

Sur la modélisation scientifique des ondes sonores

De l'oreille interne aux ancêtres des analyseurs ou synthétiseurs de sons :
La théorie mathématique de Joseph Fourier

Eric Decreux

Centre Galois, Juin 2014

Objectifs de cette présentation

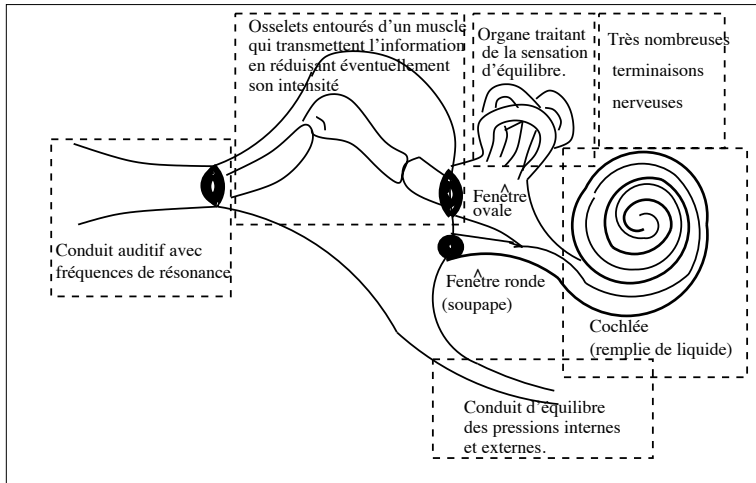
- ▶ Comprendre le fonctionnement (biologique) de l'oreille et de certaines prothèses auditives.
- ▶ Comprendre le modèle mathématisé du son sous-jacent.
- ▶ Porter un regard historique sur cette découverte
- ▶ Comparaison avec des machines construites au XIXème siècle
- ▶ Un regard sur certaines conséquences musicales.

Plan de cette présentation

1. De l'oreille interne à la théorie de Fourier.
2. Comment montrer des ondes sonores avec des machines ?
3. Quelques curiosités musicales ou sonores.

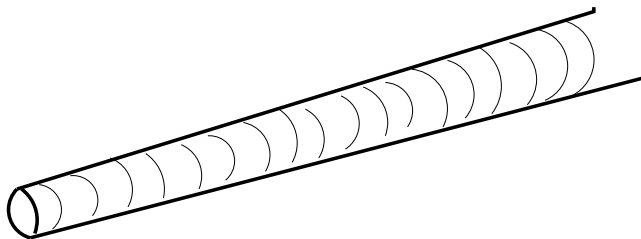
De l'oreille interne...

Schéma de l'oreille interne, connu depuis le XIXème siècle (Helmholtz).



De l'oreille interne à ...

Schéma de l'oreille interne : la cochlée



Colimaçon déroulé : on observe la présence de stries.

... à la théorie ...

Questions posées par ces observations

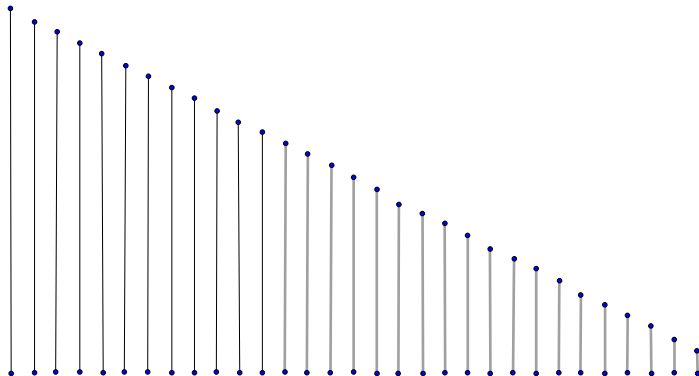
- ▶ Quel est le rôle de la cochlée ?
- ▶ Analogues connus à l'époque ? (cordes vibrant par sympathie)
- ▶ Questions sur la nature du son

Quelques pistes envisagées

- > La cochlée servirait-elle à décomposer les sons en signaux compréhensibles pour le cerveau ?
- > En quoi consisterait une telle décomposition ? cela est-il mathématisable ?

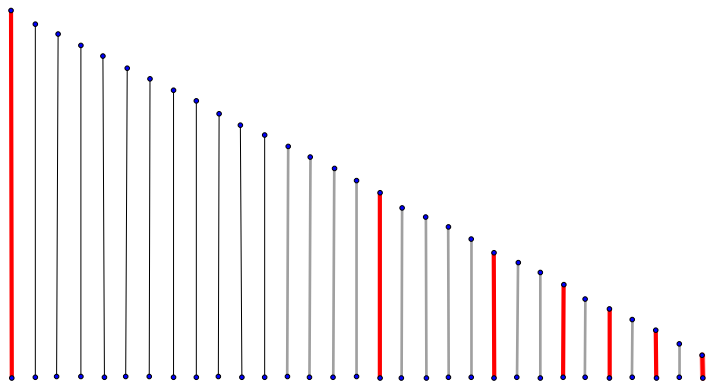
... à la théorie... : analogues connus

Cordes vibrant par influence (Guillaume Sauveur, XVIIIème siècle)



... à la théorie... : analogues connus

Cordes vibrant par influence (Guillaume Sauveur, XVIIIème siècle)



... vers la théorie... : les connaissances antérieures

Au XVII^{ème} siècle :

- ▶ On avait remarqué que les cordes produisant des sons avaient un mouvement *périodique* (i.e. qui se reproduisent identiques à eux-même un certain nombre de fois par seconde - ce nombre de fois est appelé la *fréquence*).
- ▶ On avait remarqué et "montré" que la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur de corde vibrante.
- ▶ Descartes avait énoncé un principe selon lequel "le son est au son comme la corde est à la corde".

Au XVIII^{ème} siècle :

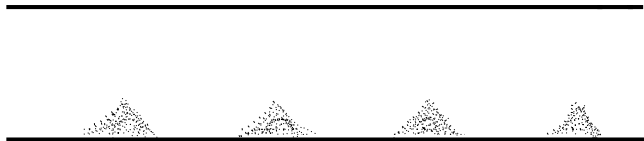
- ▶ Un son correspond à une vibration.
- ▶ Un son est composé de son simples, dont les fréquences sont des multiples entiers de sa propre fréquence.

Au XIX^{ème} siècle :

- ▶ Identifier ce qu'est un son physiquement.
- ▶ Identifier ce qu'est un son simple et un son composé mathématiquement.
- ▶ Lien entre mathématiques, physique, et l'oreille.

vers la théorie de Fourier : lien entre sons musicaux et périodicité

Tuyau soumis à une onde d'une fréquence donnée : le sable se rassemble en petits tas aux lieux où l'air n'est pas animé de mouvement.



Tubes de Kundt

(Remarque sur la relation entre périodicité dans le temps et longueur d'onde dans l'espace)

vers la théorie de Fourier : lien entre longueurs de cordes et fréquences de vibration

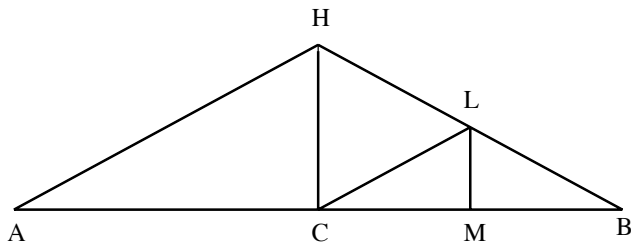
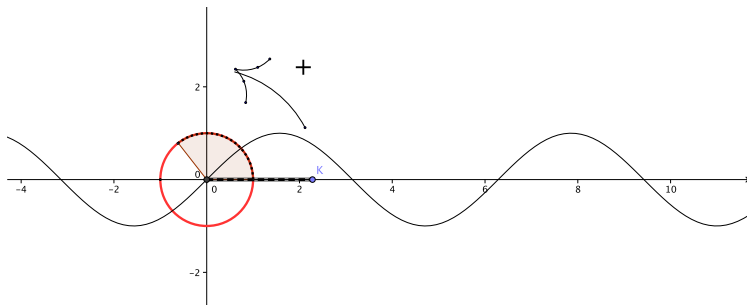


Schéma d'une corde vibrante par Isaac Beeckman.

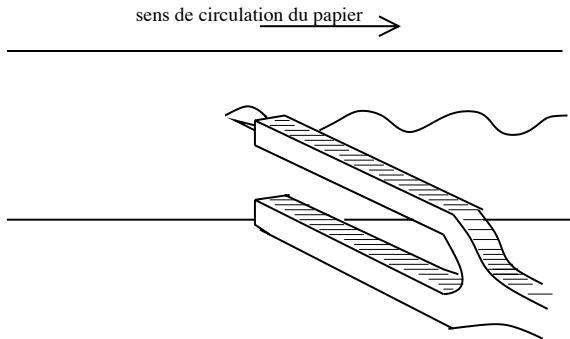
Ce dessin est à commenter, pas seulement d'un point de vue mathématique...

Comparaison avec les expériences de Marin Mersennes.

vers la théorie de Fourier : sons simples et sinusôides

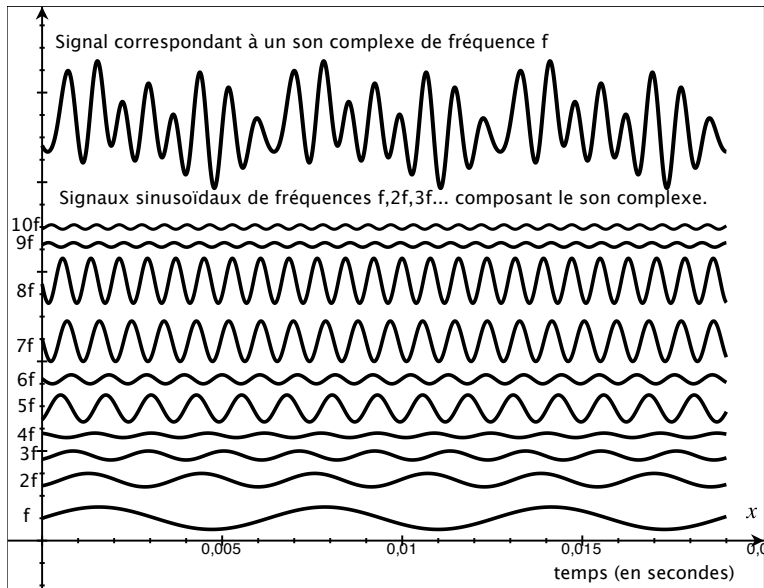


A propos de la théorie de Fourier : des sinus dans la "nature" ?

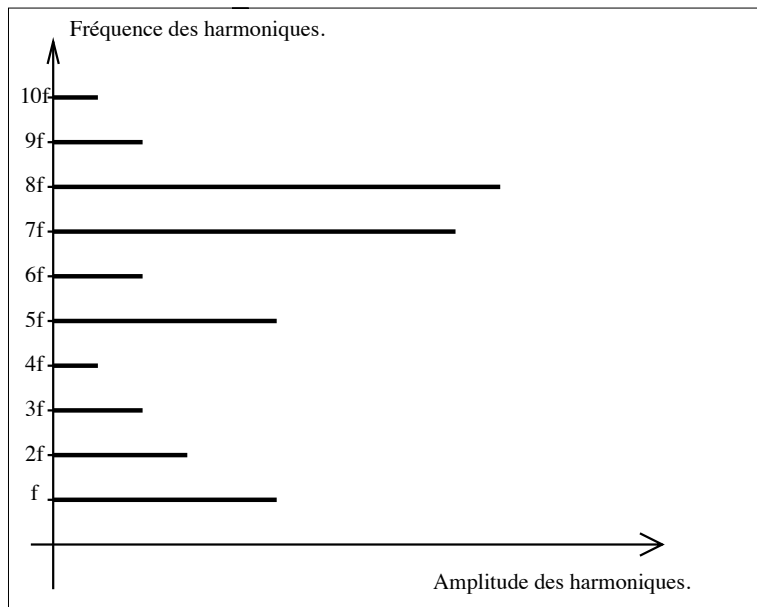


L'allure que dessinent les branches d'un diapason sur une feuille de papier circulant à vitesse constante ressemble beaucoup à une sinusoïde.

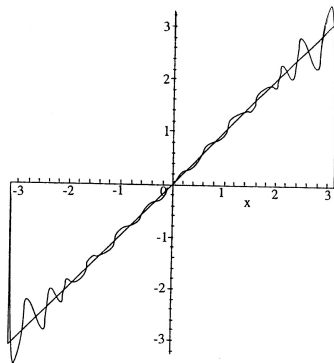
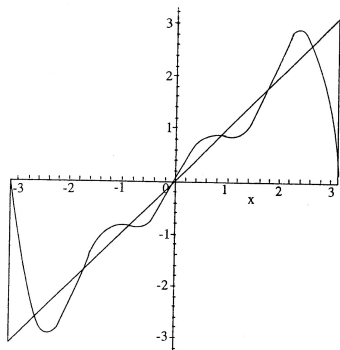
La théorie de Fourier



La théorie de Fourier : les sonagrammes



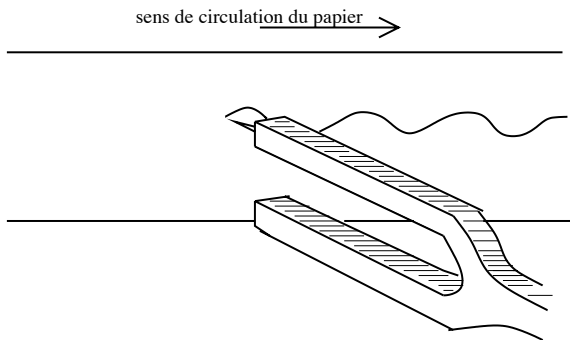
La théorie de Fourier : limites



Récapitulation : sons perçus et description scientifique

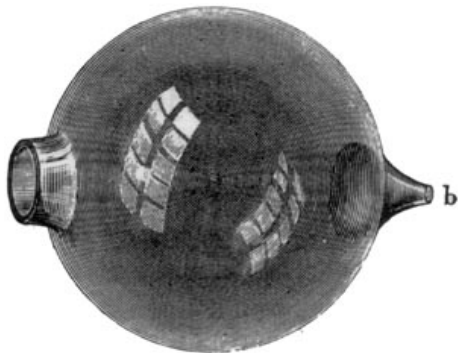
Son	Première description	Onde
grave, aigu	hauteur	fréquence (<i>longueur d'onde</i>)
fort, faible	intensité	amplitude
timbre	forme	attaque et harmoniques

Montrer des ondes sonores : dessin du son d'un diapason.



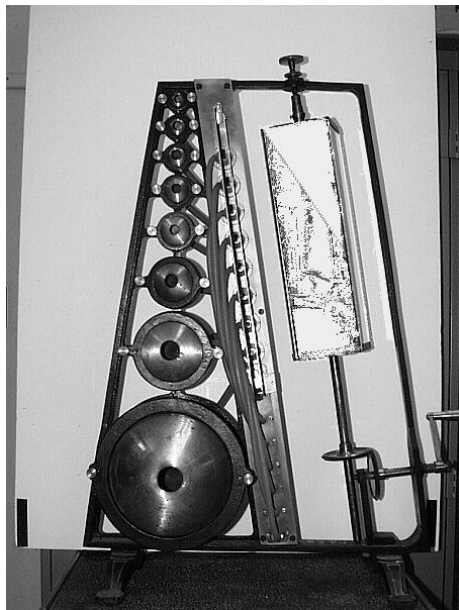
L'allure que dessinent les branches d'un diapason sur une feuille de papier circulant à vitesse constante ressemble beaucoup à une sinusoïde.

Montrer la présence d'une onde sonore : les résonateurs



Ce résonateur indique la présence d'une onde sonore *de fréquence déterminée*, même si elle est incluse dans un autre son.

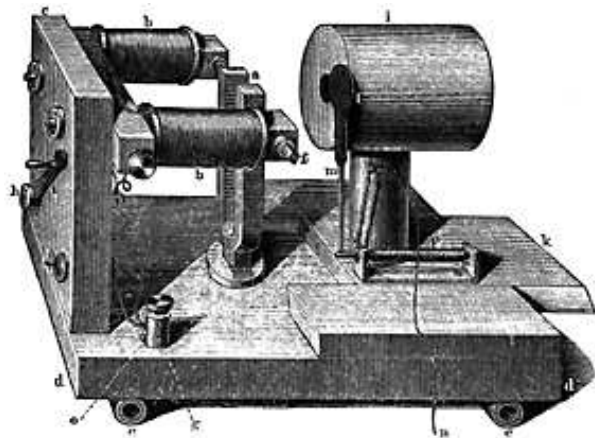
Représenter des ondes sonores : l'ancêtre du sonagramme de Helmholtz



Représenter des ondes sonores : interprétations de cette machine

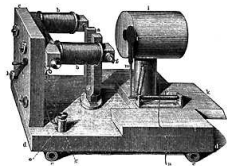
- ▶ Lien entre cette machine et les cordes vivant par influence
- ▶ Lien supposé avec les tries de l'oreille interne.
- ▶ Les progrès de la médecine depuis ce temps : portée et limites.

Fabriquer des ondes sonores à partir de leur représentation : l'ancêtre du synthétiseur de Helmholtz



Fabriquer des ondes sonores : comprendre l'ancêtre du synthétiseur de Helmholtz

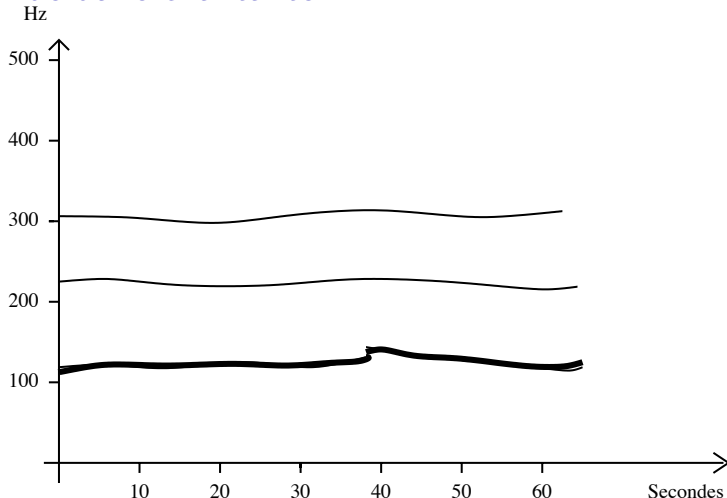
Les besoins : fabriquer des ondes sonores sinusoïdale de fréquences et d'intensités données et les activer de manière coordonnée.



- ▶ Chaque diapason émet une onde sonore presque sinusoïdale de fréquence déterminée.
- ▶ Les diapasons sont en fer, donc activables, de manière mesurable, par des électroaimants.
- ▶ La proximité entre le diapason et le "résonateur" permet d'ajuster l'intensité de chaque onde sonore sinusoïdale.

Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de dune chantante



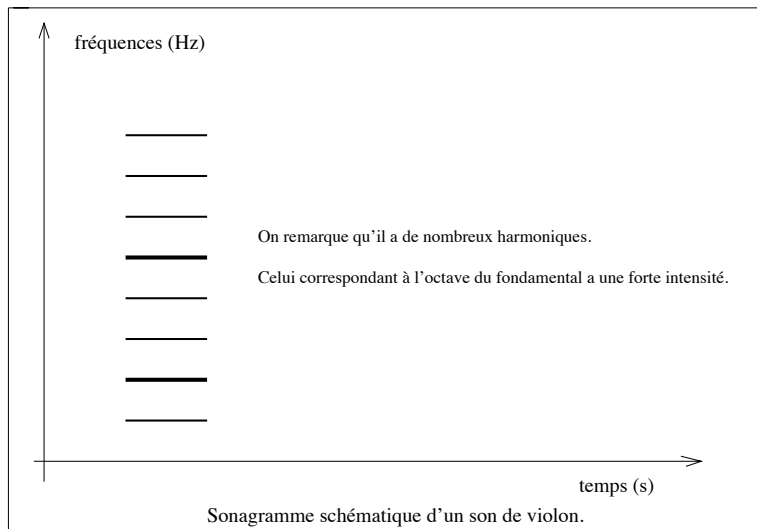
Sonagramme schématique du son d'une dune chantante.

On constate que trois partiels de fréquences stables émergent.

Les fréquences les plus élevées sont proches de multiples entiers du partiel le plus bas.

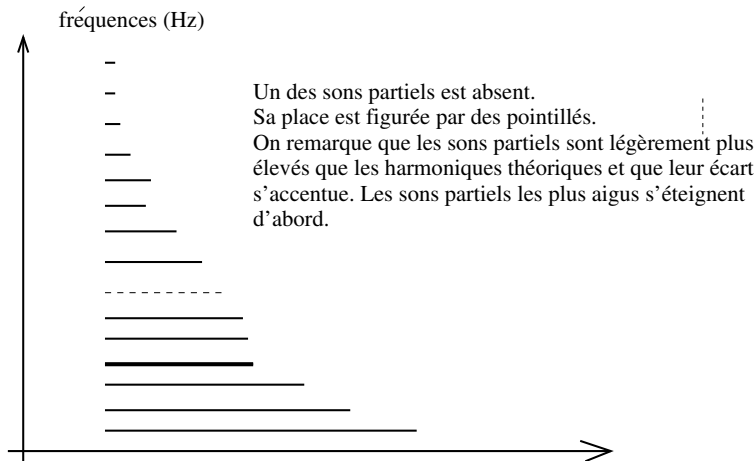
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de violon



Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

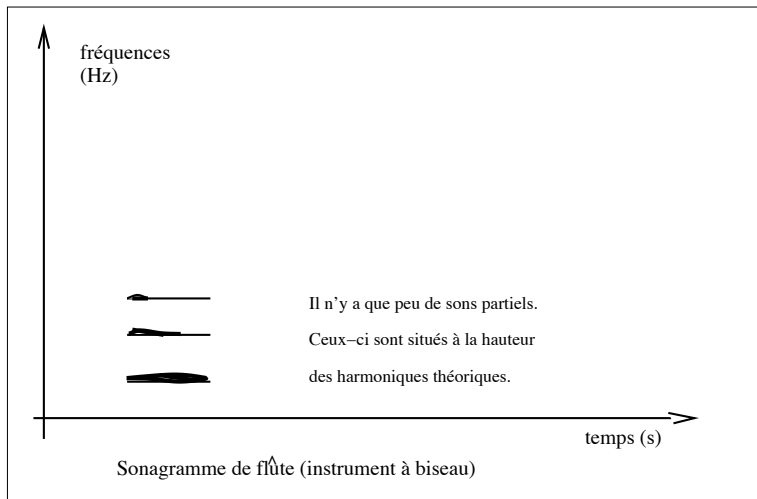
Son de corde pincée ou frappée



Sonagramme schématique d'une corde frappée ou pincée.

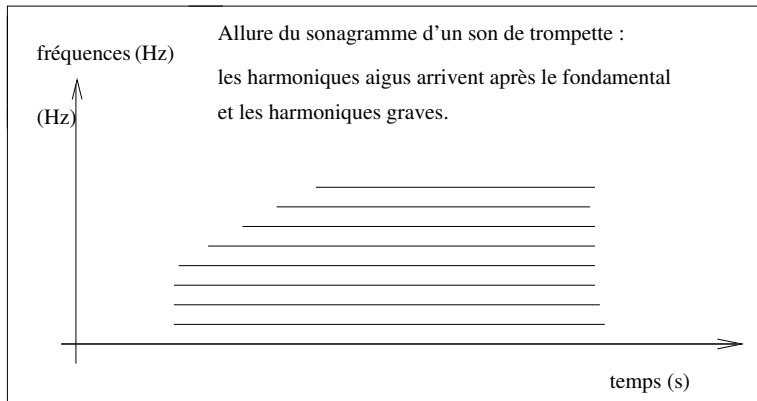
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de flute



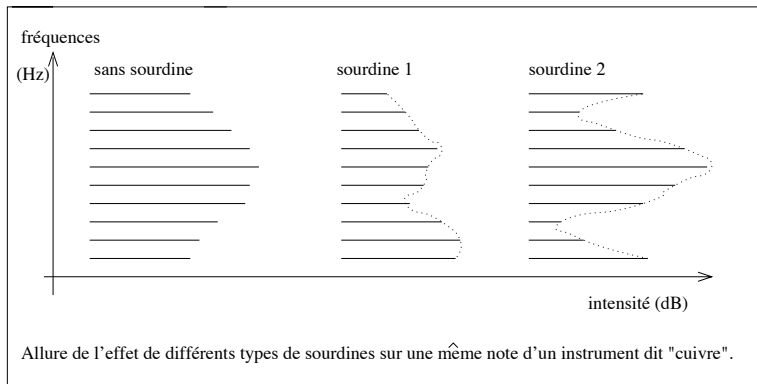
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de trompette



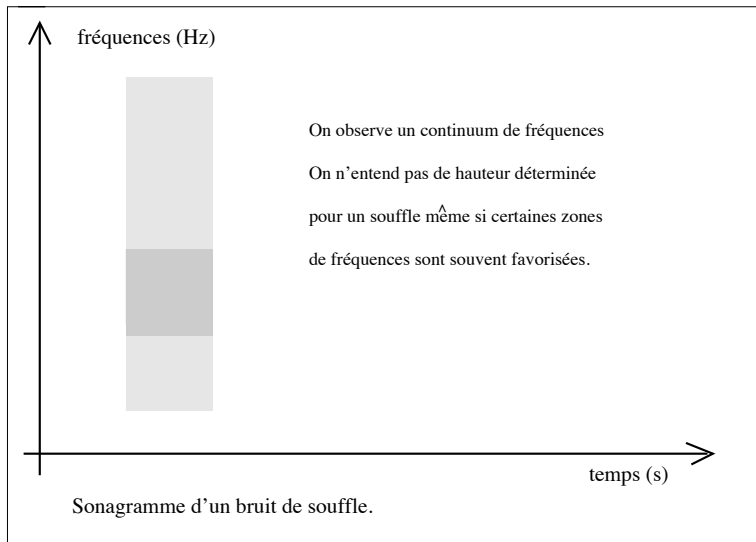
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Sons de trompettes avec sourdines



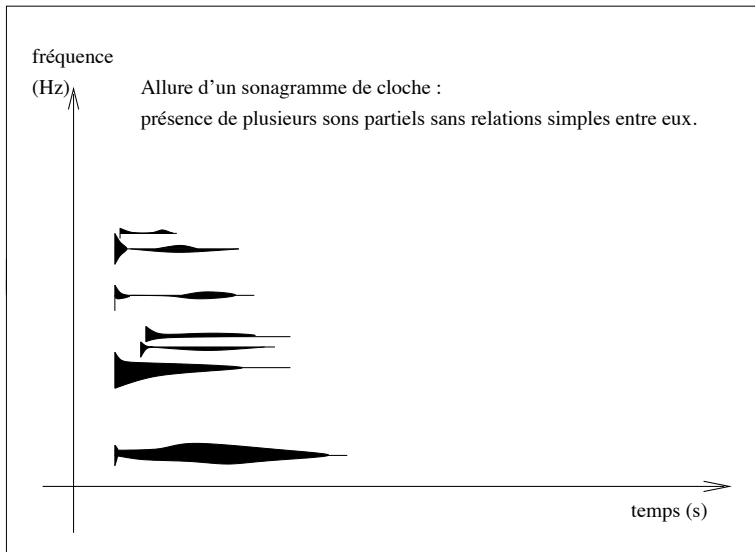
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de souffle



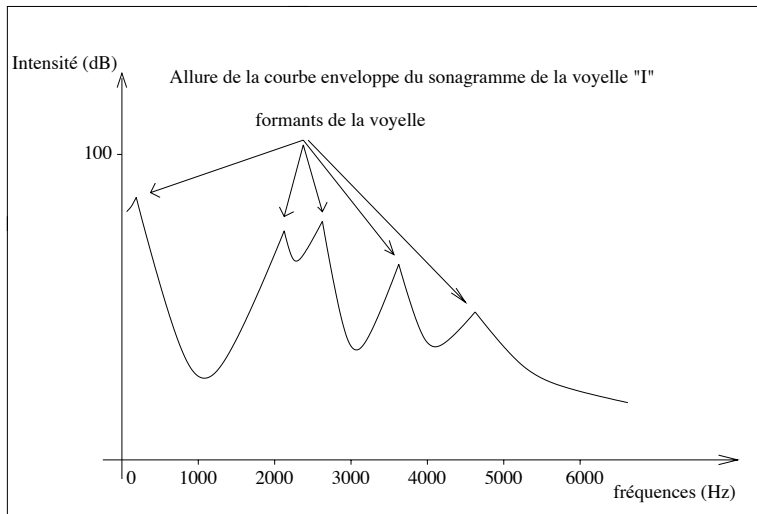
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de cloche



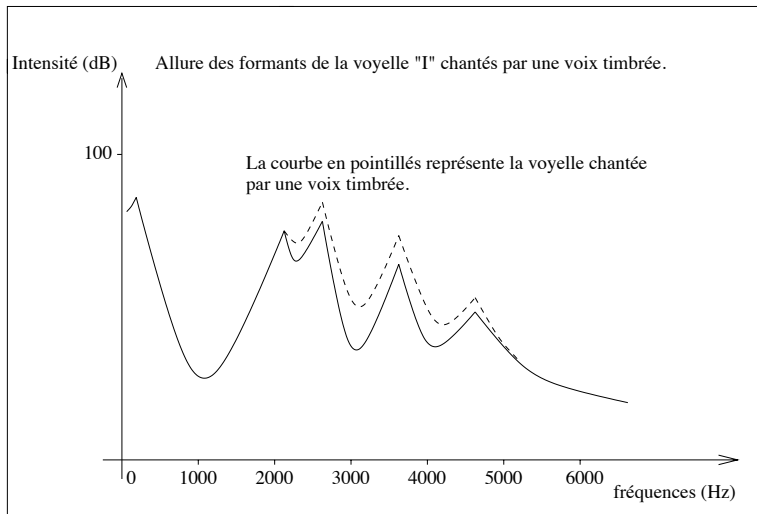
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de voyelle



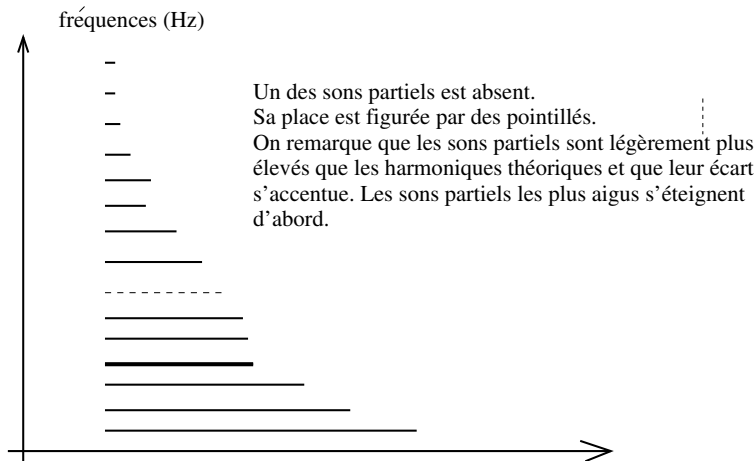
Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son de voyelle timbrée



Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

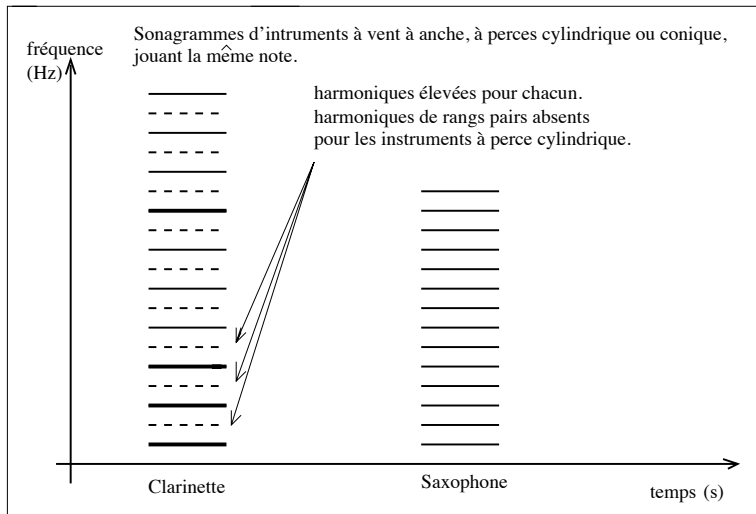
Son de corde pincée ou frappée



Sonagramme schématique d'une corde frappée ou pincée.

Quelques curiosités : sonagrammes particuliers.

Son d'instruments à anches

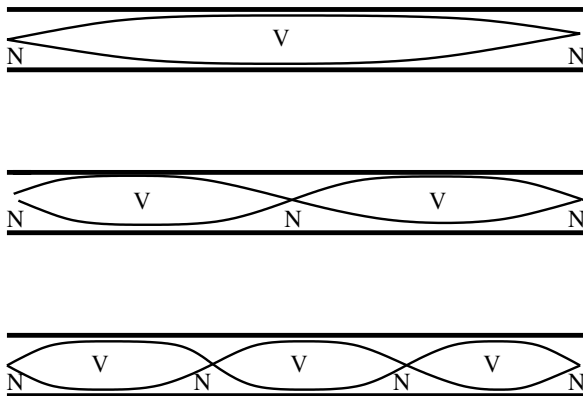


Quelques curiosités : son d'instruments à tuyaux bouchés



Lieux des noeuds et ventres de pression d'un tuyau bouché

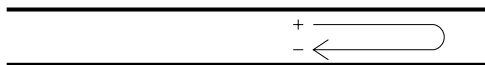
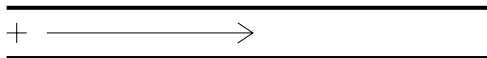
Quelques curiosités : son d'instruments à tuyaux non bouché



Lieux des noeuds et ventres de pression d'un tuyau ouvert.

Quelques curiosités : Pourquoi un tuyaux bouché sonne-t-il plus grave que non bouché ?

Parcours d'une surpression dans un tuyaux non bouché.

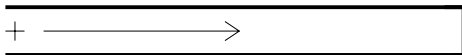


Extrémité ouverte :
changement de signe
de l'écart de pression.

Tuyau ouvert : une surpression fait un aller-retour pour retrouver son état initial.

Quelques curiosités : Pourquoi un tuyaux bouché sonne-t-il plus grave que non bouché ?

Parcours d'une surpression dans un tuyaux bouché.



Extrémité fermée :
pas de changement
de signe de l'écart
de pression.



Extrémité ouverte :
changement de signe
de l'écart de pression.



A la prochaine étape :
prochain changement
de signe et retour à
l'état initial.

Tuyau bouché : une surpression parcourt quatre fois le tuyau pour retrouver son état initial.

Brève récapitulation historique depuis la Renaissance

- ▶ Renaissance : études des instruments de musique en soi
- ▶ [XVIIème] Beeckmann ; (Descartes, Mersenne, Galilé) relation entre fréquences et longueurs de cordes
- ▶ [XVIIème] Descarte : *le son est au son comme la corde est à la corde*
- ▶ [XVIIIème] Sauveur : sur la nature physique du son
- ▶ [XVIIIème] Rameau : sciences et musique interdépendants ?
- ▶ [XVIIIème] d'Alembert, Bernoulli, Lagrange, Euler : modélisation mathématique des mouvements vibratoires des cordes.
- ▶ [XIXème] Fourier, Helmholtz : compréhension du son, physiologie.
- ▶ [XXème] Rayley, Varèse, Leipp... : systématisation de l'approche technologique et relation avec l'écoute.