

# ***II. Acoustique de la voix parlée***

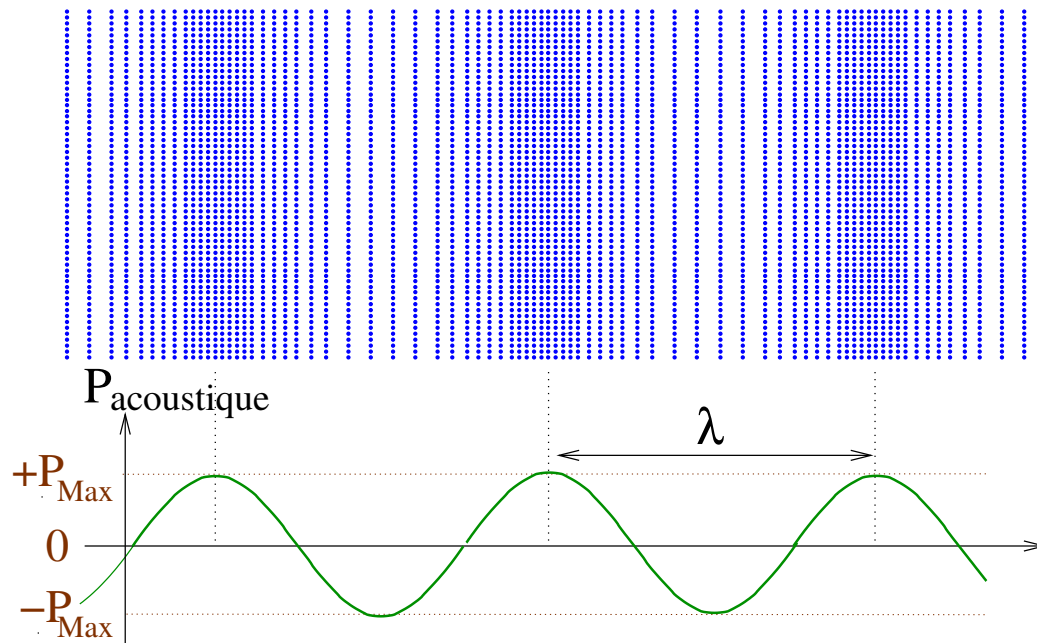
- I 1 Notion de propagation d'un son
- 2 La longueur d'onde
- 3 Notion de diffraction
- 4 Notion de réverbération

- 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

## 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

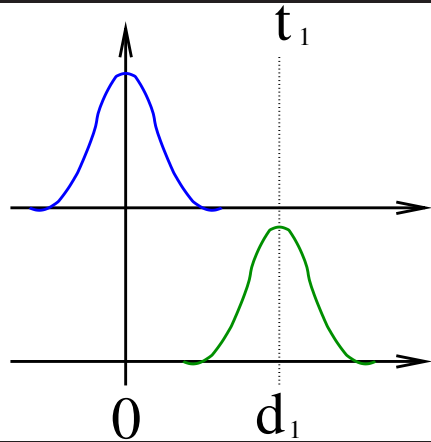


- A un instant donné, une onde acoustique correspond à des variations locales de la densité (et donc de la pression).
- Ces variations locales de la pression se déplacent de proche en proche (effet domino).
- Les molécules d'air ne font que "vibrer" au voisinage de leurs positions

- 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 ( $P_{\text{Max}}$ ).
- La période spatiale de l'onde de pression est la longueur d'onde  $\lambda$  (unité : mètre)

## I.2 Longueur d'onde et période

**Position du problème :** Comment relier la période spatiale ( $\lambda$ ) et temporelle ( $T$ )?



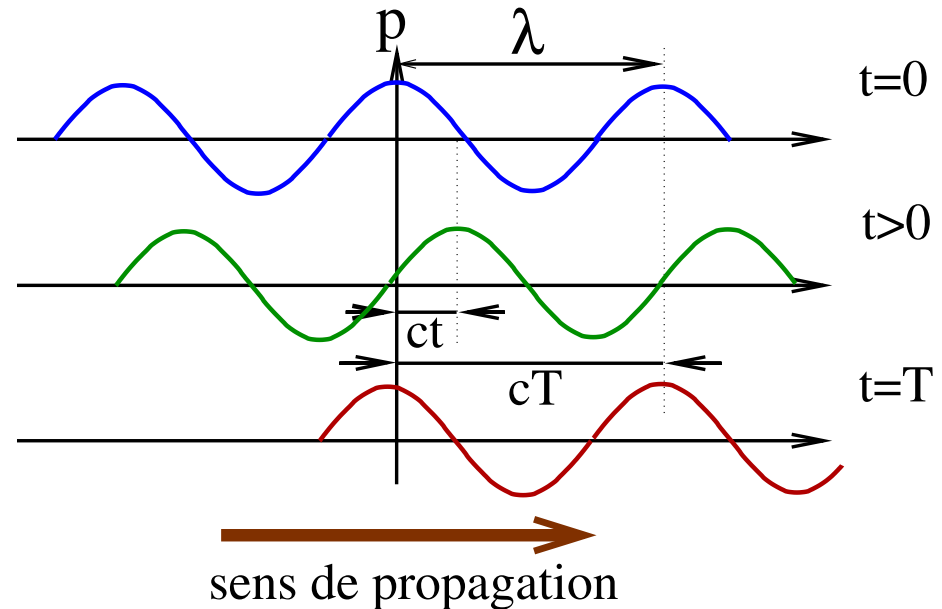
propagation d'une impulsion

- 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  $\lambda$
- 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 Hz  $\iff$  20 kHz

Période : 50  $\mu$ s  $\iff$  50 ms

Longueur d'onde : 17 mm  $\iff$  17 m

remarque : A 20 °C,  $c = 340$  m/s.

---

### Valeurs remarquables :

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

## Inaudible :

● Infrason : 
$$\left\{ \begin{array}{l} F < 20 \text{ Hz} \\ T > 50 \text{ ms} \\ \lambda > 17 \text{ m} \end{array} \right.$$

- Les infrasons sont ressentis sous forme de vibrations.
- Utilisés par les éléphants pour communiquer.

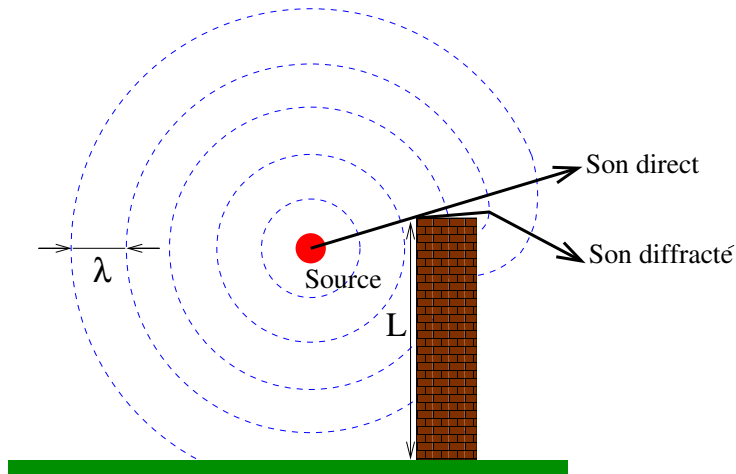
● Ultrason : 
$$\left\{ \begin{array}{l} F > 20 \text{ kHz} \\ T < 50 \mu\text{s} \\ \lambda < 17 \text{ mm} \end{array} \right.$$

- 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

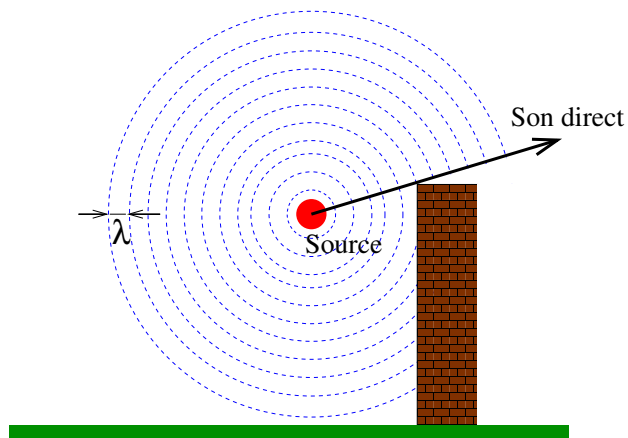
**Basse :**



$$\lambda \simeq L$$

- Les ondes sonores semblent “accrocher” (**diffraction**) sur les objets.
- La diffraction dépend de  $\lambda$  et des dimensions des objets.
- Elles sont perçues même en présence d’un objet masquant.

**Trèble :**



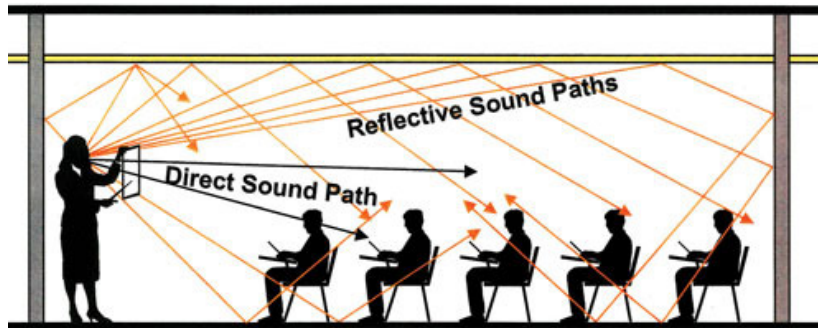
$$\lambda \ll L$$

- Les ondes sonores ne sont pas perturbées par les objets.
- Un objet masquant va arrêter l’onde et empêcher sa perception.
- On parle de son “détimbré” quand les hautes fréquences sont atténuées.

## I.4 Notion de réverbération

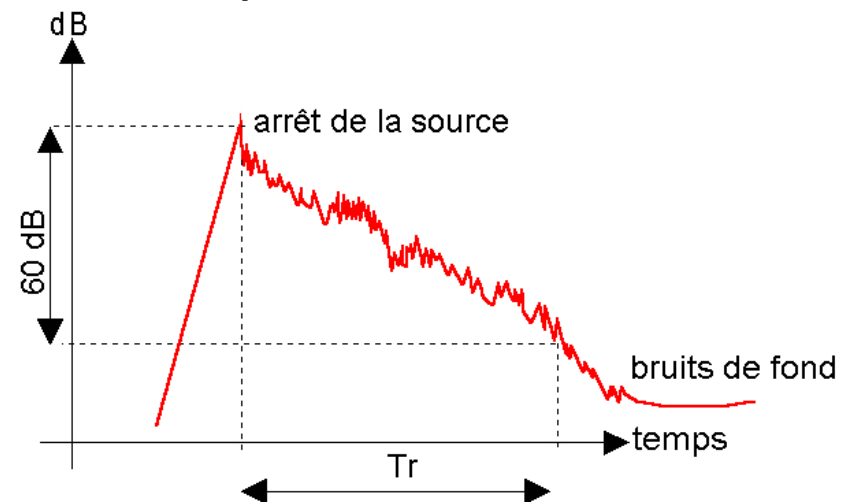
La réverbération est la persistance d'un son dans un milieu après l'interruption de la source sonore.

- Dans une salle, un son est diffusé par les parois.
- Un auditeur perçoit :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Le son direct} \\ \text{Le son réverbéré} \end{array} \right.$



- 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**  $T_r$



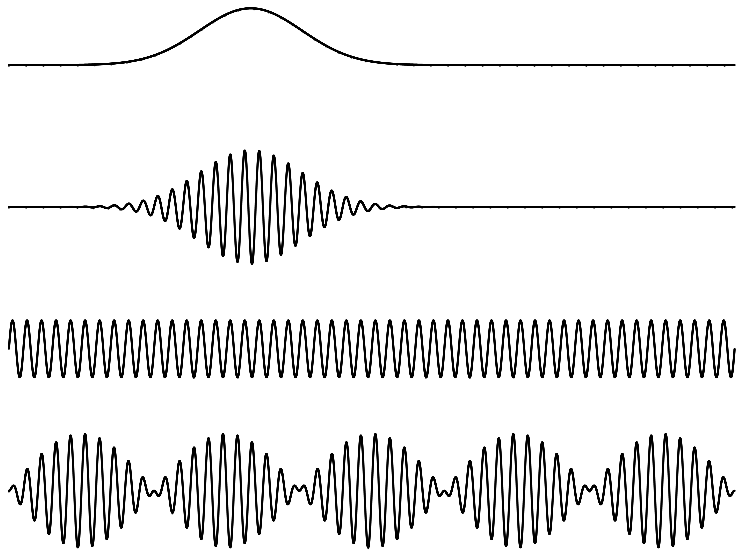
$$\text{Formule de Sabine : } T_r = \frac{0,16 \cdot V}{\alpha \cdot S}$$

$V$  : Volume de la pièce,  $S$  : Surface des parois,  $\alpha$  : 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).

## II.1 Notion de son complexe et de son pur

---



### Formes d'ondes:

- **Impulsion** : Front d'onde unique → 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.

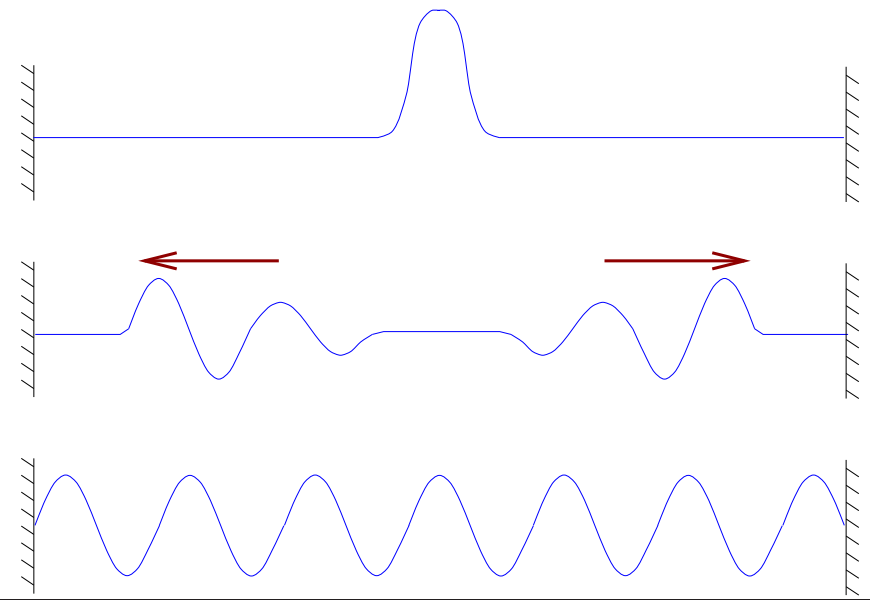
### Notion de son complexe et d'harmoniques :

---

- 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 voisé) 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

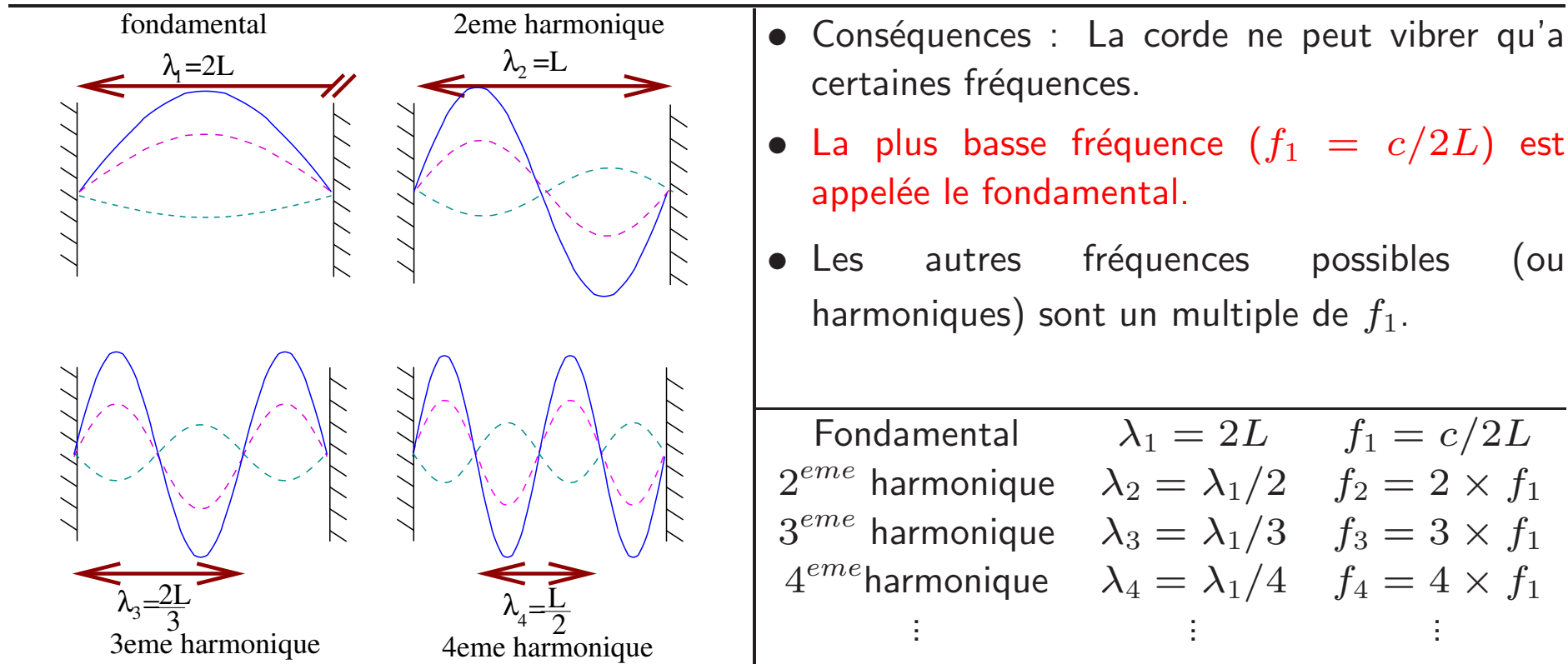
- La corde est fixée à ses deux extrémités sur des supports.
- À l'instant initial, on déforme la corde (Dans un piano, la corde est frappée par un marteau).
- Cette déformation (ou ondes) se propage à droite et à gauche.
- Ces ondes sont ensuite réfléchies par les supports.
- Après un grand nombre de 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 peut avoir qu'un nombre entier de "déformations".
- La longueur d'onde de l'onde générée sur la corde ne peut avoir que certaines valeurs liées à la longueur de la corde.

## II.3 Fréquences propres de la corde

Condition sur  $\lambda$  :  $\lambda$  doit être un sous-multiple de  $2L$  ( $L$  longueur de la corde).



- $f_1$  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)

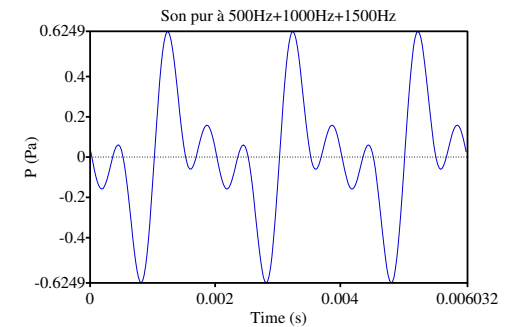
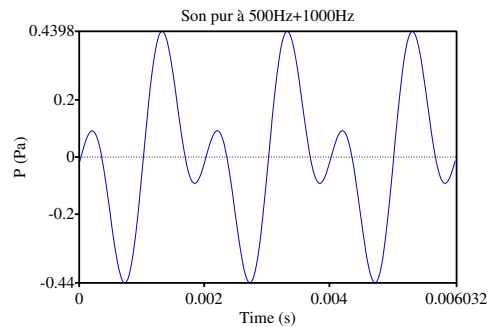
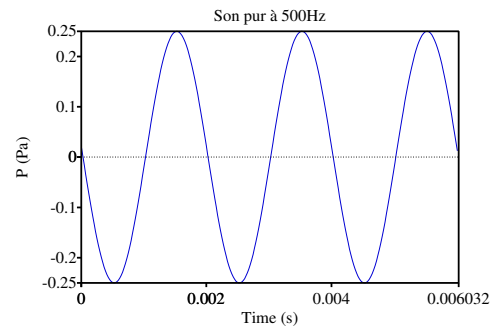
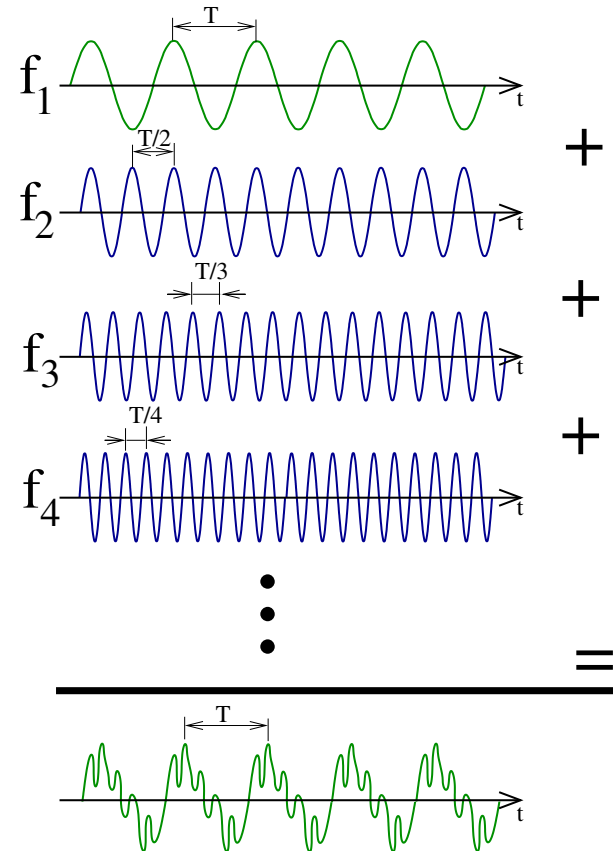
- Conséquences : La corde ne peut vibrer qu'à certaines fréquences.
- La plus basse fréquence ( $f_1 = c/2L$ ) est appelée le fondamental.
- Les autres fréquences possibles (ou harmoniques) sont un multiple de  $f_1$ .

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<sup>ère</sup> 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

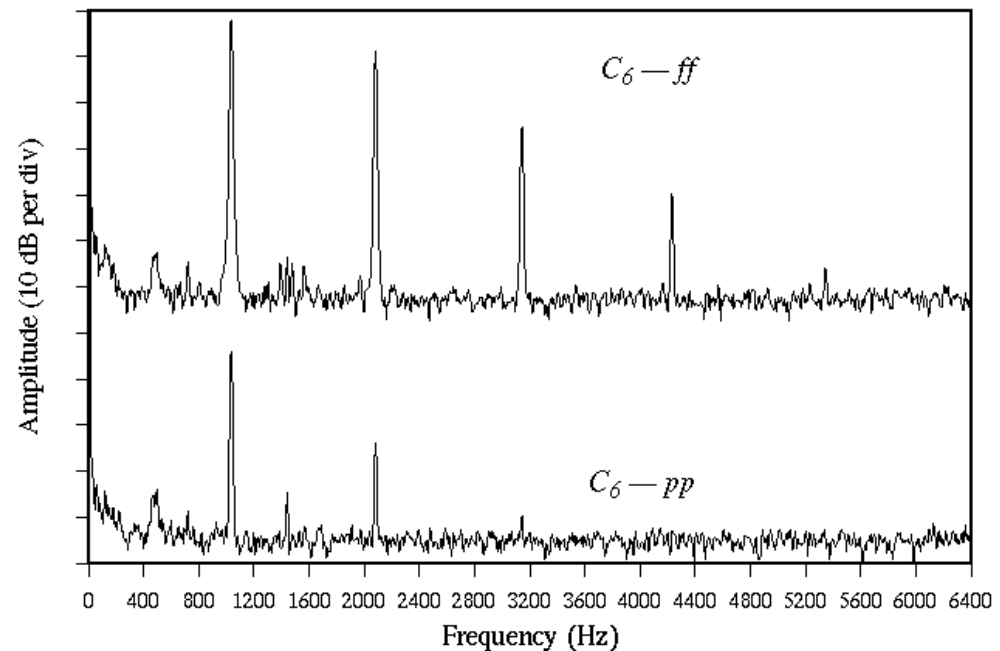
Spectre : Graphique représentant l'amplitude (en dB) des différentes harmoniques

- 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 décroître jusqu'à devenir nulle.

Timbre  $\Leftrightarrow$  Richesse en harmoniques

Hauteur  $\Leftrightarrow$  Fréquence du fondamental

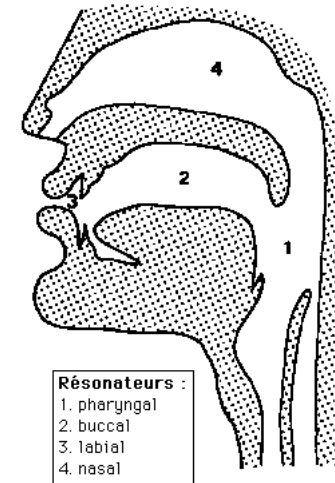
- Spectre du Do (C) de la 6<sup>ème</sup> octave (1046 Hz) d'un piano joué *fortissimo* (*ff*) et *pianissimo* (*pp*).
- Le *fortissimo* a un timbre plus riche que le *pianissimo*.
- Les pics correspondant à la 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 4<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup> harmonique sont aux fréquences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



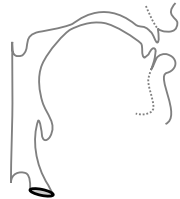
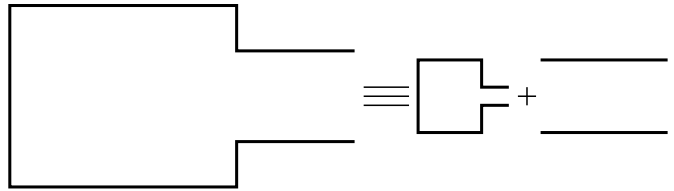

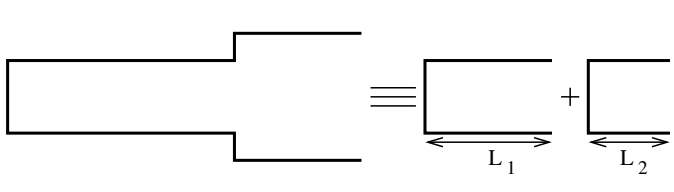
### III.1 Résonateur acoustique

**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.



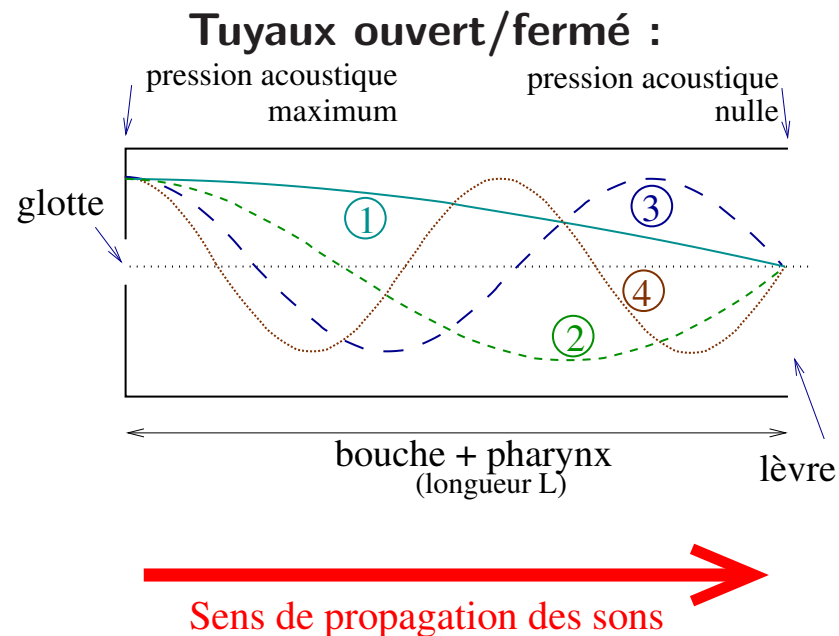
Exemples :

 <p>[ i ] antérieur rétractée</p>	 <p>Résonateur de Helmholtz + tuyau ouvert</p>	$F_1 = 400 \text{ Hz}$ <i>(Helmholtz)</i> $F_2 = 2500 \text{ Hz}$ <i>(Tube ouvert)</i>
 <p>[ a ] ouverte</p>	 <p>2 tuyaux ouvert-fermé</p>	$F_1 = 1000 \text{ Hz}$ <i>(Tube ouvert-fermé <math>L_1</math>)</i> $F_2 = 1500 \text{ Hz}$ <i>(Tube ouvert-fermé <math>L_2</math>)</i>

# Fréquence de résonance

## Principe des tuyaux sonores :

- Il se forme des ondes sonores stationnaires dans le tuyau.
- A une extrémité ouverte la pression acoustique doit tendre vers zéro.
- A une extrémité fermée la pression acoustique est maximum.
- Cela impose des contraintes sur  $\lambda$  ( $\lambda$  liée à la longueur du tuyau).



*Modèle simplifié du tractus vocal pour une voyelle ouverte.*

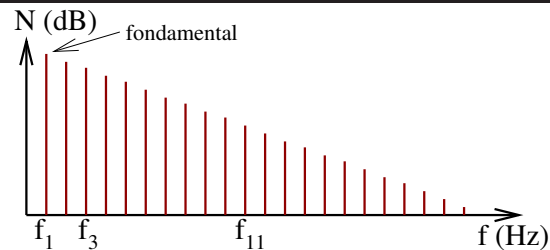
Lien entre la longueur  $L$  du résonateur et  $\lambda$  :

cas 1 :	$\lambda_1 = 4 \times L$	$F_1 = \frac{c}{4L}$
cas 2 :	$\lambda_2 = 4 \times L/3$	$F_2 = 3 \times F_1$
cas 3 :	$\lambda_3 = 4 \times L/5$	$F_3 = 5 \times F_2$
⋮	⋮	⋮

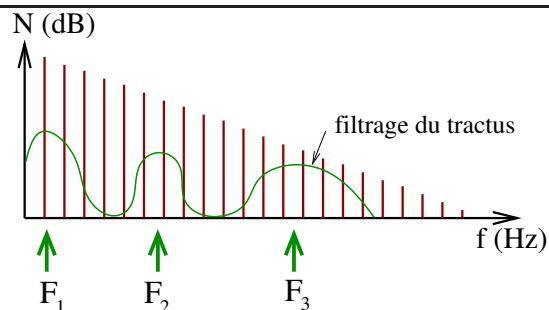
- $F_1, F_2, \dots$  sont les fréquences de résonance.
- **Ils ne définissent pas la fréquence du son.**
- Ils définissent la fréquence des harmoniques susceptibles de se propager librement et d'être émises.

## III.2 Formants et spectrogramme

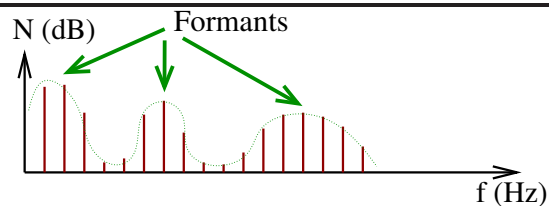
### Spectre d'un son voisé :



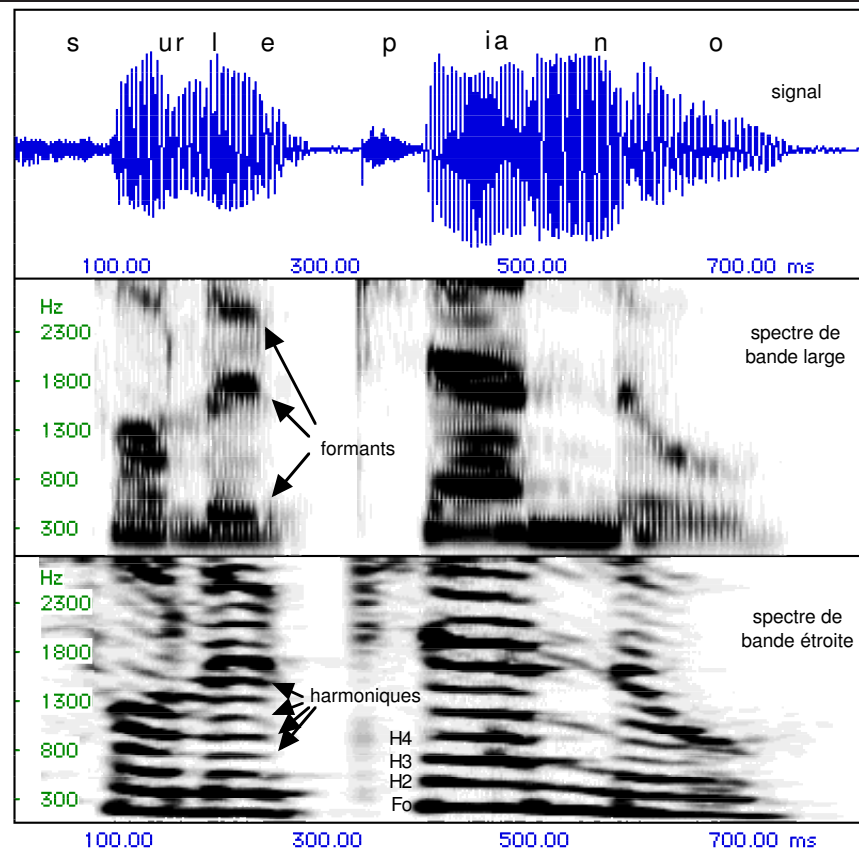
- Le son issu de la glotte fait apparaître des harmoniques.



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

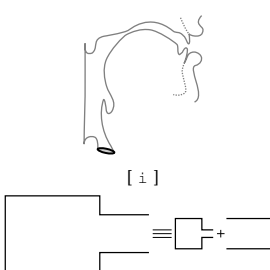
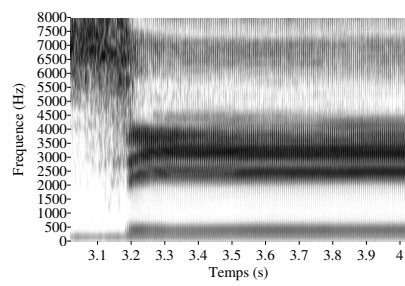
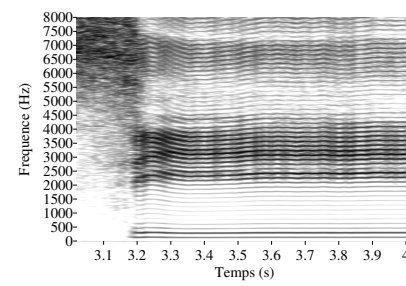
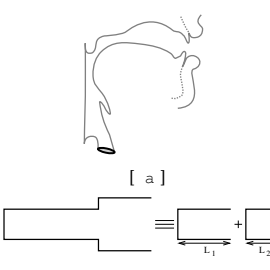
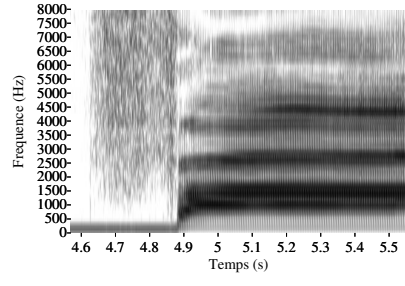
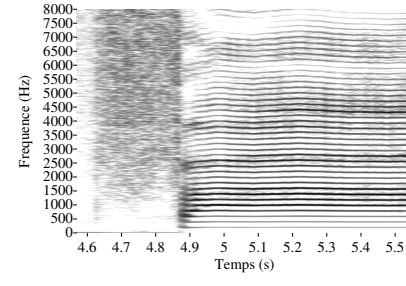


- Le son produit se décompose toujours en harmoniques mais leurs amplitudes ont été modulées selon leurs fréquences  $\Rightarrow$  **Formants**.



- 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.

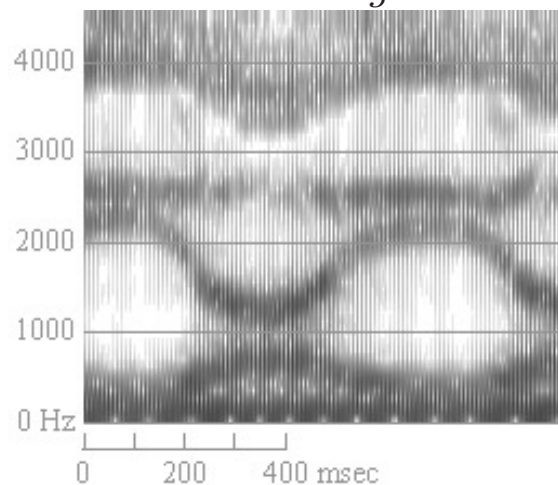
### III.3 Spectrogramme de Voyelles

 <p>[ i ]</p>	$F_1 = 400 \text{ Hz}$ $F_2 = 2500 \text{ Hz}$ $F_3 = 3000 \text{ Hz}$	 <p>[si:] "bande large"</p>	 <p>[si:] "bande étroite"</p>
 <p>[ a ]</p>	$F_1 = 1000 \text{ Hz}$ $F_2 = 1500 \text{ Hz}$ $F_3 = 2500 \text{ Hz}$	 <p>[fa:] "bande large"</p>	 <p>[fa:] "bande étroite"</p>

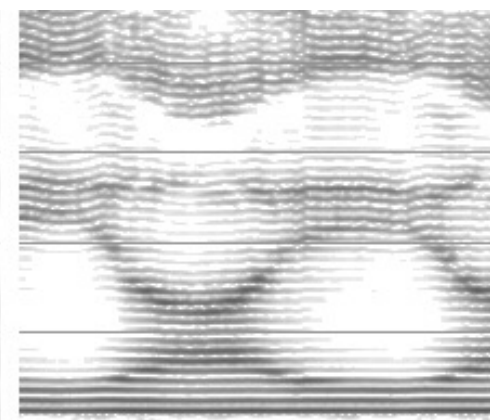
#### Diphthongue :

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

*bande large*



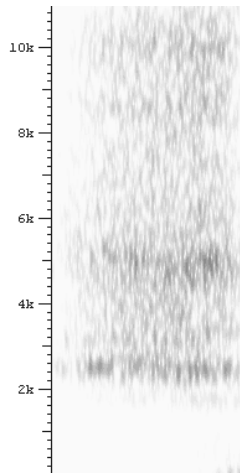
*bande étroite*



### III.4 Spectrogramme de fricatives

*f*

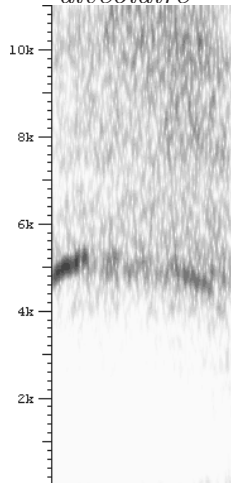
*post alvéolaire*



$2, 5 \text{ kHz} < F_{\text{rés.}} < 5 \text{ kHz}$

*s*

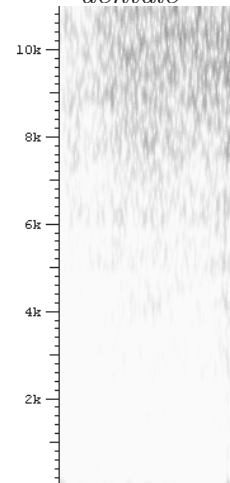
*alvéolaire*



$4 \text{ kHz} < F_{\text{rés.}} < 8 \text{ kHz}$

*θ*

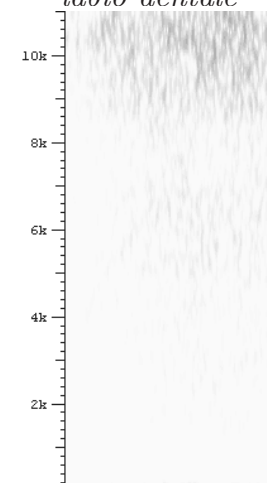
*dentale*



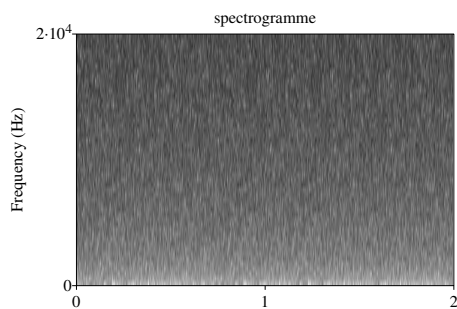
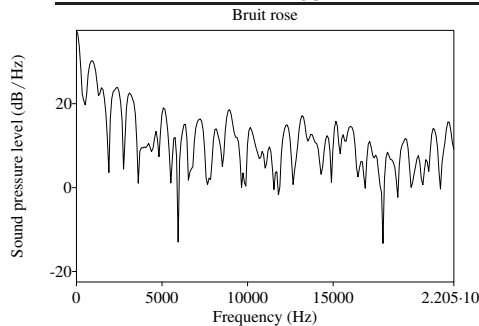
$F_{\text{rés.}} \simeq 8 \text{ kHz}$

*f*

*labio dentale*



$F_{\text{rés.}} > 10 \text{ kHz}$



- 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 rôle de filtre (**résonateur de Helmholtz**).
- La fréquence de résonance est inversement proportionnelle au volume de la cavité.

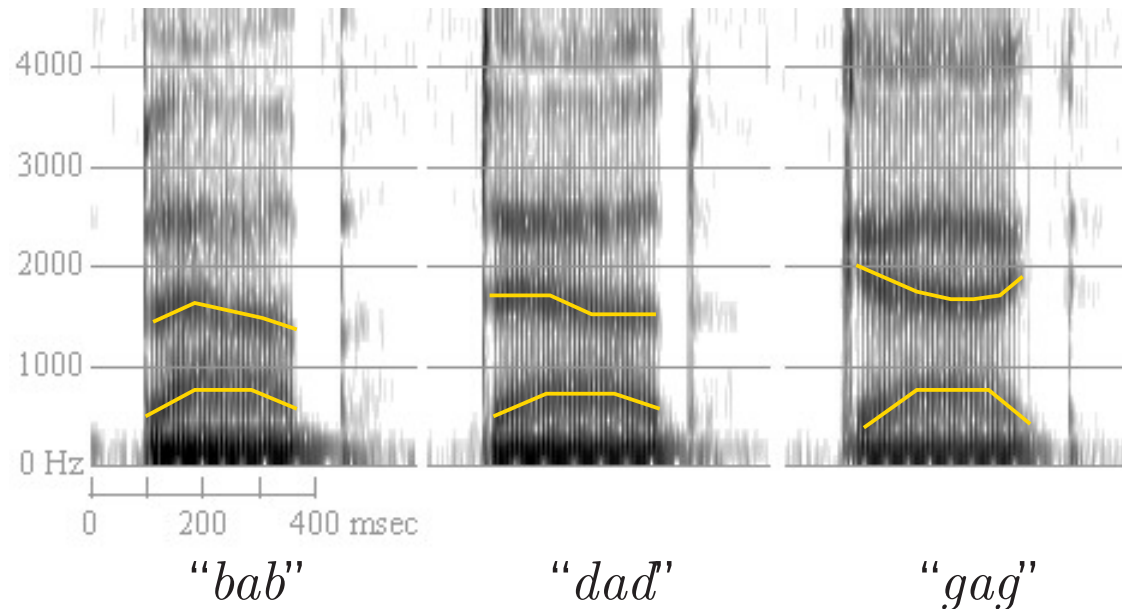


$$F_{\text{rés}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V \times L}}$$

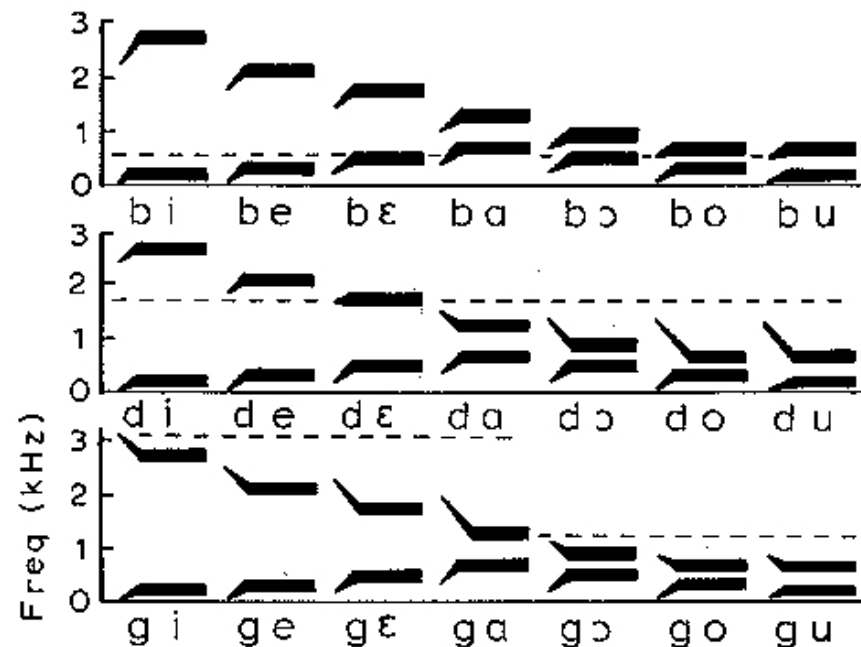
A, L : Aire et longueur du goulot, V : Volume cavité

## 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



- 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 :

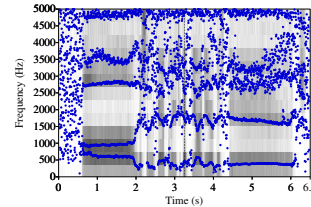
$$\begin{aligned} f_1 &= 123 \text{ Hz} \\ f_2 &= 246 \text{ Hz} \\ f_3 &= 369 \text{ Hz} \\ f_4 &= 492 \text{ Hz} \end{aligned}$$

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

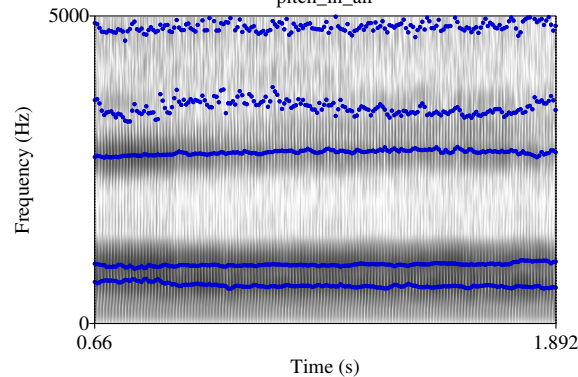
- $f_1 = c_{\text{corde}} / (2 \times L_{\text{corde}})$

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

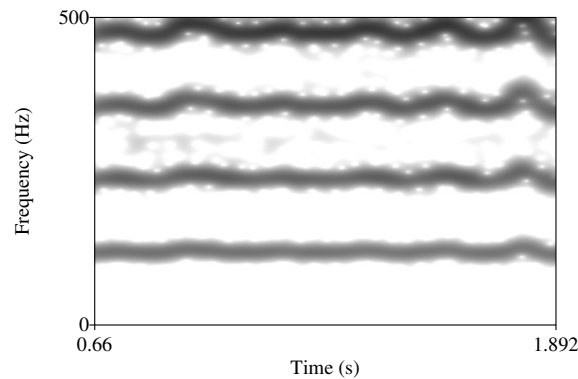
- $F_1 = c_{\text{gaz}} / (4 \times L_{\text{tractus}})$



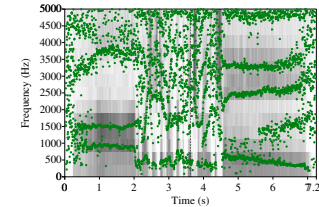
pitch\_in\_air



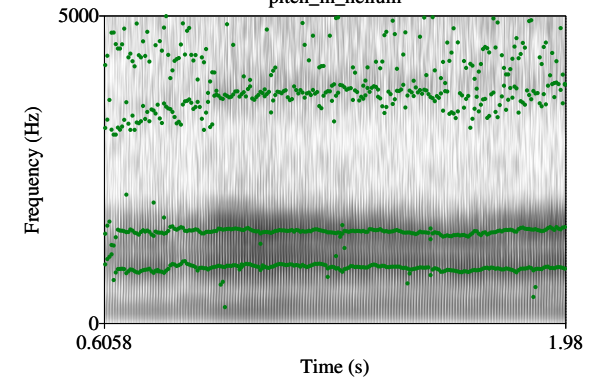
Time (s)



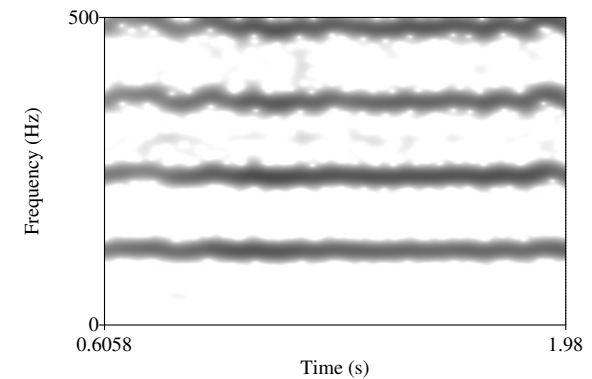
Time (s)



pitch\_in\_helium



Time (s)



Time (s)

air :

$$\begin{aligned} F_1 &= 605 \text{ Hz} \\ F_2 &= 970 \text{ Hz} \\ F_3 &= 2787 \text{ Hz} \end{aligned}$$

helium :

$$\begin{aligned} F_1 &= 964 \text{ Hz} \\ F_2 &= 1516 \text{ Hz} \\ F_3 &= 3747 \text{ Hz} \end{aligned}$$