

2^{ÈME} PARTIE : LE SON

Plan du chapitre

Rappels

- Onde stationnaire
- Comportements ondulatoires

Les instruments de musique

- Généralité
- Instruments à cordes
- Instruments à vent

Acoustique musicale

Le son et son traitement

- Synthétiser et reproduire des sons
- Traitement des sons
- Instruments électroacoustiques

Émetteurs et récepteurs sonores

- Haut-parleur
- Le microphone

Voix et reconnaissance vocale

Les dangers du son

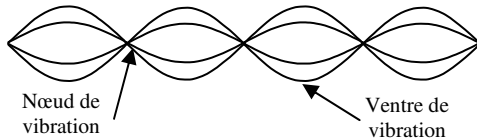
Son et architecture

- Loi de Sabine
- Acoustique active

Rappels

■ Onde stationnaire

Une onde stationnaire correspond à la superposition de deux ondes progressives de même fréquence se déplaçant à en direction opposée. Elles se forment lorsqu'il y a réflexion d'une onde aux deux extrémités de son parcours, et selon certaines conditions entre la longueur du parcours L et la longueur d'onde λ (qui dépend du type de réflexion).



[Réflexion d'une onde progressive](#)

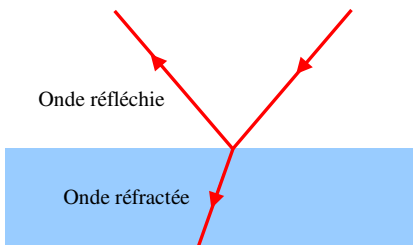
[Croisement de deux ondes progressives](#)

[Formation d'une onde stationnaire](#)

■ Comportements ondulatoires

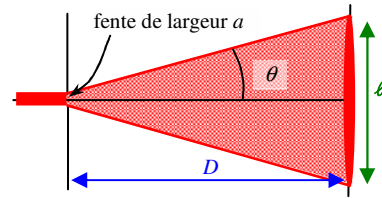
Réfraction (2^{nde}) : changement de direction d'une onde lors d'un changement de milieu de propagation.

Réflexion (2^{nde}) : brusque changement de direction d'une onde à l'interface de deux milieux. Après réflexion l'onde reste dans son milieu de propagation initial. Il y a égalité entre angle d'incidence et angle de réflexion.



Absorption (1^{ère} S) : diminution de l'énergie transportée par l'onde, laquelle est absorbée par le milieu de propagation ou par la surface de réflexion ou de diffusion.

Diffraction (TS) : modification de la propagation d'une onde (ouverture du faisceau), lorsqu'elle rencontre un obstacle suffisamment petit par rapport à sa longueur d'onde.



Interférence (TS) : interaction de deux ondes de même nature qui se rencontrent.

Effet doppler (TS) : modification de la fréquence perçue d'une onde émise par une source mobile, par rapport à la fréquence émise.

Diffusion (nouveau) : déviation d'une onde dans de multiples directions par une interaction avec d'autres objets.



Les instruments de musique

[Instruments à cordes, à vent et à percussion.](#)

■ Généralité

Un instrument de musique est un objet pouvant produire un son contrôlé par un musicien.

Tous les instruments de musique sont constitués de deux éléments :

- L'**excitateur** : c'est la partie de l'instrument qui permet la création d'une vibration.
- Le **résonateur** : ce peut être une caisse de résonance ou un tube. Cette partie creuse transmet au volume d'air contenu dans la cavité qu'elle constitue les vibrations, afin de transformer ces dernières en son musicalement satisfaisant.

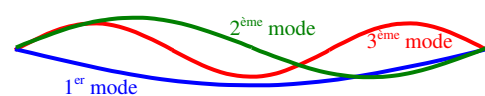
■ Instruments à cordes

L'excitateur est constitué d'une (ou de plusieurs) cordes, pincée (guitare, harpe, clavecin), frappée (piano) ou frottée (vièle, violon).

Une onde progressive est créée sur la corde. Celle-ci se réfléchissant sur ses deux extrémités, il apparaît alors une onde stationnaire.

[Corde de Melde](#)

La corde étant fixée à ses deux extrémités, la longueur d'onde de l'onde stationnaire doit être telle qu'elle soit compatible avec la formation de nœud de vibration à l'extrémité de la corde.



[Superposition de modes vibratoires](#)

[Vibration d'une corde à une extrémité libre](#)

TP 2.1 : Étude de la guitare

Problématique : Comment sont positionnées les frettes sur une guitare ?

Technique(s) : Analyser un spectre avec *Audacity*.

Annales [METr 2013 « La quête du grave »](#)

■ Instruments à vent

L'excitateur (anche, biseau, lèvres) transforme un flux d'air continu en une onde acoustique se propageant dans le résonateur (un tube, droit ou courbe).


Lorsque la fréquence de l'excitation est compatible avec la longueur du résonateur, un son est produit.

Les diverses formes du résonateur, le matériau qui le constitue et le fait que sa terminaison soit ouverte ou fermée, créent des sonorités différentes.

[Analogie entre corde et colonne d'air](#)

[Onde stationnaire dans un tuyau ouvert](#)

Acoustique musicale

 *Acoustique musicale ; gammes ; harmonies.*

La musique est l'arrangement d'un choix de notes agencées selon un certain rythme.

Entre 2 notes à l'octave, il y a un rapport de fréquence 2:1.

Il existe d'autres intervalles naturellement harmonieux pour d'autres rapports simples de fréquence : 3:2 ; 5:4 ; 4:3, etc.


Tout au long de l'histoire, différentes gammes, c'est-à-dire, différentes répartitions en intervalles de fréquence, ont été définies (gamme de pythagore, gamme naturelle, gamme tempérée, etc.).

La gamme tempérée a commencé à se populariser lors de la période baroque et s'est généralisée par la suite. C'est elle qui est aujourd'hui utilisée en Occident. Elle est définie par 12 notes entre deux octaves, chaque note étant distante d'un demi-ton dont le rapport de fréquence est constant et vaut $\sqrt[12]{2}$.

La tonalité d'une mélodie *tonale* dépend des 7 notes (parmi les 12 possibles) utilisées pour composer la mélodie.

 [Gammes et accords](#)

 [Accord harmonique](#)

 [La quinte juste](#) (un peu de détente dans ce monde de brutes)

TP 2.2 : Étude de la flûte à bec

Objectif : Analyser la justesse et la tenue des notes produites associées au contrôle du souffle

Technique(s) : Analyser un spectre avec *Audacity*.

TP 2.3 : Étude de différentes gammes

Objectif : Vérifier que deux notes très proches appartiennent à des gammes différentes et retrouver leur gamme respective.

Technique(s) : Analyser un spectre avec *Audacity*.

Le son et son traitement

 *Instruments électroniques*

 *Traitement du son*

■ Synthétiser et reproduire des sons

Un son complexe étant constituant d'une somme de sinusoides de fréquence égale à un multiple entier de la fréquence du son, il est possible, de **créer** ou de **reproduire** des sons en utilisant des circuits oscillants électriques ou électroniques. C'est ce que font les « claviers » électriques ou électroniques, depuis 1935 (orgue de Hammond).

 [Analyse d'un son musical](#)

 [Synthèse d'un son musical](#)

 [Constitution d'un signal complexe](#)

■ Traitement des sons

Il est possible de « traiter » un son, c'est-à-dire de le modifier, pour obtenir une autre sonorité ou des effets particuliers.


Tous les traitements du son ne sont pas nécessairement électroniques (sourdine de trompette, ou même vibrato sur un instrument à vent ou à corde).

Les traitements électroniques sont beaucoup plus variés et très utilisés depuis la fin des années 1960. Parmi les effets possibles : changement de la hauteur du son, amplification, égalisation en fréquence (diminution de l'amplitude de certaines fréquences et augmentation de l'amplitude d'autres fréquences), compression (amplification des sons faibles et atténuation des sons forts), écho ou réverbération, suppression de bruit, saturation, etc...

■ Instruments électroacoustiques

Les instruments électroacoustiques ou électroniques présentent quelques avantages et quelques inconvénients par rapport aux instruments acoustiques.

- Encombrement réduit
- Plus facile d'y appliquer des effets (amplification et autres)
- Plus facile à jouer (au prix d'une perte de nuance)
- Prix réduit.

 [Hendrix et la pédale wha wha \(Voodoo Child\)](#)

 [Compresseur sur une guitare électrique](#)

 [Différentes sourdines de trompette](#)

Ex.1 « *L'orgue Hammond* »

Émetteurs et récepteurs sonores

 *Microphone ; enceintes acoustiques ; casque audio.*

■ Haut-parleur

Principe de fonctionnement

Un haut-parleur (HP) transforme une tension électrique en une onde sonore qui a la même allure, grâce à la force de **Laplace**. C'est un transducteur électromécanique.

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force dite force de Laplace. Cette force est proportionnelle à :

- I : intensité du courant qui parcourt le conducteur (A)
- B : intensité du champ magnétique (tesla, T)
- ℓ : longueur du conducteur plongé dans le champ magnétique

Son intensité dépend également de l'orientation du sens du courant par rapport au champ magnétique.

Le sens de cette force dépend du sens du courant et du sens du champ magnétique.

Ainsi, si un HP est soumis à une tension sinusoïdale, il produira un son sinusoïdale de même fréquence.

La bobine (enroulement de fil électrique), mise en mouvement par la force de Laplace due au courant qui la traverse, est solidaire de la membrane du haut-parleur, qui va créer, par son mouvement, une onde sonore.

 [Haut Parleur - Principe de fonctionnement](#)

Bande passante d'un haut-parleur

Un HP idéal devrait reproduire de manière égale tous les sons dans la gamme des fréquences audibles (20-20.000 Hz).

Pour des raisons physiques, ceci n'est pas possible. Un haut-parleur ne sera capable de reproduire efficacement qu'un certain domaine de fréquence. Si l'on veut couvrir tout le spectre audible, il faut associer plusieurs haut-parleur de tailles différentes.

L'enceinte acoustique

Une enceinte acoustique permet :

- d'éviter l'émission d'un son vers l'arrière du haut-parleur, susceptible de créer des interférences.
- d'améliorer les performances des hauts-parleurs, notamment dans les basses fréquences, en jouant le même rôle que la caisse de résonance d'un instrument de musique.
- de coordonner la restitution sonore de plusieurs hauts parleurs de tailles différentes afin de restituer efficacement le son.

■ Le microphone

Certains microphones (les plus courants) fonctionnent à l'inverse d'un haut-parleur :

- Une très fine membrane est mise en mouvement par les ondes sonores reçues. Ce mouvement est analogue aux ondes sonores (même fréquence, même spectre, même variation d'amplitude)

- Le mouvement de cette membrane est communiquée à une bobine placée dans un champ magnétique, ce qui va induire l'apparition d'un courant analogue au mouvement de la membrane (et donc au son). Ce courant est ensuite amplifié et soit dirigé vers des hauts-parleurs, soit vers un dispositif d'enregistrement.

Tout comme les hauts-parleurs, les microphones possèdent également une bande passante limitée.

 [Microphone - Principe de fonctionnement](#)

Voix et reconnaissance vocale

 Voix ; acoustique physiologique

 Reconnaissance vocale

TP 2.4 : reconnaissance vocale

Objectif : identifier une personne à partir de l'observation d'un enregistrement de sa voix (spectre et allure du fichier son)

Démarche : on enregistre deux fois chaque personne présente prononçant le mot « ouverture » de la même manière. Pour chaque personne, un enregistrement est associé à son nom, l'autre est anonymisé. On choisit au hasard un fichier anonymisé. Le but est de retrouver qui a été enregistré sans écouter le fichier son, mais en le comparant à la banque de fichiers son créés.

La voix humaine est l'ensemble des sons produits par le frottement de l'air des poumons sur les replis du larynx de l'être humain.

Tessiture : Les hommes et les femmes ont des cordes vocales de tailles différentes. Des facteurs génétiques sont à l'origine de la différence de taille des cordes vocales au sein d'un même sexe, ce qui a donné lieu au classement des voix de chanteurs par tessiture : basses, barytons, ténors et haute-contre chez les hommes, contraltos, mezzo-sopranos et sopranos chez les femmes. La taille des cordes vocales n'est pas la seule source de différence entre les voix d'hommes et de femmes. La cavité résonnante (trachée, bouche...) est généralement plus grande chez les hommes, ce qui favorise aussi les sons graves indépendamment des cordes vocales elles-mêmes.

Timbre : La voix de chaque individu est unique, du fait de la forme et de la taille non seulement de ses cordes vocales, mais aussi du reste du corps de la personne.

Les dangers du son

$$\text{Niveau sonore en décibel (dB)} : L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Avec I_0 l'intensité sonore de référence : $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

I dépend de la puissance sonore de la source P (en watt) et de la distance d à la source sonore :

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot d^2}$$

Les intensités sonores s'ajoutent, **pas les niveaux sonores !**

Si l'on perçoit une intensité sonore L à une certaine distance d de la cible, en doublant cette distance, L diminue de 6 dB.

- jusqu'à 80 dB, il n'y a aucun risque pour l'oreille, quelle que soit la durée d'exposition ;
- de 80 à 90 dB, on approche de la zone de nocivité, mais les risques sont limités à des expositions de très longue durée ;
- de 90 à 115 dB, notre oreille est en danger : plus le son est fort moins il faut de temps d'exposition pour provoquer des lésions ;
- au-delà de 115 dB, des bruits impulsifs (très brefs) provoquent immédiatement des dommages irréversibles.

Exemple	Niveau sonore (dB)	Perception humaine
Silence	0	
Murmures	30	Très tranquille
Bruit dans une bibliothèque	40	
Bruits domestiques	50	Légèrement dérangeant
Conversation normale	60	
Bruits dans un restaurant	70	Difficulté à parler au téléphone
Sèche-cheveux à 60 cm	80	Dérangeant
Guitare électrique	100	
Concert de rock	110	Très dérangeant
Klaxon à 1 m	120	
Train	130	Insupportable

Annales  ADS 2013 « Comment éviter les dangers sonores sans perdre la qualité du son ? »

Son et architecture

 Auditorium ; salle sourde.

 Isolation phonique ; acoustique active ; réverbération.

Dans le domaine de l'architecture, deux aspects liés à la propagation d'une onde sonore sont particulièrement importants :

- **L'isolation phonique :** les sons de l'environnement sont parfois gênant voire dangereux. C'est pourquoi il est nécessaire de les atténuer. Pour cela, on procède à une isolation phonique en utilisant certains matériaux qui absorbent le son (laine de roche, double vitrage, etc.)

- **La réverbération :** c'est la persistance du son dans un lieu après l'interruption de la source sonore. La réverbération est le mélange d'une quantité de réflexions directes et indirectes donnant un son confus qui décroît progressivement. Elle peut être recherchée (pour des concerts de certains genres musicaux) ou au contraire évitée (elle rend un discours plus difficile à comprendre).

Les salles sourdes sont pourvues de revêtements qui (1) arrêtent tous les sons provenant de l'extérieur de la salle et (2) absorbent tous les sons émis dans la salle, si bien qu'aucun écho ou aucune réverbération ne se fait entendre.

 [Acoustique architecturale \(Wikipédia\)](#)

■ Loi de Sabine

La durée de réverbération T est le temps mis par un son pour décroître de 60 dB après la coupure sonore.

$$T = 0,16 \cdot V / A_{\text{eq}}$$

V est le volume de la pièce

A_{eq} est la surface équivalente de la pièce.

$$A_{\text{eq}} = \sum_i S_i \alpha_i$$

avec S_i l'aire de la surface du matériau i de coefficient d'absorption α_i .

Le coefficient α_i dépend du matériau utilisé (le verre est très peu absorbant, donc possède un α faible, tandis que du tissu aurait un α élevé), mais aussi de la fréquence du son.

■ Acoustique active

L'acoustique active consiste à enregistrer localement le son incident et à réémettre, à l'aide de différents systèmes électroacoustiques, une onde sonore adaptée à l'effet désiré.

On peut : annuler l'onde sonore incidente (casques anti-bruit actifs servant à atténuer fortement les bruits environnants ; augmenter ou annuler la réverbération naturelle d'une salle, etc.)

Annales  ANT 2014 « Isolation acoustique d'un réfectoire »