

# Séance de Spécialité n° 5

## Acquisition d'un son & reconnaissance vocale

*Mots-clefs « reconnaissance vocale », « voix » et « microphone ».*

### 1 Activité documentaire : la reconnaissance vocale (40 minutes)

Identifier une personne par sa voix est une tâche complexe. La voix dépend de nombreux paramètres physiologiques. En outre, elle peut être imitée ou volontairement déformée. Cependant, l'expérience montre que la voix d'un proche ou d'une personne publique peut être reconnue et de plus en plus de machines utilisent la reconnaissance vocale.

#### Document 1 – Description de la voix



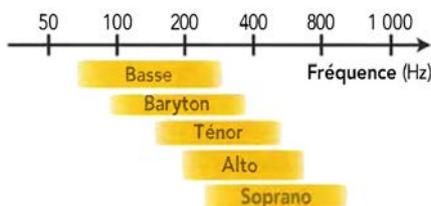
La voix peut-être caractérisée par quatre paramètres principaux :

**La hauteur** C'est la sensation auditive liée à la fréquence des vibrations des cordes vocales (son grave, son aigu). L'unité de mesure est le hertz (Hz).

**L'intensité** C'est la sensation auditive liée à l'amplitude des vibrations des cordes vocales (son fort, son faible). L'unité de mesure est le décibel (dB).

**Le timbre** C'est la sensation auditive liée aux harmoniques présents dans le son (son « sombre », son « clair »).

**La tenue** C'est la sensation auditive liée à la durée des vibrations des cordes vocales (son long, son court).



Le **registre** d'une voix est l'étendue de son échelle vocale, de la note la plus grave à la note la plus aiguë.

#### Document 2 – Les phonèmes

L'une des étapes de la reconnaissance vocale est le repérage des *phonèmes*. La voix peut être décomposée en une suite de sons distinctifs appelés phonèmes. Par exemple, les mots « lait » et « loup » diffèrent par un phonème respectivement repéré, en alphabet phonique, par [ɛ] et [u].

Les dix-sept consonnes		Les douze voyelles orales	
API	Mots écrits	API	Mots écrits
b	bal, robe	a	patte, papa
s	souris, pièce	ɑ	pâte, tas
k	carpe, kiwi, qui	ɛ	fenêtre
d	date	ø	jeu, feu
f	face, phare	œ	fleur
g	gare, bague	e	été, nez
ʒ	journal, gorge	ɛ̃	mer, j'aimais
l	la, alors	o	sot, seau, sceau, saut
m	maman	ɔ	porte, port, or, mort
n	non	i	filles, ami
ɲ	gnôle, agneau	u	coup, août
p	petit	y	nu, j'ai eu
r	rare		
t	tordu		
v	voir, wagon		
z	zèbre, oser		
ʃ	chat, short		

La transcription phonétique en API (Alphabet Phonétique International) consiste ainsi à découper la parole en segments sonores supposés *atomiques*, et à employer un symbole unique pour chacun de ceux-ci, en évitant les multigrammes (combinaisons de lettres, comme le son ch du français). Le nombre de caractères principaux de l'API est de 118, ce qui permet de couvrir les sons les plus fréquents. Ces caractères sont pour la plupart des lettres grecques ou latines ou des modifications de celles-ci. Les sons moins fréquents sont transcrits à partir des précédents en indiquant une modification du mode ou du point d'articulation par le biais d'un ou plusieurs signes

diacritiques (au nombre de 76) sur le caractère principal. On obtient ainsi une transcription indépendante de la langue.

#### Les quatre voyelles nasales

API	Mots écrits
ɑ̃	rang, avant
ɛ̃	rein, brin, pain
ɔ̃	bon, ton
œ̃	brun, un

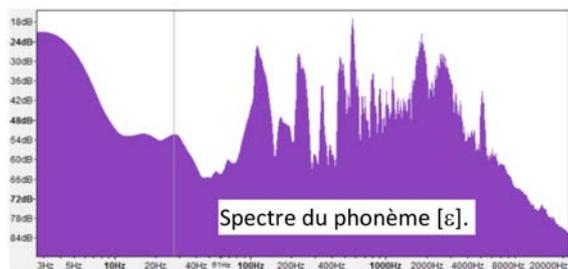
#### Les trois semi-consonnes (ou semi-voyelles)

API	Mots écrits
j	yeux ail
w	fouet (/fwɛ/), voir (/vwɑ/)
ɥ	fuite (/fɥit/), lui (/lɥi/)

Les tableaux ci-joints reproduisent un sous-ensemble de l'API relatif à 36 phonèmes du français accompagné d'exemples de mots écrits. Dans sa version la plus courante le français ne compte que 32 phonèmes, car de nombreux locuteurs francophones ne font pas les distinctions entre la deuxième et la quatrième voyelles nasales, les deux premières voyelles orales, la troisième et quatrième voyelles orales, et entre la onzième consonne et le nj (un n « mouillé »).

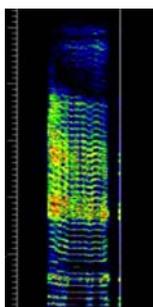
### Document 3 – Spectre d'un phonème

Le spectre d'un son correspondant à un phonème fait apparaître plusieurs pics, appelés formants. Ils sont dus à des phénomènes de résonance à l'intérieur du conduit vocal ; leur fréquence dépend de la position des divers organes mis en jeu dans la voix (langues, lèvres, etc.). Les formants sont caractéristiques du phonème prononcé. Les analyses spectrales montrent que quatre à cinq formants importants sont présents dans tous les spectres de voix.



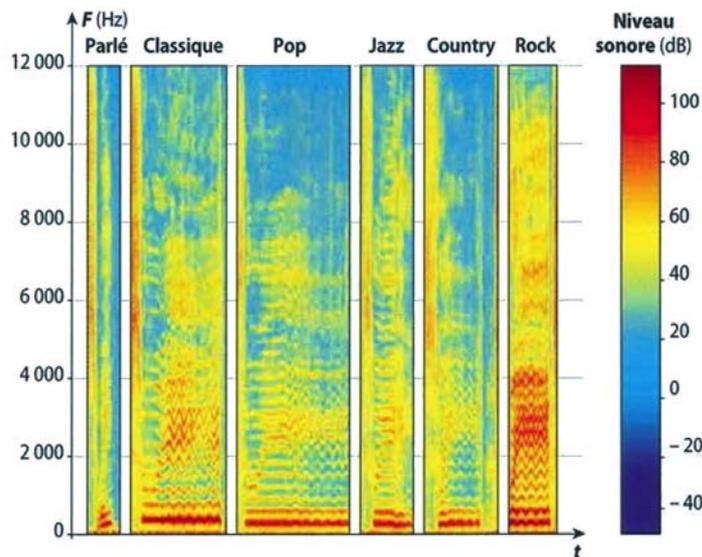
### Document 4 – Spectrogramme

Un spectrogramme est la représentation visuelle d'un son, comme par exemple le phonème [ɛ] ci-contre. Il représente la fréquence en fonction du temps et l'intensité sonore associée à chaque fréquence est représentée par un code couleur. Sur un spectrogramme, les formants sont repérés par des zones nettement colorées.



Le nombre d'organes qui interviennent dans la voix varie selon le type de signal émis : parole, cri ou chant. Les organes les plus mobilisés sont le larynx et ses deux

cordes vocales, la gorge, le nez, la langue, la bouche et les lèvres. Le spectre des fréquences de la parole dépasse rarement quatre octaves et s'étend entre 300 Hz et 8 kHz. Certains types de chants atteignent des fréquences de 10 000 Hz. Voici un spectrogramme présentant l'analyse du mot « sweet » parlé et chanté dans différents styles.



Voici maintenant un spectrogramme enregistré pour un locuteur prononçant : « les enfants ». L'intensité acoustique est indiquée par des zones plus ou moins noircies (et pas par les couleurs de l'arc-en-ciel comme précédemment). Les voyelles correspondent à des intensités acoustiques plus fortes que les consonnes en basses fréquences. Ce spectrogramme illustre le principe de la reconnaissance vocale, qui repose sur la comparaison des rythmes, des amplitudes et des fréquences entre un enregistrement et les mots d'un locuteur. La reconnaissance vocale a deux objectifs :

- la reconnaissance de mots-clés prononcés par une personne dans un menu proposé par un répondeur téléphonique ;
- la reconnaissance d'une personne et la réception d'un ordre en vue de commander une machine.

### Document 5 – Le logiciel Vocalab

Se munir d'écouteurs, les brancher sur la prise jack 3,5 mm verte du PC, et visualiser la vidéo YouTube de démonstration du logiciel Vocalab. Si vous disposez d'un smartphone, flashez le QR-Code ci-contre.



<https://www.youtube.com/watch?v=czF8WISSifo>

- a. Analyse des spectrogrammes : sur quelles gammes de fréquences s'étendent les sons enregistrés ? Sur combien d'octaves ?

b. Le téléphone limite les signaux transmis entre les fréquences 300 Hz et 3,4 kHz. Pourquoi ?

c. Sur le spectrogramme « sweet », quelles sont les propriétés communes aux différents styles de chant ?

d. Sur le spectrogramme « les enfants », où se situe le son sifflant « z » ? Quelle est la caractéristique des sons sifflants « s », « z » et « f » ? Différencier les autres consonnes des sons sifflants.

## 2 Activité expérimentale : acquisition & traitement d'un son (1 heure)

### 2.1 Transitoires d'attaque et d'extinction

- Connecter électriquement la console d'acquisition au secteur, s'assurer qu'elle est connectée au PC allumé par un port USB 2.
- En utilisant l'adaptateur jack vers « banane », connecter le micro sur une entrée de votre choix (par exemple EA1 et M pour les deux bornes). Allumer le micro (interrupteur basculé en direction du point rouge).
- Ouvrir Latis Pro, cliquer sur le bouton EA1 (si c'est l'entrée qui a été choisie précédemment) dans la liste d'entrées analogiques pour activer cette borne.
- Dans Acquisition, onglet Temporelle, laisser Points égal à 1000 pour le nombre de points de mesure, et entrer 5 secondes sous Total, pour la durée totale de l'acquisition.
- Cocher temporairement Mode permanent pour faire quelques essais, en lançant l'acquisition avec F10 (ou avec l'icône rouge des menus), et en arrêtant avec Echap. Si rien de visible n'est enregistré, penser à changer l'échelle verticale (clic-glissé avec la souris sur l'axe vertical, ou plus simplement clic-droit > calibrage). Décocher le mode permanent une fois que vous êtes certain du bon fonctionnement de votre micro.
- Lancer l'acquisition et jouer une note de une ou deux secondes avec la flûte à bec.
- Sur la courbe obtenue, repérer les transitoires d'attaque et d'extinction, ainsi que la zone dans laquelle le son se maintient sans changement apparent ni dans sa forme ni dans son amplitude.

### 2.2 Hauteur & spectre d'un son

- Changer maintenant la durée d'enregistrement (par exemple, 0,1 seconde sous Total) et enregistrer une note maintenue, au diapason ou à la flûte à bec. Pour cela, procéder à l'inverse de précédemment : jouer une note bien forte, bien maintenue, et enregistrer une petite fraction de cette note.
- Zoomer suffisamment sur la courbe obtenue afin de vérifier l'absence des transitoires d'attaque et d'extinction. Vérifier aussi que le signal enregistré est périodique et d'amplitude constante.
- Mesurer la période du signal sur un grand nombre de périodes (pour accroître la précision de la mesure). Calculer la fréquence correspondante.

- Dans le menu Traitements > Calculs spécifiques > Analyse de Fourier, effectuer la transformée de Fourier du signal enregistré, en glissant-déposant la courbe EA1 (si cela n'est pas déjà fait, cliquer sur la Liste des courbes en haut à gauche pour avoir accès à la courbe EA1 à glisser-déposer).
- Trouver la fréquence du fondamental et des harmoniques.
- Modifier la hauteur du son de l'instrument pour jouer une note plus aiguë, puis une note une octave supérieure, et recommencer les mesures.

e. Quelle est la grandeur modifiée lorsque le son est plus aigu ou plus grave ?

f. À quel rapport de fréquences correspond une octave ?

g. Comment est appelé le graphique obtenu par transformée de Fourier ? Quelles sont les grandeurs en abscisse et en ordonnée ?

h. Quelles sont les différences entre les différents instruments ? Notre oreille peut-elle « sentir » ces différences entre instruments ?

### 2.3 Utilisation de sons pré-enregistrés

- On dispose de fichiers sons dans un dossier « Fichiers sons » de la clef USB. Lire ces sons avec Audacity, en écoutant au casque.
- Utiliser l'adaptateur jack vers banane pour envoyer ces sons depuis la sortie son de l'ordinateur vers la console Sysam SP5, entrée EA0 et Masse.
- Procéder à deux enregistrements différents :
  - un enregistrement pour faire apparaître les transitoires d'attaque et d'extinction du son ;
  - un enregistrement pour faire apparaître la forme du signal.
- Mesurer la période du signal sur un grand nombre de périodes (pour accroître la précision de la mesure). Calculer la fréquence correspondante.
- Dans le menu Traitements > Calculs spécifiques > Transformée de Fourier, effectuer la transformée de Fourier du signal enregistré, en glissant-déposant la courbe EA1 (si cela n'est pas déjà fait, cliquer sur la

Liste des courbes pour avoir accès à la courbe EA1 à glisser-déposer).

- Trouver la fréquence du fondamental et des harmoniques.

## 2.4 Enregistrement avec Audacity

- Brancher le micro sur la borne à l'avant de l'unité centrale (prise jack micro) ou utiliser le micro-casque.
- Enregistrer le phonème [ε], suffisamment fort, pendant 2 à 3 secondes environ, et réaliser son spectre.

i . Sur le spectre du phonème [ε], repérer les fréquences des cinq premiers formants. Que remarque-t-on ?

j . À quel paramètre du son du phonème correspond la fréquence du premier formant ?

k . Comparer les spectrogrammes des phonèmes [ε] prononcés par une voix féminine et une voix masculine. Quelles sont les différences ?

## 3 Correction des exercices de la séance n° 4

### QUESTIONS

**Q1** Un instrument acoustique est formé de deux parties : un système vibrant et une caisse de résonance.

Mode propre : mode de vibration libre d'un système, correspondant à une fréquence de résonance  $f_n$  bien précise, en général multiple d'une fréquence fondamentale  $f_1$ , telle que  $f_n = n f_1$ .

Fréquence propre : fréquence de résonance caractéristique d'un mode propre.

Quantification : puisque les fréquences obéissent à  $f_n = n f_1$ , on dit qu'elles sont quantifiées, avec  $n \in \mathbb{N}$ .

Fondamental : fréquence propre  $f_1$  qui cumule deux propriétés : d'une part, c'est la fréquence propre la plus basse ; d'autre part, toutes les autres fréquences propres, les harmoniques, sont multiples entiers de  $f_1$ . L'oreille est sensible à la hauteur, liée à  $f_1$ .

Harmoniques : fréquences propres multiples du fondamental.

Ventre : zone de vibration maximale.

Nœud : zone de vibration nulle ou minimale.

**Q2** Une flûte à bec, comme son nom l'indique, comporte un bec qui génère des turbulences dans l'air soufflé,

turbulences qui excitent et entrent en résonance avec la colonne d'air subséquente. À l'inverse, dans une trompette, il n'y a pas de bec, il faut donc adopter une forme des lèvres particulière pour générer un son.

**Q3** Anna va brancher sa guitare électrique sur un amplificateur relié à un casque. Olivia va étouffer le son de sa batterie en la bourrant d'isolant. Alphonse va visser sur sa trompette un silencieux qui va en étouffer partiellement le son.

**Q4** Dans un violon, on ne veut favoriser aucune fréquence en particulier. La caisse doit donc avoir une forme la plus éloignée possible du parallépipède rectangle typique du diapason et de sa note unique.

**Q5** Voir les séances n° 4 et n° 3, respectivement.

**Q6** La source de vibration est la bouche ou les lèvres. La partie de « l'instrument » assurant le couplage avec l'air ambiant est la colonne d'air. Pour changer la fréquence du fondamental émis, il faut remplir le tube d'eau !

**Q7** Si le fondamental d'une corde attachée aux deux extrémités est 440 Hz, on peut en théorie émettre tous les harmoniques, toutes les fréquences multiples entières, donc en particulier 880 Hz.

### EXERCICES

#### 4.1 Vibration sonore d'une colonne d'air

- Voyez les représentations ② et ③ en tuyau ouvert page 3 de la séance 4.
- $f_2 = 2f_1$  et  $f_3 = 3f_1$ .
- Comme le tube est deux fois plus court, la longueur d'onde du fondamental sera deux fois plus petite, et sa fréquence double.
- Pour un tube trois fois plus court, la fréquence est triple. Pour un tube  $n$  fois plus court, la fréquence est  $n$  fois plus grande.

#### 4.2 n° 4 p. 104 – Clairon et trompette

**Problème 1** La fréquence du son musical joué dépend de la longueur de la colonne d'air.

Dans un clairon, cette longueur n'est pas modifiable. On ne devrait pouvoir jouer qu'une seule note de fréquence  $f_1 = 131$  Hz. Cette note est en fait difficile à obtenir. En jouant sur la tension des lèvres, on peut obtenir plus facilement les deux harmoniques suivants de fréquences  $f_2 = 2f_1 = 262$  Hz et  $f_3 = 3f_1 = 393$  Hz. Avec un clairon, on peut donc jouer deux notes, un Do<sub>3</sub> de fréquence

$f_2 = 262$  Hz et un Sol<sub>3</sub> de fréquence  $f_3 \simeq 392$  Hz.

En revanche, grâce aux pistons et aux coulisses, la longueur de la colonne d'air est modifiable dans une trompette. En appuyant sur un piston de la trompette, on augmente la longueur de la colonne d'air, cette augmentation n'étant pas la même d'un piston à l'autre. Il existe donc huit longueurs de la colonne d'air présentées dans le tableau ci-dessous (on note 1 lorsque le piston est enfoncé et 0 lorsqu'il est relevé) :

Piston 1	0	1	0	0	1	1	0	1
Piston 2	0	0	1	0	1	0	1	1
Piston 3	0	0	0	1	0	1	1	1

**Problème 2** Lorsque l'on joue un Sol<sub>3</sub> avec une trompette, la longueur totale de la colonne d'air (de l'embouchure au pavillon) a pour expression :

$$L = L_{\text{sol}_3} = \frac{v}{2f_{\text{sol}_3}}$$

La deuxième coulisse doit avoir une longueur égale à  $L_{\text{coul}_2} = 0,12 \cdot L$ , soit 12 % de la longueur totale  $L$  de la trompette.

Lorsque l'on joue un Mi<sub>3</sub> :

$$L_{\text{mi}_3} = \frac{v}{2f_{\text{mi}_3}} = \frac{L \cdot f_{\text{sol}_3}}{f_{\text{mi}_3}} \simeq 1,19 \cdot L$$

$$\Rightarrow L_{\text{mi}_3} = L_{\text{coul}_3} + L$$

La troisième coulisse doit avoir une longueur égale à  $L_{\text{coul}_3} = 0,19 \cdot L$ , soit 19 % de la longueur totale  $L$  de la trompette.

Remarque : les longueurs relatives sont en accord avec la photographie de la trompette : la 3<sup>e</sup> coulisse est plus longue que la 2<sup>e</sup>. La note émise en appuyant sur le 3<sup>e</sup> piston est plus grave que celle émise en appuyant sur le 2<sup>e</sup> piston, car la colonne d'air est plus longue.

#### 4 Le barème curseur pour la notation (en vue du DS n° 1)

<b>Argumentaire satisfaisant</b>		<b>Argumentaire satisfaisant</b>		<b>Aucun argumentaire</b>
Problématique respectée ET Bonne mise en relation des arguments avec la problématique ET Argumentaire correctement rédigé		Problématique non prise en compte OU Une mise en relation maladroite OU Une rédaction maladroite		Uniquement des idées juxtaposées sans lien entre elles ni lien avec la problématique posée
Les éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) sont solides (complets et pertinents)	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) incomplets	Des éléments scientifiques solides (connaissances issues des différents champs disciplinaires) bien choisis	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) incomplets ou mal choisis	Des éléments scientifiques (connaissances issues des différents champs disciplinaires) corrects
8	6	5	3	2 ou 1

## 1 Production d'un son

### 1.1 Instruments acoustiques

Dans tous les instruments acoustiques, se trouvent réunis :

- un système vibrant : corde de violon, anche de saxophone, peau d'un tambour, etc. ;
- une caisse de résonance, qui transmet les vibrations au milieu environnant.

Dans les trois exemples d'instruments donnés ci-dessus, on distingue : un instrument à cordes, un instrument à vent et un à percussion, respectivement. On se fixe comme objectif d'étudier les deux premiers.

### 1.2 Guitare

À l'œil nu, on ne distingue pas la corde après qu'elle ait été « pincée » : elle vibre très rapidement.

Au stroboscope, on peut l'immobiliser et noter sa fréquence de vibration, qui est bien définie pour chaque corde (d'une guitare « accordée »).

Une corde pincée vibre **librement** avec une fréquence bien définie.

Les oscillations sont qualifiées de libres, car le système est perturbé puis laissé libre de vibrer.

La vibration de la corde provoque la vibration de la caisse, et de l'air qu'elle contient, à la même fréquence. La caisse de résonance assure un rôle de « couplage » avec l'air.

### 1.3 Flûte à bec

Il est nécessaire de disposer d'un « sifflet », appelé « bec » dans le cas de la flûte. Celui-ci provoque un mouvement turbulent de l'air, ce qui provoque des vibrations de l'air dans le tuyau (on remarque bien qu'il ne s'agit pas d'une vibration du tuyau, mais d'une vibration de la colonne d'air qu'il contient).

Le sifflet est un biseau pour un orgue, une anche simple pour une clarinette, une anche double pour un hautbois ; certains instruments à vent ne disposent pas de sifflet proprement dit, comme la trompette : les vibrations turbulentes de l'air sont alors générées directement par la bouche, ce qui nécessite un certain entraînement.

### 1.4 Conclusion

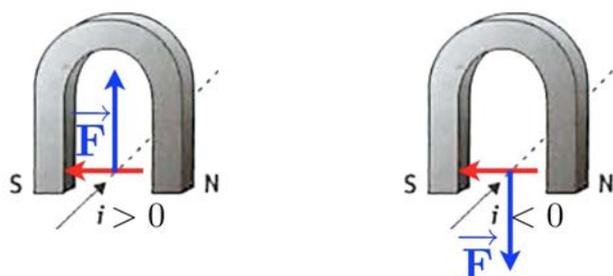
- Les instruments de musique comportent un système mécanique vibrant, l'**excitateur**, en oscillations libres ;
- Cet excitateur est couplé à un **résonateur**, l'air d'une caisse ou un tube, qu'il met en oscillations forcées ;
- Le résonateur est responsable de l'émission sonore.

Exemple : diapason avec ou sans sa caisse de résonance.

## 2 Vibration d'une corde tendue entre deux points fixes

### 2.1 Oscillations forcées

Voir le TP de Spécialité n° 13 sur les cordes vibrantes et la guitare : un fil conducteur placé dans l'entrefer d'un aimant, parcouru par un courant alternatif, est soumis à une force de Laplace alternative, perpendiculaire au plan formé par le champ magnétique et le fil :



On utilise la règle des trois doigts pour trouver le sens de la force magnétique. La force est tantôt dirigée vers le haut,

tantôt dirigée vers le bas, selon le signe du courant alternatif. Ainsi, la corde est soumise à des oscillations forcées.

Les oscillations sont qualifiées de forcées, car le système n'est pas libre, il est forcé de vibrer à une fréquence imposée.

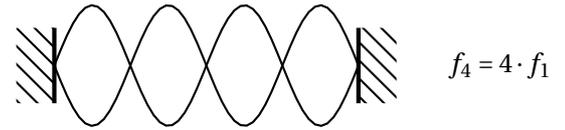
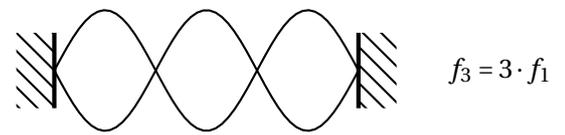
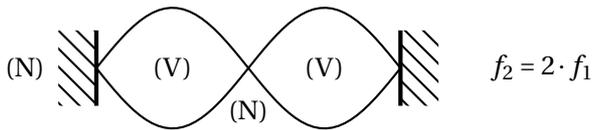
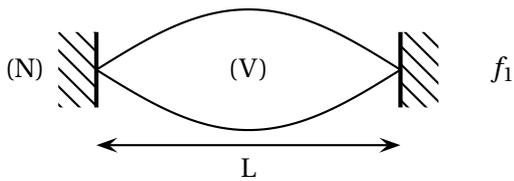
Pour certaines fréquences d'excitation  $f_n$ , multiples d'une fréquence  $f_1$  appelée fréquence du fondamental, la corde vibre avec une grande amplitude en formant un ou plusieurs fuseaux. On dit qu'il y a **résonance**.

### 2.2 Modes propres

Pour chaque harmonique,

$$f_n = n \cdot f_1$$

avec  $n \in \mathbb{N}^*$ , la corde forme  $n$  fuseaux, correspondant aux **modes propres**. Les nœuds (N) sont les points immobiles, les ventres (V) sont les points de vibration maximale.



La distance entre deux nœuds est  $\frac{L}{n}$  avec  $n$  le nombre de ventres et  $L$  la longueur de la corde.

Les oscillations libres d'une corde correspondent toujours à une superposition (une addition) du fondamental et de certaines de ses harmoniques. Retrouver l'importance de chaque terme dans la superposition s'appelle « effectuer une transformée de Fourier ».

### 3 Vibration d'une colonne d'air

#### 3.1 Modes propres de vibration

Voir le TP de Spécialité n° 14 sur les tuyaux sonores : une colonne de gaz excitée par une vibration sinusoïdale présente un phénomène de résonance pour certaines fréquences. Le son est plus intense.

Les valeurs de ces fréquences sont multiples d'une même fréquence  $f_1$ , appelée fondamentale.

Un tuyau sonore possède des modes propres de vibration : un mode fondamental, et des harmoniques.

Un mode propre est un état du système vibratoire dans lequel il y a résonance. Le mode fondamental est celui de plus faible fréquence ET dont les harmoniques sont multiples.

Le tuyau sonore est un résonateur à fréquences multiples.

#### 3.2 Application aux instruments à vent

Dans l'exemple de la flûte de pan, on dispose de tuyaux de différentes longueurs.

Dans l'exemple de la flûte à bec, on modifie la longueur effective de la colonne d'air en ouvrant des ouvertures dans le corps de la flûte.

Remarque : le tuyau sonore est un instrument qui cumule deux fonctions :

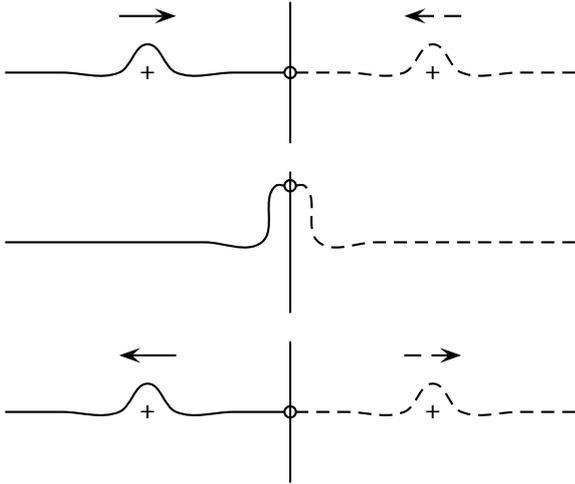
- couplage avec l'air ambiant ;
- sélection des fréquences émises (contrairement à la caisse d'une guitare ou d'un piano, qui ne doit sélectionner aucune fréquence particulière).

## 4 Ondes stationnaires

### 4.1 Réflexion sur un obstacle libre

Lorsqu'une onde progressive sur une corde rencontre un obstacle libre (un anneau libre de se déplacer verticalement sur une tige), elle se réfléchit sous forme d'une onde identique, de même polarité, se propageant dans le sens opposé.

On interprète cette réflexion comme la superposition avec une onde imaginaire (en pointillés), de même polarité, mais se propageant dans le sens opposé, et interférant avec l'onde incidente lors de la réflexion sur l'obstacle :

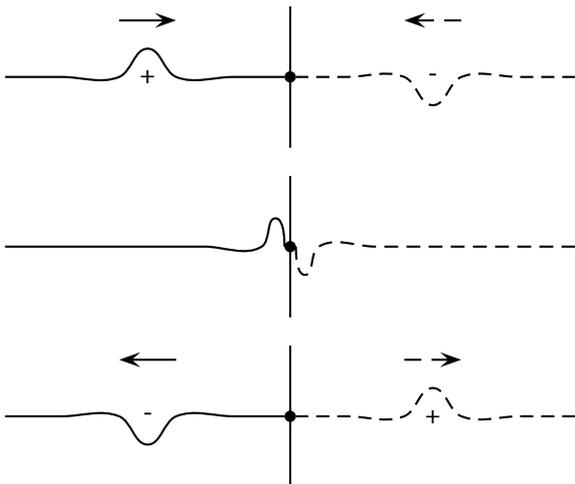


D'une certaine manière, l'onde imaginaire « sort » de l'obstacle.

### 4.2 Réflexion sur un obstacle fixe

Lorsqu'une onde progressive sur une corde rencontre un obstacle fixe (un point d'attache), elle se réfléchit sous forme d'une onde identique, se propageant dans le sens opposé, mais avec une polarité opposée.

On interprète cette réflexion comme la superposition avec une onde imaginaire (en pointillés), de polarité opposée, mais se propageant dans le sens opposé, et interférant avec l'onde incidente lors de la réflexion sur l'obstacle :

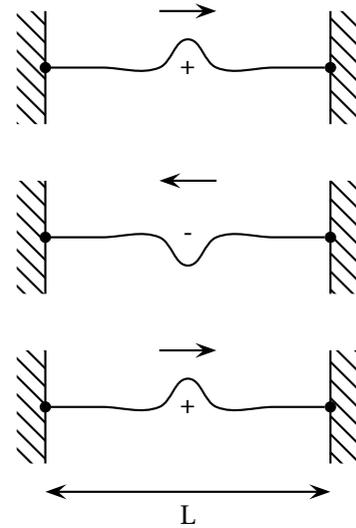


D'une certaine manière, l'onde imaginaire « sort » de l'obstacle.

### 4.3 Réflexion sur deux obstacles fixes

Dans la suite, on ne considère que des obstacles fixes, mais la discussion est similaire avec des obstacles libres (au changement de polarité près).

Une onde progressive créée entre deux obstacles fixes va faire du « ping-pong » entre ces deux obstacles (on ne considère pas l'inévitable amortissement de l'onde due aux frottements) :



Si  $L$  est la longueur de la corde, l'onde doit parcourir la distance  $2L$  pour se retrouver à la même position, avec la même polarité.

Ainsi, la longueur  $L$  de la corde fixée à ses deux extrémités impose un caractère périodique de période  $T_1 = \frac{2L}{v}$  aux allers et retours d'une onde progressive de forme quelconque, de vitesse  $v$ .

### 4.4 Onde sinusoïdale

Si l'onde créée sur la corde est une onde sinusoïdale, de période  $T$ , on va obtenir la même élongation au même point si le retard  $T_1$  est multiple entier de la période  $T$  des ondes. Regroupons cette condition et la précédente :

$$\begin{aligned} T_1 &= n \cdot T \quad \text{et} \quad T_1 = \frac{2L}{v} \\ \Rightarrow \frac{2L}{v} &= n \cdot T \\ \Rightarrow L &= \frac{n \cdot v \cdot T}{2} \end{aligned}$$

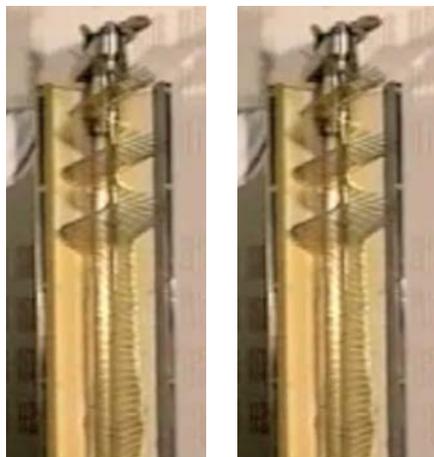
On reconnaît la longueur d'onde  $\lambda = v \cdot T$  :

$$\Rightarrow \boxed{L = n \frac{\lambda}{2}}$$

Si cette condition est remplie, l'élongation en un point donné de la corde ne dépend plus du temps, donc la propagation disparaît *en apparence* : la corde est le siège d'**ondes stationnaires**, c'est-à-dire des vibrations qui *ne progressent pas* sur la corde.

Ondes progressives ≠ ondes stationnaires

Illustration : vidéo de l'échelle de perroquet. Au début, la propagation de l'onde progressive est visible, de haut en bas :



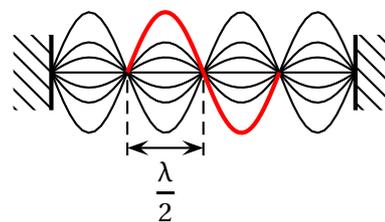
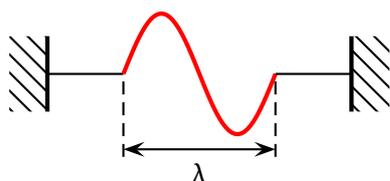
0                      +24 ms

Après réflexion, toute propagation apparente disparaît, on n'a qu'une vibration avec des ventres (points de vibration maximale) et des nœuds immobiles (déroulé image par image en fin de texte).

Ainsi ce phénomène d'apparition d'ondes stationnaires a lieu dès qu'un obstacle provoque la réflexion de l'onde progressive et donc sa superposition avec elle-même. Avec deux obstacles, on peut accumuler les réflexions, et donc les superpositions, c'est le phénomène de **résonance**, on dit que la corde vibre selon un **mode propre**.

Un mode propre de vibration est une onde stationnaire, résultant de la superposition de deux ondes progressives.

La formule  $L = n \frac{\lambda}{2}$  est facile à retenir. En effet, si l'on considère à nouveau l'onde progressive, et que l'on compare avec l'onde stationnaire, on constate qu'un fuseau (formé d'un ventre et délimité par deux nœuds) a une longueur égale à une demi-longueur d'onde  $\frac{\lambda}{2}$  :



La formule exprime donc le fait que pour avoir des ondes stationnaires, il faut faire rentrer un nombre entier  $n$  de fuseaux sur la longueur  $L$  de la corde.

#### 4.5 Fréquence des modes propres

En remplaçant  $\lambda$  par son expression en fonction de la fréquence  $f$  et en isolant  $f$  dans la formule de quantification des modes propres :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad \text{et} \quad L = n \frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad L = n \frac{v}{2f}$$

$$\Leftrightarrow f = n \frac{v}{2L}$$

Pour  $n = 1$ , fréquence  $f_1$ , le **fondamental**, un seul fuseau (formule qu'il faut savoir retrouver) :

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

Pour  $n$ , **harmoniques**,  $n$  fuseaux :

$$f_n = n \cdot f_1$$

#### 4.6 Célérité des ondes sur une corde

Sur une corde de masse linéique  $\mu$  (masse par unité de longueur, en kilogramme par mètre  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ), soumise à une tension de valeur  $T$  (force appliquée pour maintenir la corde tendue, en newton N), la célérité  $v$  des ondes transversales (ondes perpendiculaires à la corde et donc à leur direction de propagation) s'écrit :

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Unité : mètre par seconde ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Cette formule est toujours donnée.

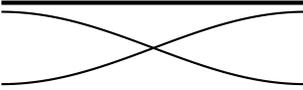
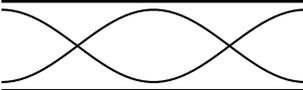
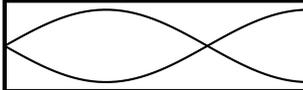
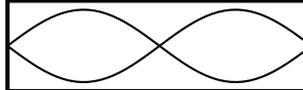
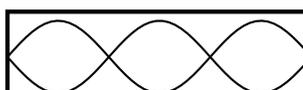
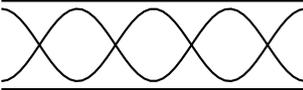
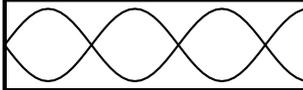
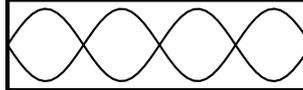


0                      +4 ms                      +8 ms                      +12 ms                      +16 ms                      +20 ms                      +24 ms

## 5 Modes de vibrations d'une colonne d'air

- On note n°1 le mode de vibration de plus basse fréquence, et n°2, 3, etc., les modes suivants ;
- Pour trouver la longueur d'onde du son émis, on compte les quarts de longueur d'onde ( $\lambda_i/4$ ) que l'on peut faire passer dans chaque tuyau de longueur L ;
- On en déduit les fréquences  $f_i$  correspondantes par la formule  $f_i = v/\lambda_i$  ;

- Pour l'application numérique, on utilise  $v = 340 \text{ m.s}^{-1}$  pour la vitesse du son, et  $L = 34,0 \text{ cm}$  pour la longueur du tuyau (joli tuyau ; uniquement pour fixer les idées) ;
- Le mode n°1 correspond au fondamental, et les modes n°2, n°3, etc., aux harmoniques 2, 3, etc., respectivement, avec respect de la relation  $f_n = n f_1$  entre la fréquence  $f_n$  de l'harmonique de rang  $n$  et la fréquence  $f_1$  du fondamental.

<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">2 extrémités ouvertes</div> Ventres aux extrémités Toutes les harmoniques	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">1 fermée + 1 ouverte</div> 1 nœud + 1 ventre aux extrémités Harmoniques impaires seules	<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">2 extrémités fermées</div> Nœuds aux extrémités Toutes les harmoniques
N°1  $2 \times \frac{\lambda_1}{4} = L \Rightarrow \lambda_1 = \frac{2L}{1}$ $\Rightarrow f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} = 500 \text{ Hz}$	N°1  $1 \times \frac{\lambda_1}{4} = L \Rightarrow \lambda_1 = \frac{4L}{1}$ $\Rightarrow f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{4L} = 250 \text{ Hz}$	N°1  $2 \times \frac{\lambda_1}{4} = L \Rightarrow \lambda_1 = \frac{2L}{1}$ $\Rightarrow f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L} = 500 \text{ Hz}$
N°2  $4 \times \frac{\lambda_2}{4} = L \Rightarrow \lambda_2 = \frac{2L}{2}$ $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2} \Rightarrow f_2 = 2f_1 = 1000 \text{ Hz}$	N°3  $3 \times \frac{\lambda_3}{4} = L \Rightarrow \lambda_3 = \frac{4L}{3}$ $\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \Rightarrow f_3 = 3f_1 = 750 \text{ Hz}$	N°2  $4 \times \frac{\lambda_2}{4} = L \Rightarrow \lambda_2 = \frac{2L}{2}$ $\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{2} \Rightarrow f_2 = 2f_1 = 1000 \text{ Hz}$
N°3  $6 \times \frac{\lambda_3}{4} = L \Rightarrow \lambda_3 = \frac{2L}{3}$ $\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \Rightarrow f_3 = 3f_1 = 1500 \text{ Hz}$	N°5  $5 \times \frac{\lambda_5}{4} = L \Rightarrow \lambda_5 = \frac{4L}{5}$ $\lambda_5 = \frac{\lambda_1}{5} \Rightarrow f_5 = 5f_1 = 1250 \text{ Hz}$	N°3  $6 \times \frac{\lambda_3}{4} = L \Rightarrow \lambda_3 = \frac{2L}{3}$ $\lambda_3 = \frac{\lambda_1}{3} \Rightarrow f_3 = 3f_1 = 1500 \text{ Hz}$
N°4  $8 \times \frac{\lambda_4}{4} = L \Rightarrow \lambda_4 = \frac{2L}{4}$ $\lambda_4 = \frac{\lambda_1}{4} \Rightarrow f_4 = 4f_1 = 2000 \text{ Hz}$	N°7  $7 \times \frac{\lambda_7}{4} = L \Rightarrow \lambda_7 = \frac{4L}{7}$ $\lambda_7 = \frac{\lambda_1}{7} \Rightarrow f_7 = 7f_1 = 1750 \text{ Hz}$	N°4  $8 \times \frac{\lambda_4}{4} = L \Rightarrow \lambda_4 = \frac{2L}{4}$ $\lambda_4 = \frac{\lambda_1}{4} \Rightarrow f_4 = 4f_1 = 2000 \text{ Hz}$