre de sons purs. Peut être périodique ou non (cf "si").
- Onde plane : Correspond à un son "pur" ou harmonique.
- Train d'ondes : Correspond à la modulation d'un son pur par un autre.

Notion de son complexe et d'harmoniques :

- Un son complexe quelconque (non périodique) correspond à la superposition de sons purs ayant des fréquences sans liens entre elles.
- Un son complexe périodique (par exemple un son voisié) ne fait intervenir que des sons purs à des fréquences données (on parle alors d'harmoniques).
- En particulier, les harmoniques des sons voisés ont des fréquences multiples d'un son pur de référence, le fondamental.

II.2 La corde vibrante

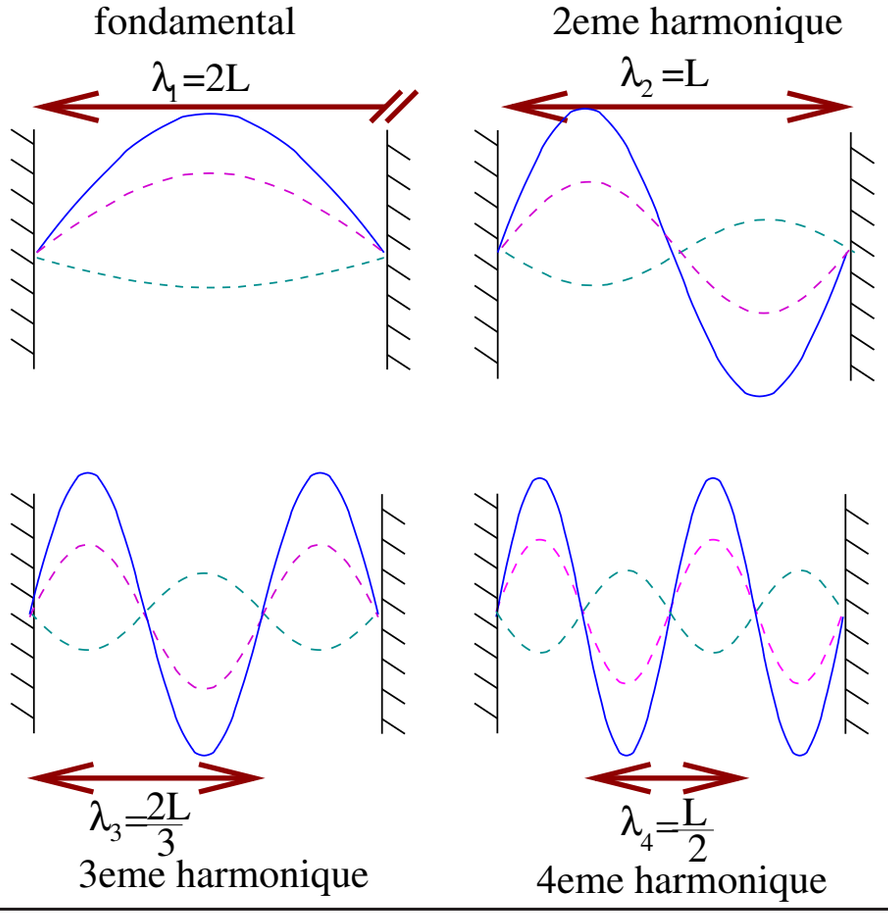
- La corde est fixée à ses deux extrémités sur des supports.
- À l'instant initial, on déforme la corde (Dans un piano, la corde est frappée par un marteau).
- Cette déformation (ou ondes) se propage à droite et à gauche.
- Ces ondes sont ensuite réfléchies par les supports.
- Après un grand nombre de réflexions, il apparaît une onde stationnaire sur la corde. La corde vibre sans déplacement apparent.
- Cette phase initiale avant l'apparition de l'onde stationnaire est très courte (quelques ms).
- Le fait que la corde soit fixée impose des contraintes sur les caractéristiques de l'onde.
- Aux extrémités, l'amplitude de l'onde est obligatoirement nulle.



- Sur la corde, on ne peux avoir qu'un nombre entier de "déformations".
- La longeur d'onde de l'onde générée sur la corde ne peux avoir que certaines valeurs liées à la longeur de la corde.

II.3 Fréquences propres de la corde

Condition sur λ : λ doit être un sous-multiple de $2L$ (L longeur de la corde).



- Conséquences : La corde ne peut vibrer qu'a certaines fréquences.
- La plus basse fréquence ($f_1 = c/2L$) est appelée le fondamental.
- Les autres fréquences possibles (ou harmoniques) sont un multiple de f_1.

Fondamental	$\lambda_1 = 2L$	$f_1 = c/2L$
2^{eme} harmonique	$\lambda_2 = \lambda_1/2$	$f_2 = 2 \times f_1$
3^{eme} harmonique	$\lambda_3 = \lambda_1/3$	$f_3 = 3 \times f_1$
4^{eme} harmonique	$\lambda_4 = \lambda_1/4$	$f_4 = 4 \times f_1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

- f_1 dépend de L et de c.
- c dépend de la tension de la corde.
- $c = \sqrt{\text{tension}/\text{masse linéique}}$
  tension (N), masse linéique (kg/m)

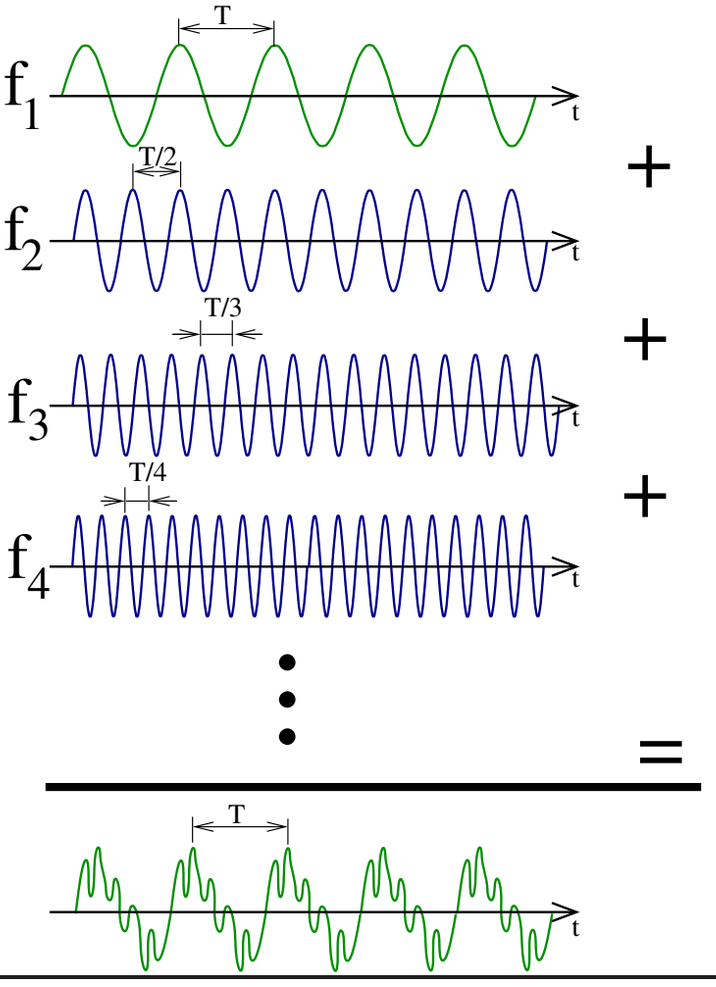
Conséquences :

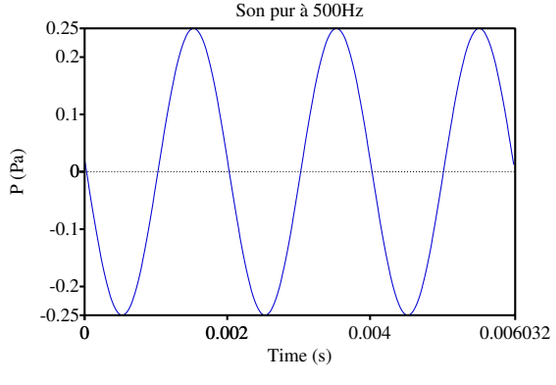
- Si L augmente, f_1 diminue.
- Si la tension augmente, c augmente et f_1 augmente.

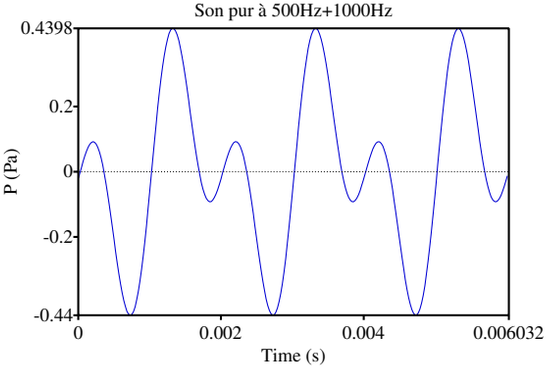
Extension aux sons voisés

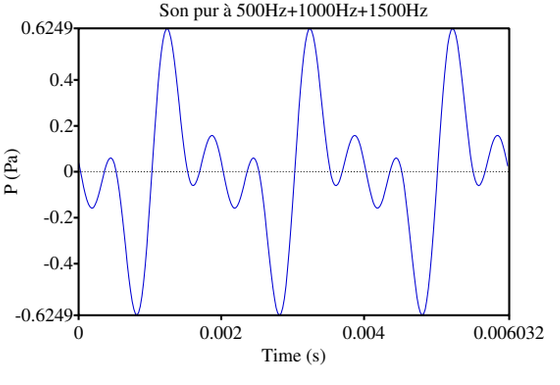
- Les sons voisés sont constitués d'harmoniques (Leurs fréquences sont multiples du fondamental).

- La période des harmoniques est un sous multiple de T.
- La fréquence du fondamental (1^{ere} harmonique) définit la fréquence de son.
- En effet, l'addition d'harmoniques au fondamental n'altère pas sa fréquence. Elles ne font que "rajouter des oscillations" sans affecter la périodicité.
- Plus l'on rajoute d'harmoniques, plus l'on enrichit le timbre du son.









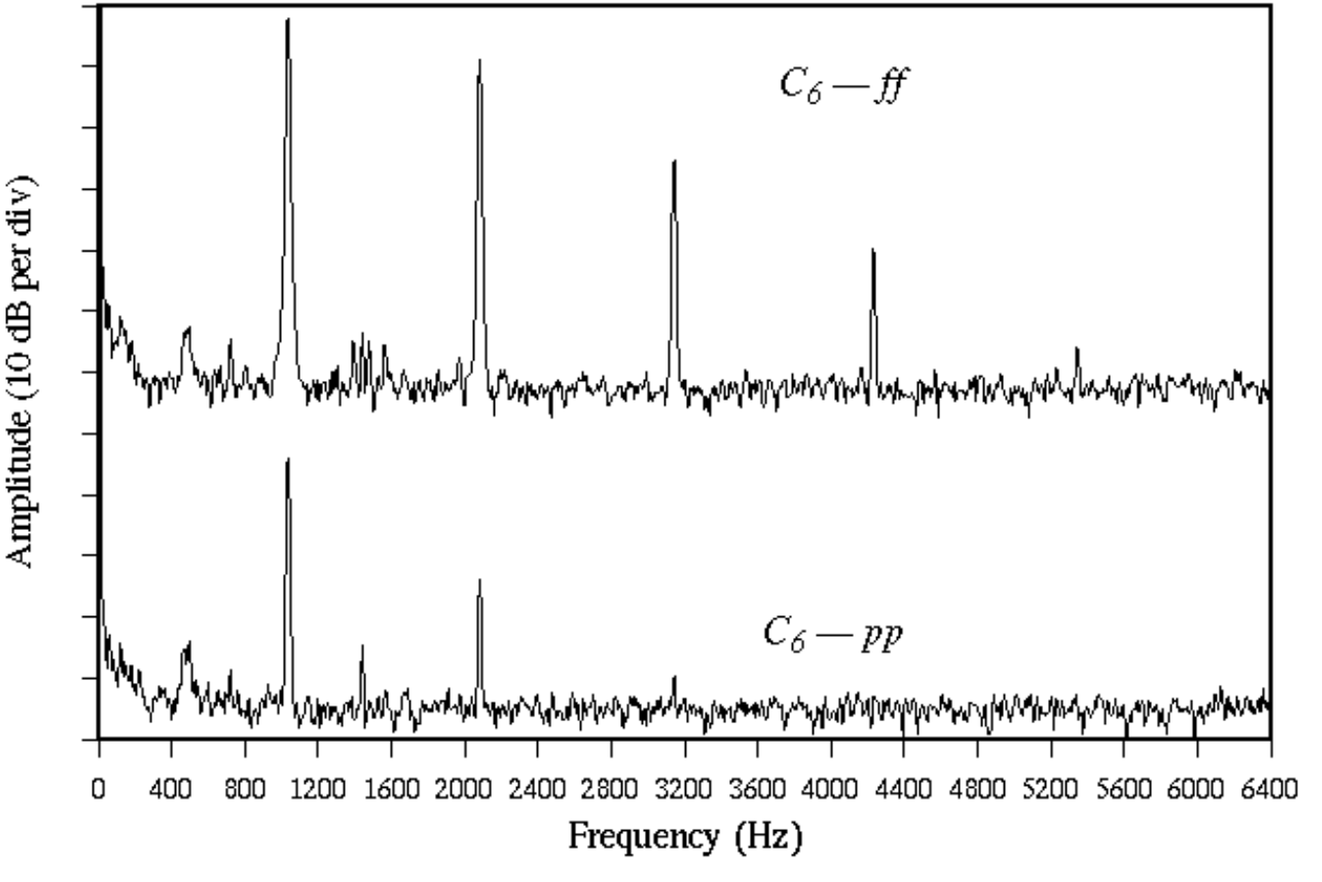
II.4 Spectre d'un son harmonique

Spectre : Graphique représentant l'amplitude (en dB) des différentes harmoniques

- Le fondamental (f_1) correspond au pic à la plus basse fréquence.
- Les autres pics apparaissant sont les harmoniques.
- L'amplitude des harmoniques tend à décroitre jusqu'à devenir nulle.

Timbre $\Leftrightarrow$ Richesse en harmoniques Hauteur $\Leftrightarrow$ Fréquence du fondamental

- Spectre du Do (C) de la 6^{eme} octave (1046 Hz) d'un piano joué *fortissimo (ff)* et *pianissimo (pp)*.
- Le *fortissimo* a un timbre plus riche que le *pianissimo*.
- Les pics correspondant à la 2^{eme}, 3^{eme}, 4^{eme} et 5^{eme} harmonique sont aux fréquences : 2092 Hz, 3138 Hz, 4184 Hz et 5230 Hz.

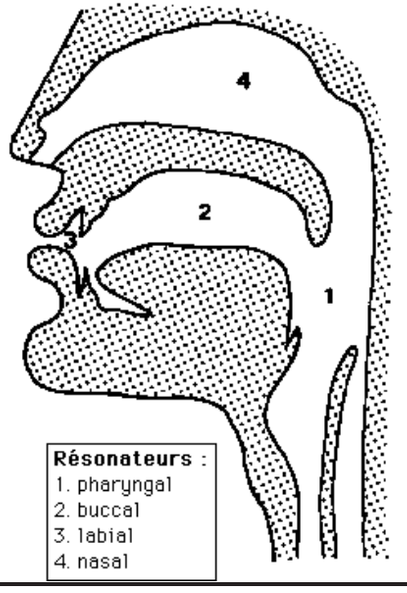


III.1 Résonateur acoustique

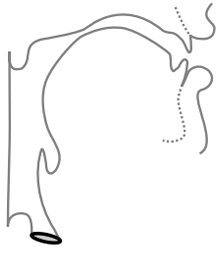
Définition : Système acoustique pouvant entrer en résonance à des fréquences propres données.

- Un résonateur **n'est pas une source sonore**.
- La résonance correspond à une "amplification" de la pression acoustique aux fréquences de résonance.
- Un résonateur est **passif**, il n'apporte pas d'énergie.
- Exemples : Bouteille en verre, tuyaux d'orgues, flûte.

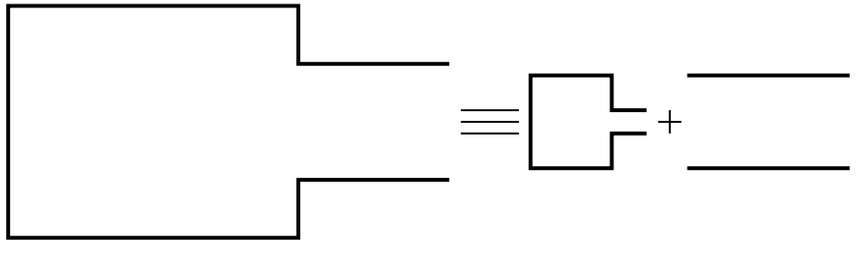
- Les sons voisés sont produits par la glotte et se propagent jusqu'aux lèvres.
- L'ensemble du tractus vocal correspond à une succession de résonateurs.
- Il joue un rôle de filtre en fréquence sur le son produit par la glotte.



Exemples :

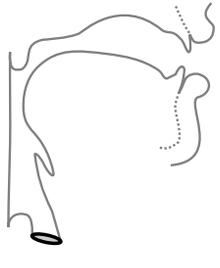


[i]
antérieur rétractée

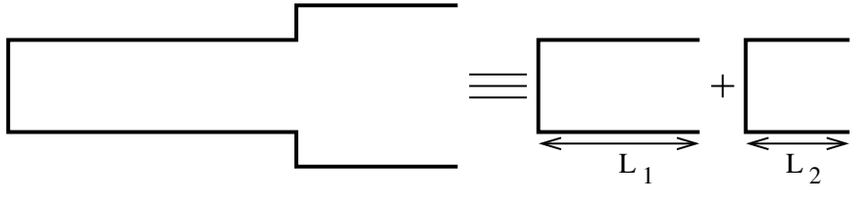


Résonateur de Helmholtz + tuyau ouvert

$F_1 = 400\,\text{Hz}$
(Helmholtz)
$F_2 = 2500\,\text{Hz}$
(Tube ouvert)



[a]
ouverte

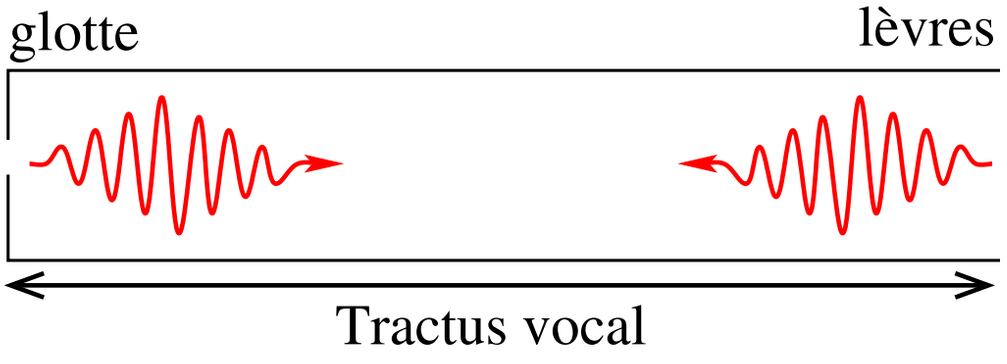


2 tuyaux ouvert-fermé

$F_1 = 1000\,\text{Hz}$
(Tube ouvert-fermé L_1)
$F_2 = 1500\,\text{Hz}$
(Tube ouvert-fermé L_2)

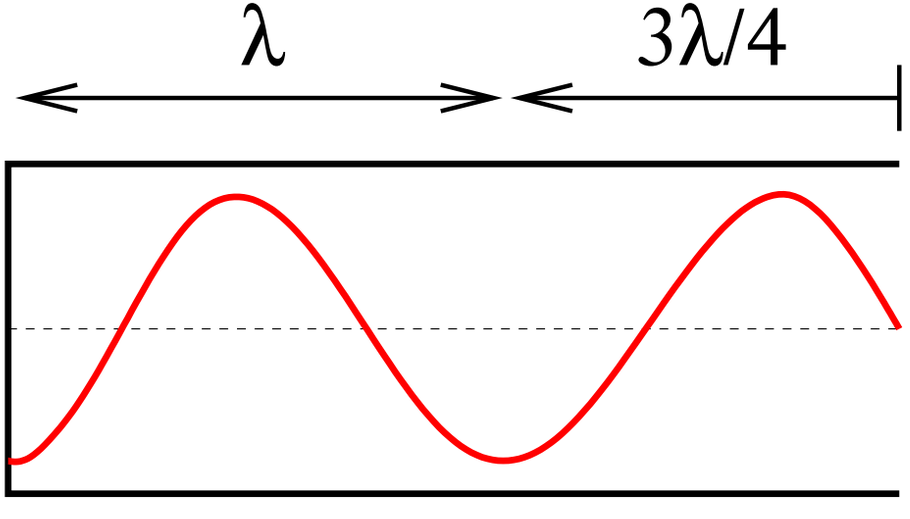
Principe d'un résonateur

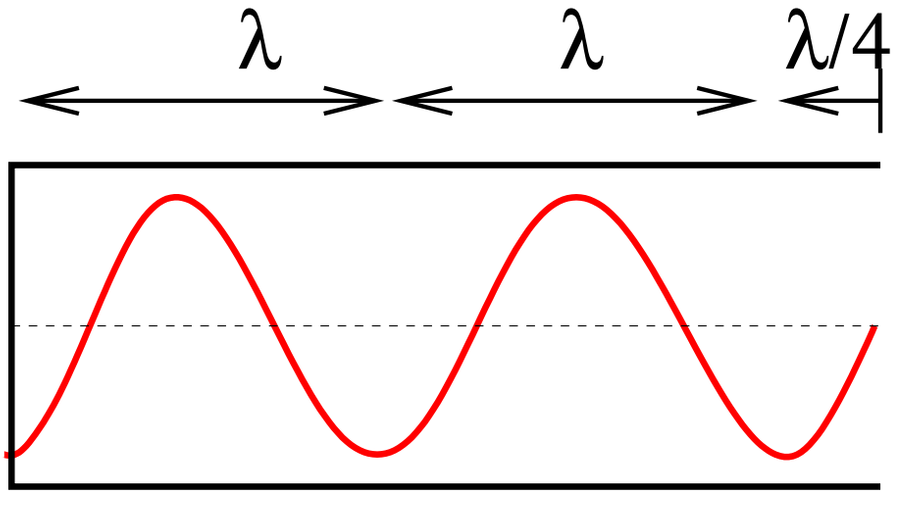
Principe d'un tuyau ouvert : L'onde émise par la glotte subit une réflexion au niveau des lèvres.



- Pour l'onde, le passage d'une région de section finie (le tuyau) au milieu extérieur, correspond à un changement de milieu.
- Cela correspond à un changement d'impédance.
- Il se forme une onde stationnaire dans le tuyau.

- A l'extrémité ouverte (lèvres) la pression acoustique doit tendre vers zéro$\Rightarrow$ Noeud de pression.
- A l'extrémité fermée (glotte) la pression acoustique est maximum. $\Rightarrow$ Ventre de pression.
- Cela impose des contraintes sur λ (liée à la longueur du tuyau).
- sur la longueur du tuyau, l'onde a nécessairement un $1/4$ de λ en plus ou moins.





Fréquences de résonance

Lien entre L et λ :

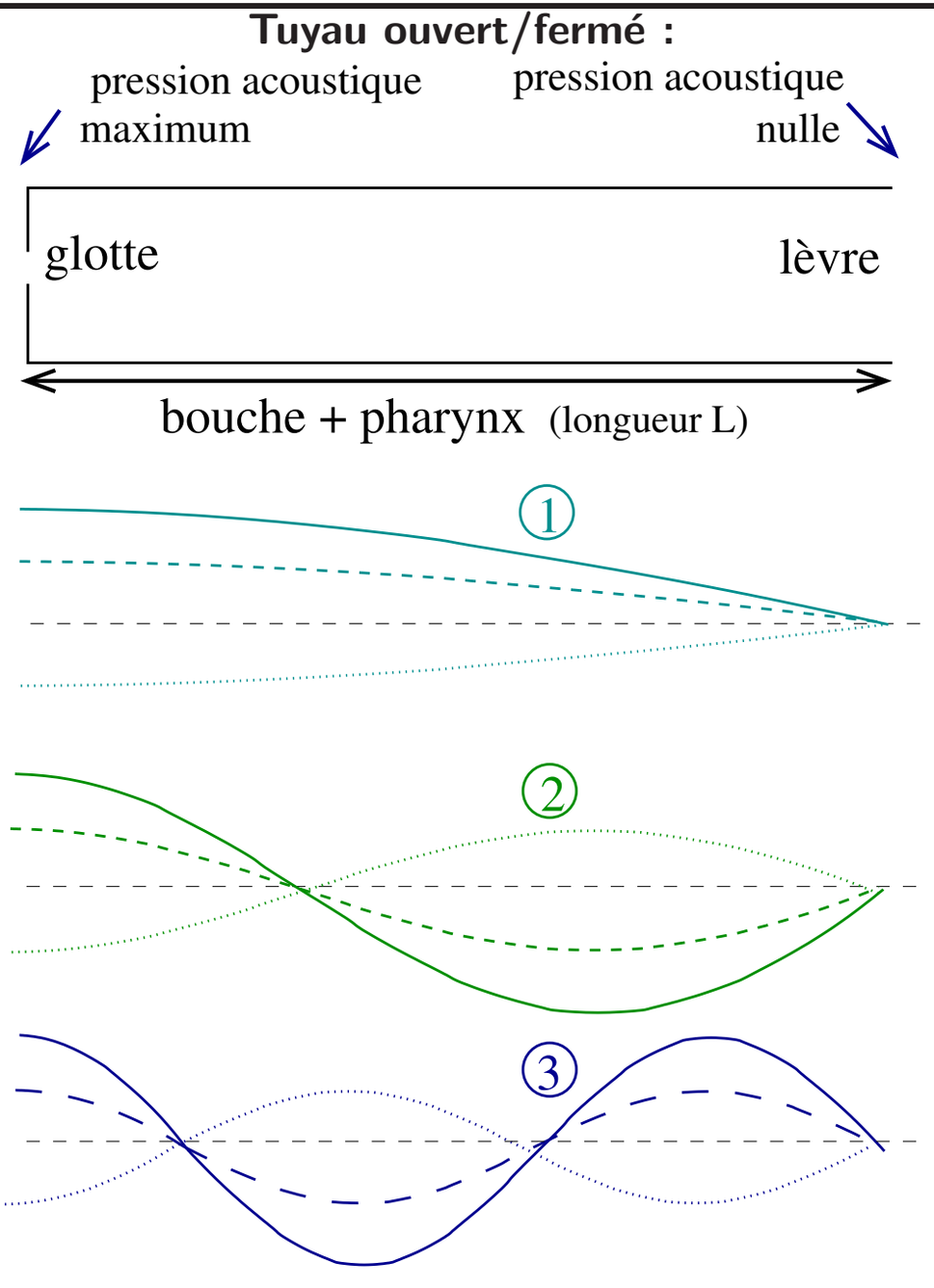
cas 1 : $L = \frac{1}{4}\lambda_1 \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_1 = 4L$

cas 2 : $L = \frac{3}{4}\lambda_2 \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_2 = 4L/3$

cas 3 : $L = \frac{5}{4}\lambda_3 \quad \Leftrightarrow \quad \lambda_3 = 4 \times L/5$

$$F_1 = \frac{c}{4L}\,, \quad F_2 = 3 \times F_1\,, \quad F_3 = 5 \times F_1$$

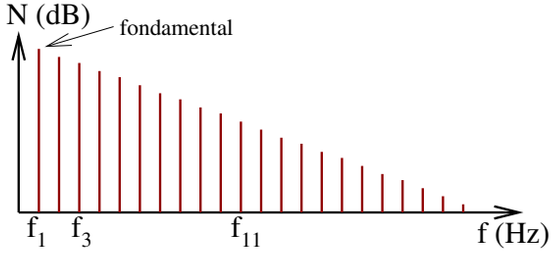
- F_1, F_2, ... sont les fréquences de résonance.
- **Elles ne caractérisent pas la fréquence d'un son.**
- Ce sont les fréquences pour lesquelles les sons seront renforcés.
- Les sons voisés conservent leur structure harmonique.
- Les harmoniques prochent de ces fréquences de résonance sont renforcées.
- Les autres sont atténuées.



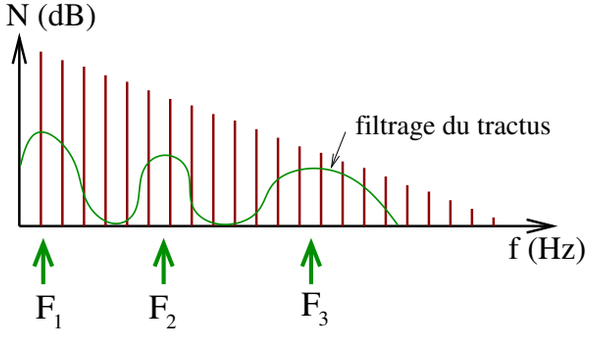
Modèle simplifié du tractus vocal pour une voyelle ouverte.

III.2 Formants et spectrogramme

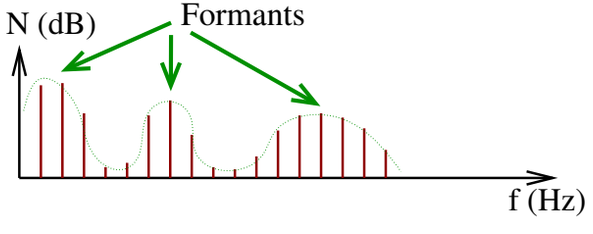
Spectre d'un son voisé :



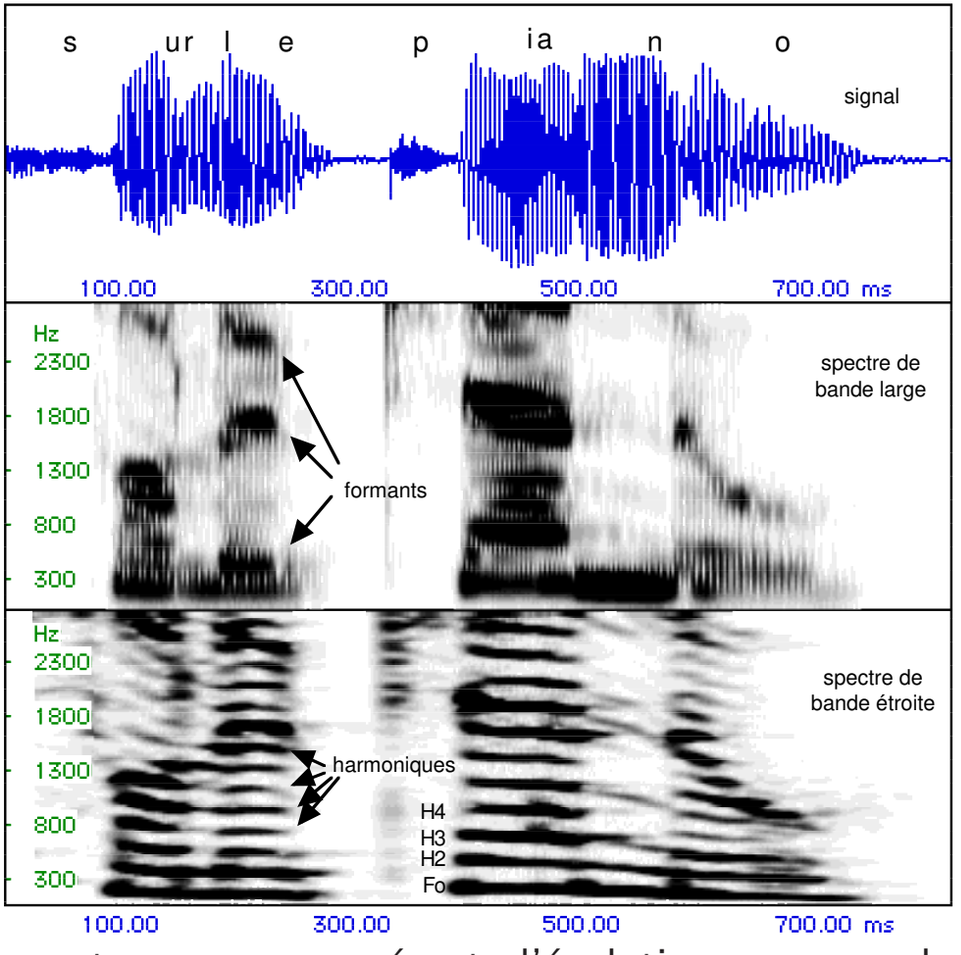
- Le son issu de la glotte fait apparaître des harmoniques.



- Le tractus vocal va filtrer ce son (filtrage selon la fréquence).

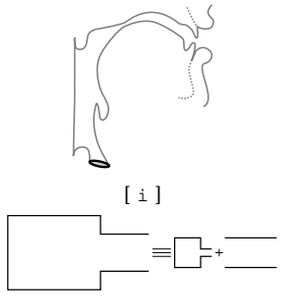


- Le son produit se décompose toujours en harmoniques mais leurs amplitudes ont été modulées selon leurs fréquences $\Rightarrow$ **Formants**.

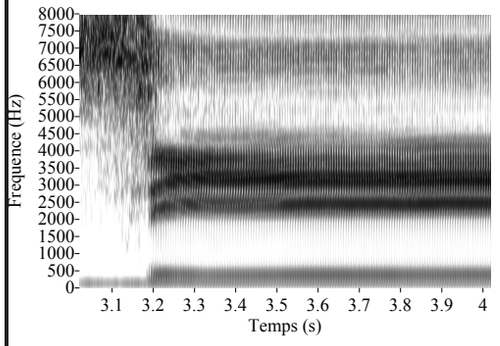


- Un spectrogramme représente l'évolution au cours du temps du spectre.
- Les variations d'amplitude apparaissent en "niveaux de gris". noir $\rightarrow$ intense.
- "bande étroite" : Grande précision sur les fréquences, les amplitudes sont nivelées.
- "bande large" : Grande précision sur les amplitudes, moins précis en fréquence.

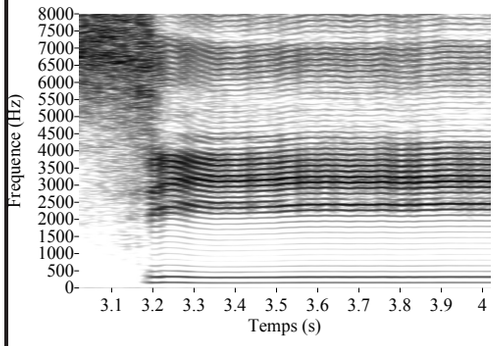
III.3 Spectrogramme de Voyelles



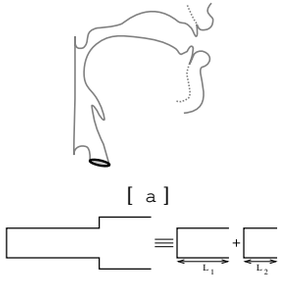
$F_1 = 400$ Hz
$F_2 = 2500$ Hz
$F_3 = 3000$ Hz



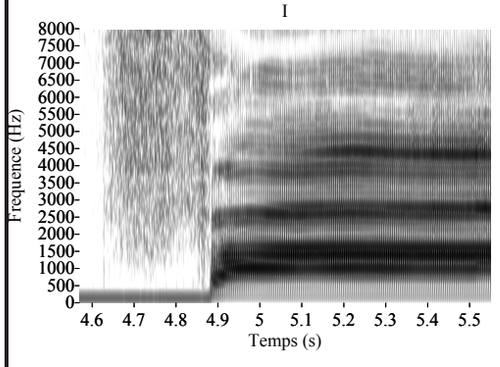
[siː] "bande large"



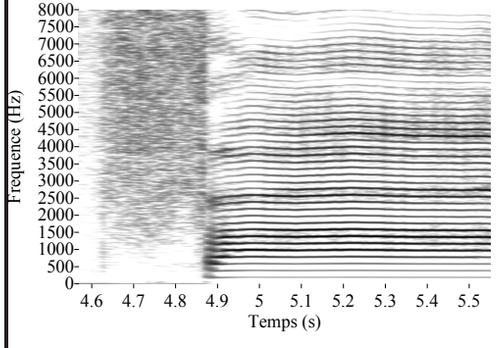
[siː] "bande étroite"



$F_1 = 1000$ Hz
$F_2 = 1500$ Hz
$F_3 = 2500$ Hz



[faː] "bande large"

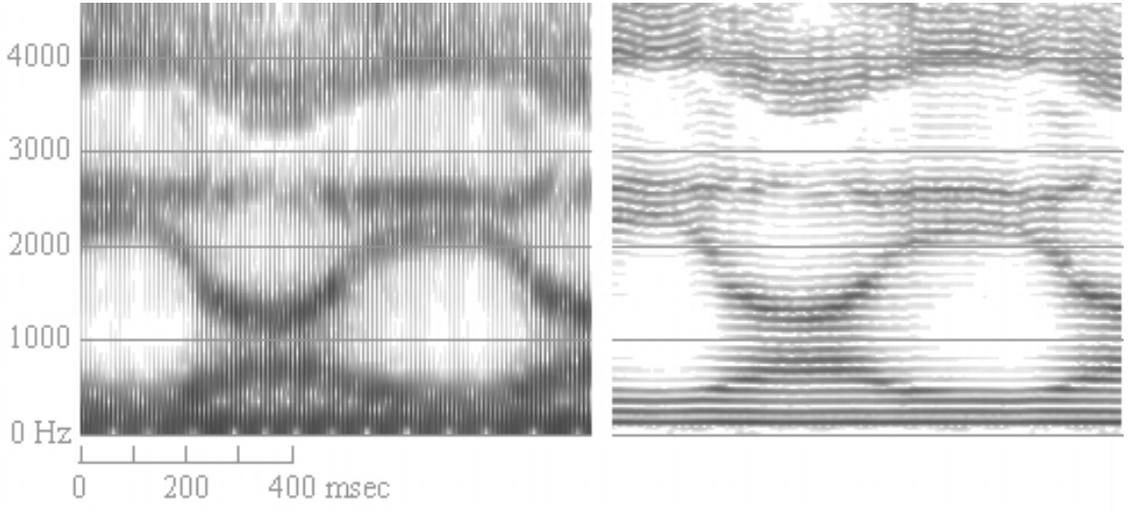


[faː] "bande étroite"

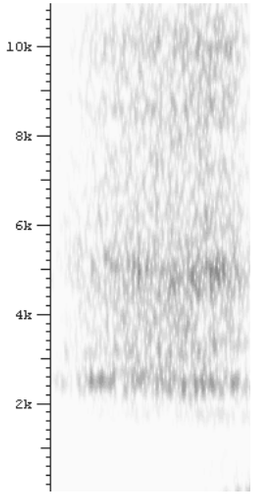
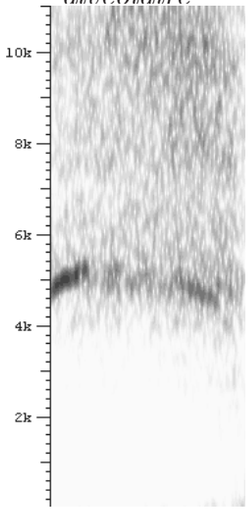
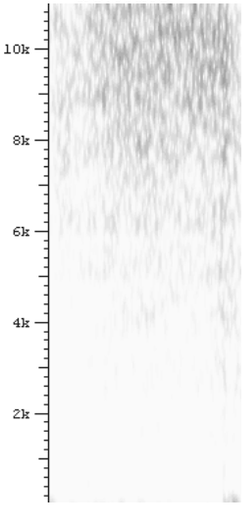
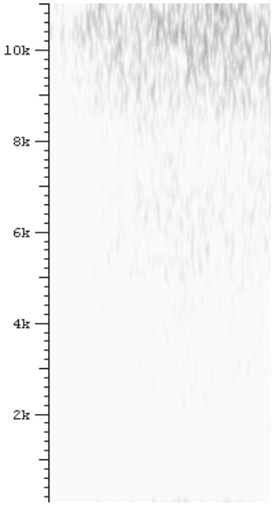
Diphtongue :

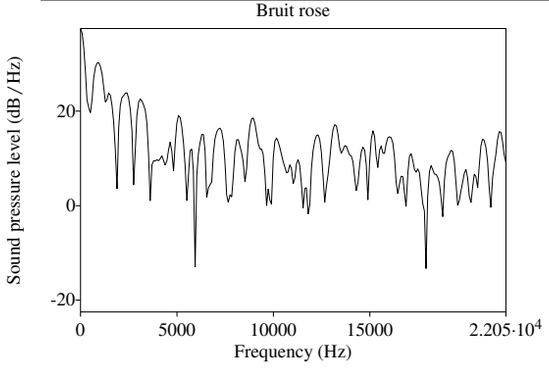
- Voyelle dont le point d'articulation varie pendant sa réalisation $\Rightarrow$ variation du mode articulatoire.
- La structure formantique évolue au cours du temps.
- Exemple anglosaxons : "I" [ɪaɪa]

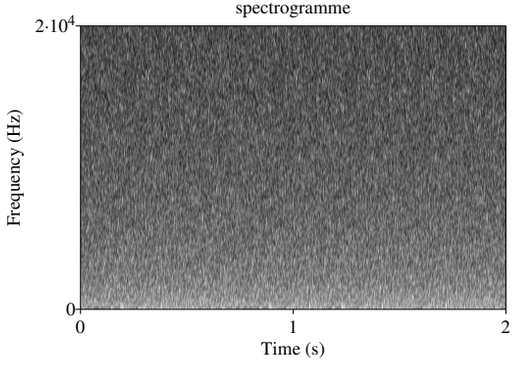
bande large *bande étroite*



III.4 Spectrogramme de fricatives

$\int$	s	θ	f
post alvéolaire	*alvéolaire*	*dentale*	*labio dentale*
			
$2,5\,\text{kHz} < F_{\text{rés.}} < 5\,\text{kHz}$	$4\,\text{kHz} < F_{\text{rés.}} < 8\,\text{kHz}$	$F_{\text{rés.}} \simeq 8\,\text{kHz}$	$F_{\text{rés.}} > 10\,\text{kHz}$





- bruit : superposition d'une infinité de sons de différentes fréquences.
- Fricatives : phénomène turbulent cahotique donnant lieu à du bruit.
- La cavité après le point de friction joue un role de filtre (résonateur de Helmholtz).
- La fréquence de résonance est inversement proportionelle au volume de la cavité.

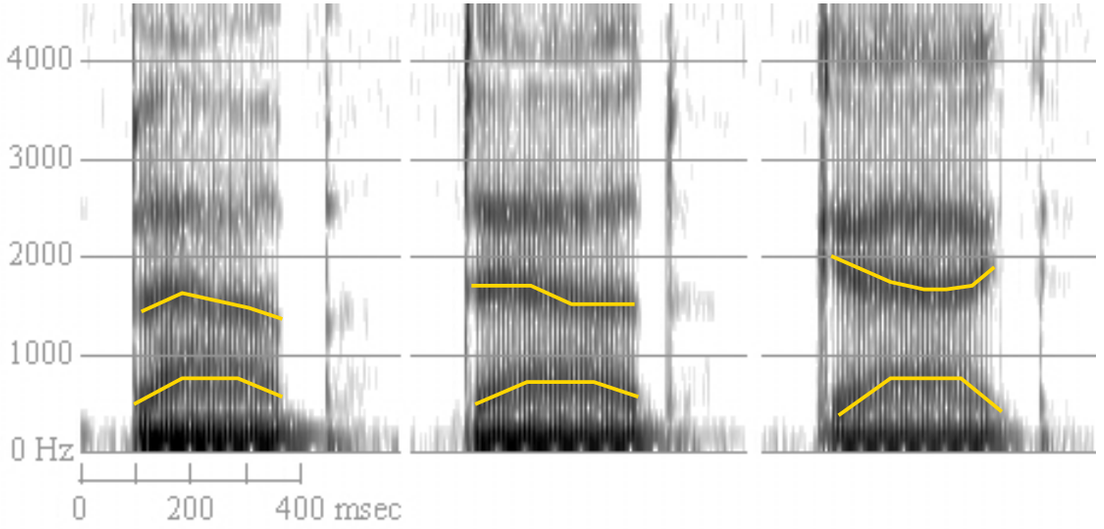


$$F_{\text{rés}} = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{A}{V \times L}}$$

A,L : Aire et longueur du goulot, V : Volume cavité

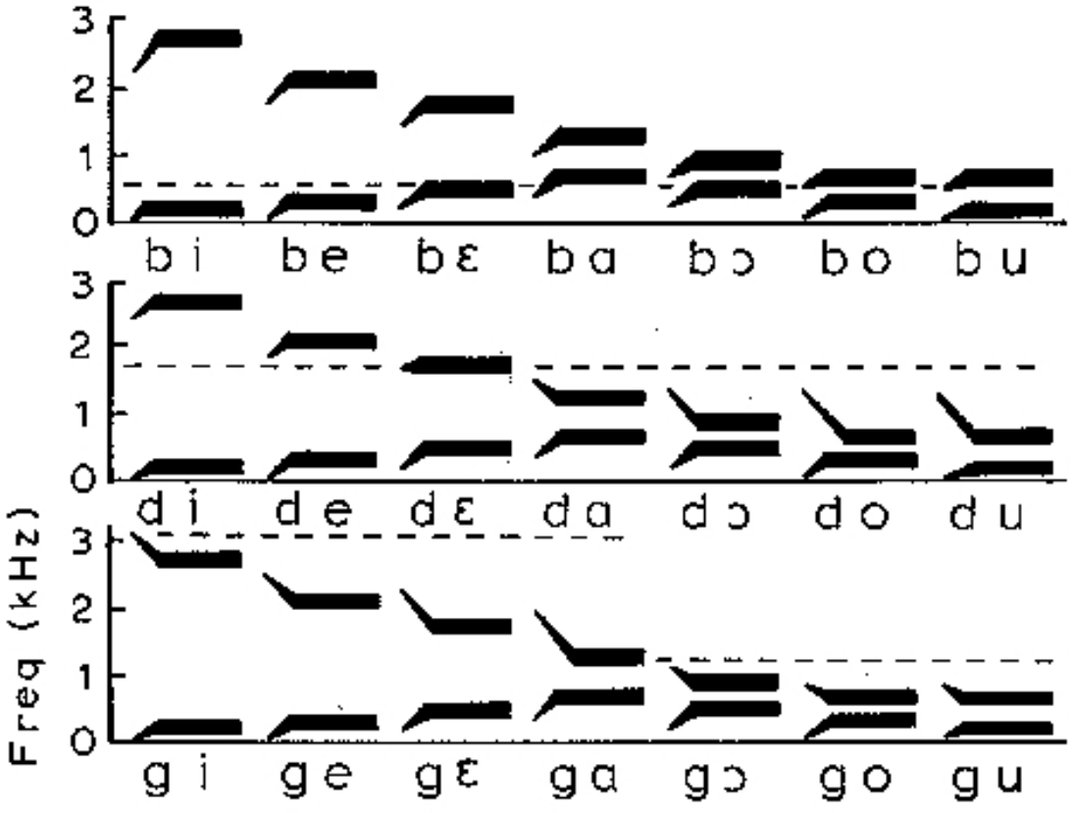
III.5 Spectrogramme d'occlusives

- Obstruction suivie d'un relachement brutal
- Identification :
  - Présence d'une phase de silence (VOT)
  - Relachement brutal sonore très bref
  - Transition des formants de la voyelle



"bab" *"dad"* *"gag"*

- La consonne, correspondant à un silence, n'est pas identifiable telle quelle.
- C'est la voyelle qui nous renseigne sur la consonne.
- Selon la "trajectoire" des formants lors de la transition, on identifie le point d'articulation de l'occlusion initiale.



III.6 Voix sous hélium

- La voix est modifiée lorsqu'on respire un mélange air-hélium.
- Les harmoniques ne sont pas modifiées :

$$\begin{aligned} f_1 &= 123\,\text{Hz} \\ f_2 &= 246\,\text{Hz} \\ f_3 &= 369\,\text{Hz} \\ f_4 &= 492\,\text{Hz} \end{aligned}$$

- Le fondamental dépend de la longueur et de la tension des cordes vocales.

$$f_1 = c_{\text{corde}}/(2 \times L_{\text{corde}})$$

- Les formants sont modifiés car ils dépendent entre autre de la célérité du gaz.

$$F_1 = c_{\text{gaz}}/(4 \times L_{\text{tractus}})$$

air	helium
$F_1 = 605\,\text{Hz}$	$F_1 = 964\,\text{Hz}$
$F_2 = 970\,\text{Hz}$	$F_2 = 1516\,\text{Hz}$
$F_3 = 2787\,\text{Hz}$	$F_3 = 3747\,\text{Hz}$

