Séance de Spécialité n° 6
Analyse et modification des sons

1 Activité expérimentale : acquisition et analyse d'un son

Extrait d'un article d'Antonio Fischetti (Hors Série n° 79 de Sciences et Avenir, Octobre-Novembre 1990) :

[...] Le son pur n'est autre que le mouvement d'oscillation d'air le plus simple que l'on puisse imaginer : un va- et-vient régulier autour d'une position moyenne. [...]
Exceptés les générateurs de courant électrique qui les produisent aisément, ils sont rares dans la nature : le « la » d'un diapason, un sifflement, une note aiguë tenue par une voix féminine. [...]
C'est la constitution en sons purs qui permet de différencier un klaxon, la voix de la Callas ou bien le beuglement d'une vache. Certains (sons purs) sont plus aigus que d'autres. La hauteur du son, qui permet au musicien de connaître la note do, ré ou fa est bien déterminée par la vitesse de vibration des particules de l'air.

1.1 Transitoires d'attaque et d'extinction

- Utiliser le logiciel Regressi et l'interface d'acquisition GTSII. Réglages :
  - Activer l'entrée EAD1 sur +500/-500 mV, désactiver les autres voies ;
  - brancher le microphone, l'allumer ;
  - Régler l'acquisition en mode temporel/déclenchement au clavier (barre d'espace), durée d'acquisition sur 5 secondes avec environ 250 points ;
  - Lancer l'acquisition sur EAD1 (ou oscillogramme) et jouer une note de une ou deux secondes avec la flûte à bec, au diapason ou à la guitare.
- 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.

1.2 Hauteur & spectre d'un son

- Changer maintenant la durée d'enregistrement (par exemple, 0,1 secondes) et enregistrer une note maintenue, au diapason, à la flûte à bec ou à la guitare. 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.
- Effectuer la transformée de Fourier du signal enregistré. Pour cela, cliquer sur l'icône Analyse de Fourier, (limite/choisir une période), pour obtenir le spectre en fréquence de la note émise par le diapason.
- Grâce au curseur, trouver la fréquence du fondamental f_1 et des trois premières harmoniques f_2, f_3 et f_4.
- Changer d'instrument, et noter les différences.
- Modifier la hauteur du son de l'instrument pour jouer une note plus aiguë, puis une note une octave supérieure, et recommencer les mesures.

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

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

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

d. Quelles sont les caractéristiques d'un son pur ? Le signal correspondant à un tel son est-il périodique ? Sinusoïdal ?

e. Quelles sont les caractéristiques d'un son complexe ? Le signal correspondant à un tel son est-il périodique ? Sinusoïdal ?

f. Quelle relation existe-t-il entre f_1 et chacune des autres fréquences ?

2 Activité expérimentale : traitement d'un son

L'effet « wah-wah » est probablement l'un des effets pour instruments le plus utilisé par les musiciens. Un son peut être modifié par traitement électronique ou numérique. Avec un logiciel comme Audacity, on peut effectuer une multitude de modifications sur un fichier son. En quoi consiste un effet sonore ?

2.1 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 de mesure GTSII.
- 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.
- Effectuer la transformée de Fourier du signal enregistré.
- Avec le réticule, trouver la fréquence du fondamental et des harmoniques.

2.2 Traitement du son

- On dispose de fichiers sons dans un dossier « Fichiers sons » de la clef USB. Lire ces sons avec Audacity, en écoutant au casque.
- Une fois un fichier son ouvert, le menu « effet » permet d'accéder à de nombreux filtres qui permettent de modifier de nombreux paramètres d'un son musical ou non.

  Pour chacun des effets mentionnés ci-après :

  1. réaliser un aperçu de l'effet en modifiant le paramètre étudié dans les deux sens (augmentation/diminution), sauf pour l'écho ;
  2. faire un compte-rendu en indiquant pour chaque traitement les principales caractéristiques modifiées entre le son original et le son traité.

  Voici les effets intéressants que l'on peut trouver sous Audacity :

  - Amplification ;
  - Changer le tempo ;
  - Changer la hauteur ;
  - Effet wahwah ;
  - Echo (durée du délai 0,2 s).

3 Correction des exercices de la séance n° 5

Questions

Q 1 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 $f_n = nf_1$.

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

Quantification : puisque les fréquences obéissent à $f_n = nf_1$, 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.

Q 2 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.

Q 3 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.

Q 4 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.

Q 5 Voir les séances sur la guitare, sur la corde de Melde et sur les tuyaux sonores, respectivement.

Q 6 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 !

Q 7 Si le fondamental d'une corde attachée aux deux extrémitées est 440 Hz, on peut en théorie émettre tous les harmoniques, toutes les fréquences multiples entières, donc en particulier 880 Hz.

Exercices

5.1 Vibration sonore d'une colonne d'air

a. Voyez les représentations ② et ③ en tuyau ouvert page 3 de la séance 5.

b. $f_2 = 2f_1$ et $f_3 = 3f_1$.

c. Comme le tube est deux fois plus court, la longueur d'onde du fondamental sera deux fois plus petite, et sa fréquence double.

d. 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.

5.2 Le violon (type Bac)

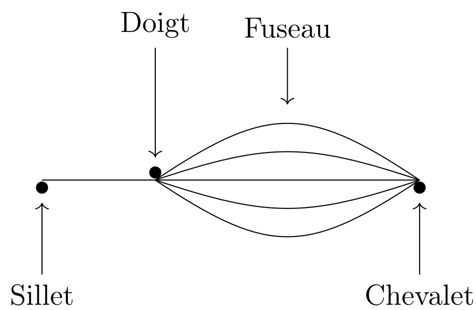
1.1. Dans un violon, les cordes constituent les excitateurs, et le résonateur est la caisse, y inclus la fameuse caisse d'harmonie. Les cordes créent les vibrations (mode fondamental et modes harmoniques) à l'origine du son, et la caisse amplifie ce son avant de le transmettre à l'air ambiant.

1.2. On modifie la hauteur du son émis par une corde en la raccourcissant, en posant un doigt de la main gauche sur la corde pour la plaquer fermement sur la « touche » (document 2).

1.3. Les éléments transmettant les vibrations sont les sillets et le chevalet, vibrations qui parcourent ensuite la table d'harmonie, qui « transmet et diffuse les vibrations à tout l'instrument » (document 3), et donc à l'ensemble de la caisse de résonance.

2.1.1. La direction de propagation de l'onde est perpendiculaire à la direction de la perturbation (pincement de la corde), la corde est donc le siège d'une onde transversale (la définition d'une onde transversale était attendue).

2.1.2. Schéma de la corde :



2.1.3. La longueur d'onde λ est la plus petite distance entre deux points en phase. On constate qu'il se forme une onde stationnaire d'un seul fuseau, de longueur la moitié de la longueur d'onde sur la corde de longueur L, donc :

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

2.2.1. La célérité v des ondes sur une corde est :

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

La longueur d'onde λ est liée à la célérité v et à la fréquence f par :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

En remplaçant la célérité par son expression dans cette dernière formule :

$$\lambda = \frac{1}{f}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Or d'après la question précédente :

$$L = \frac{\lambda}{2} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = 2L$$

Donc en remplaçant dans l'expression précédente :

$$2L = \frac{1}{f}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \Leftrightarrow \quad 2Lf = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \qquad \text{c. q. f. d.}$$

2.2.2. On isole la tension T dans l'expression de la question précédente :

$$2Lf = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad \Rightarrow \quad \frac{T}{\mu} = 4L^2f^2$$

$$\Leftrightarrow \quad T = 4L^2f^2\mu$$

Application numérique :

$$T = 4 \times 0,550^2 \times 440^2 \times 0,95 \times 10^{-3}$$
$$T = 2,2 \times 10^2 \text{ N}$$

2.3. La longueur L' de la corde est modifiée, ce qui modifie la longueur d'onde λ' du son émis et donc, sa fréquence f'. Cela a pour conséquence de modifier la note jouée. Comme la tension T de la corde ne change pas et que la masse linéique μ est identique, la célérité v n'est pas modifiée. La formule de la question **2.2.1** permet de trouver L' :

$$2L'f' = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = 2Lf \quad \Rightarrow \quad L' = L\frac{f}{f'}$$

Application numérique :

$$L' = 55,0 \times \frac{294}{440} = 36,8 \text{ cm}$$

Donc la violoniste appuie à 36,8 cm du chevalet, ou encore $55,0 - 36,8 = 18,2$ cm du sillet.

2.4.1. Le spectre n° 1 correspond à un son pur, sans harmoniques, avec un fondamental à 440 Hz, il s'agit du spectre du diapason ;

Le spectre n° 2 correspond à un son complexe, avec des harmoniques et un fondamental à 440 Hz, il s'agit du spectre du violon. Pour vérifier qu'il s'agit bien du fondamental et d'harmoniques, il faut « tester » si la relation $f_n = nf_1$ est valable, par lecture graphique des fréquences et calcul des rapports f_n/f_1 :

$$\frac{1\,300}{440} = 3,0 \quad \text{et} \quad \frac{2\,200}{440} = 5,0$$

Ainsi, les fréquences des harmoniques sont multiples de celle du fondamental, donc il s'agit bien d'un son musical.

2.4.2. Grâce aux lectures graphiques et calculs précédents, on constate l'absence des harmoniques paires $n = 2$, $n = 4$ et $n = 6$:

$$f_2 = 2f_1 = 2 \times 440 = 880 \text{ Hz}$$
$$f_4 = 4f_1 = 4 \times 440 = 1\,760 \text{ Hz}$$
$$f_6 = 6f_1 = 6 \times 440 = 2\,640 \text{ Hz}$$

3. Puisque la table d'harmonie est à la fois un élément qui transmet les vibrations entre les cordes et la caisse, et entre la caisse et l'air lors de l'émission du son, elle est donc de toute première importance. Sa forme et les matériaux qui la composent sont le résultat de choix très précis, selon un art et de techniques plusieurs fois centenaires.

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

<table>
<tr><td colspan="2">Argumentaire satisfaisant

Problématique respectée
ET
Bonne mise en relation des arguments avec la problématique
ET
Argumentaire correctement rédigé</td><td colspan="2">Argumentaire satisfaisant

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

5 Exercice pour la séance n° 7 – Comment sont positionnées les frettes sur le manche d'une guitare ?

Carlo DOMENICONI*, guitariste virtuose italien.*

Comme le montre la photographie ci-dessus, pour modifier la hauteur du son émis, le guitariste appuie sur la corde au niveau d'une case, de façon à modifier la longueur de la corde utilisée. Des pièces métalliques, nommées frettes, délimitent les cases sur le manche d'une guitare.

En s'appuyant sur les documents donnés page suivante, répondre aux questions suivantes :

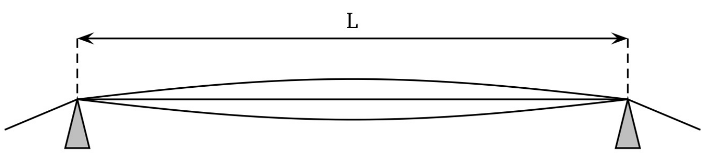
1. Discuter qualitativement de l'influence de la longueur, de la tension et de la masse par unité de longueur de la corde sur la fréquence du son émis par une corde vibrante.
2. Expliquer qualitativement comment un guitariste passe d'une note jouée Sol à la note La de la même octave et à l'aide de la même corde.
3. Déterminer les fréquences de Do_3 et Do_4.
4. Prévoir les positions approchées en cm des quatre premières frettes.

Effectuer ensuite quelques vérifications simples à l'aide de la photo du document 1.

Document 2 Corde vibrante.

Si l'on considère une corde vibrante maintenue entre ses deux extrémités, telle que représentée sur la figure ci-dessous, la hauteur du son émis dépend de la longueur L de la corde, de sa masse par unité de longueur μ et de la tension T de la corde. La composition spectrale du son émis est complexe et la fréquence f du fondamental est donnée par la relation :

$$f = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$



Document 3 La gamme tempérée.

- Les notes se suivent dans l'ordre Do, Ré, Mi, Fa, Sol, La, Si, Do ; un « cycle » correspond à une octave.
- On envisage 10 octaves numérotées de -1 à 8.
- Chaque note d'une gamme est caractérisée par sa fréquence. Par convention, le La_3 (diapason des musiciens) de l'octave numérotée 3 a une fréquence de 440 Hz.
- Le passage d'une note à la note du même nom à l'octave supérieure multiplie sa fréquence par

deux ; ainsi la fréquence du La_2 est égale à 220 Hz et celle du la_4 à 880 Hz.

— Dans la gamme tempérée, le quotient de la fréquence d'une note sur la fréquence de la note précédente est égal à :

$$(2)^{\frac{1}{12}} \simeq 1,059$$

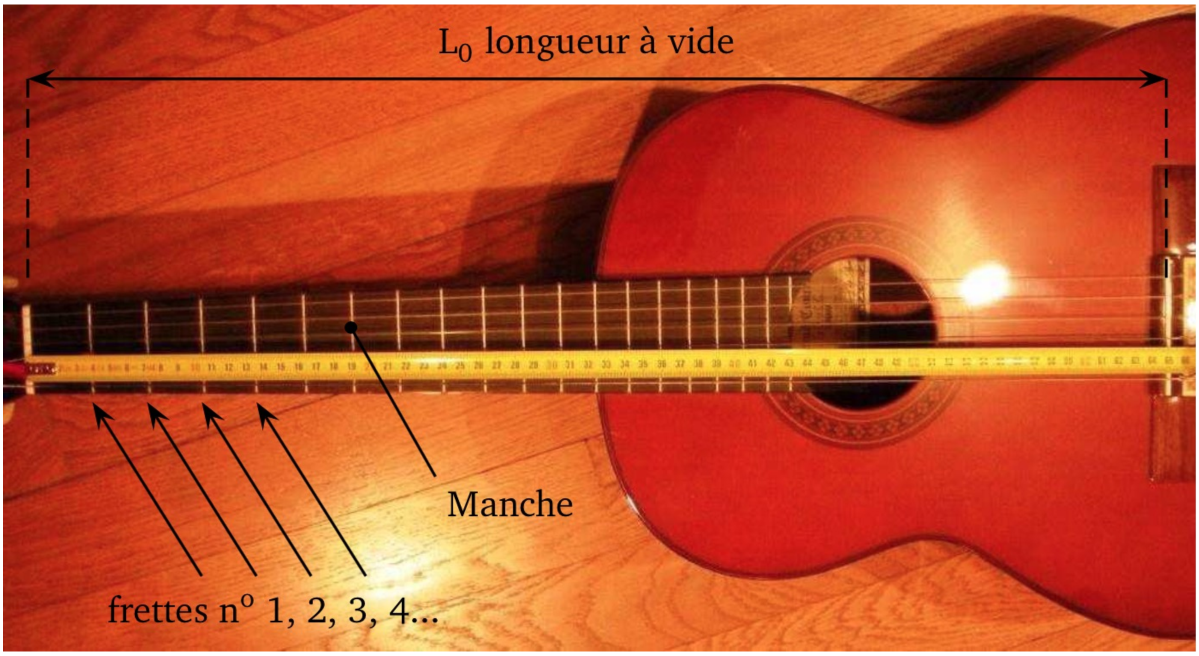
Si l'on note f la fréquence de la note Do, note fondamentale d'une octave donnée, les fréquences des notes successives de cette octave sont regroupées dans le tableau ci-contre.

— Pour une corde donnée, pour passer par exemple d'un Ré à un Ré♯, le guitariste bloque cette corde sur la case située juste à côté de celle utilisée pour jouer le Ré, de façon à raccourcir la corde.

Note	Fréquence
Do	f
Do♯ Ré♭	$(2)^{\frac{1}{12}} \times f = 1,059 \times f$
Ré	$(2)^{\frac{2}{12}} \times f = 1,122 \times f$
Ré♯ Mi♭	$(2)^{\frac{3}{12}} \times f = 1,189 \times f$
Mi Fa♭	$(2)^{\frac{4}{12}} \times f = 1,260 \times f$
Mi♯ Fa	$(2)^{\frac{5}{12}} \times f = 1,335 \times f$
Fa♯ Sol♭	$(2)^{\frac{6}{12}} \times f = 1,414 \times f$
Sol	$(2)^{\frac{7}{12}} \times f = 1,498 \times f$
Sol♯ La♭	$(2)^{\frac{8}{12}} \times f = 1,587 \times f$
La	$(2)^{\frac{9}{12}} \times f = 1,682 \times f$
La♯ Si♭	$(2)^{\frac{10}{12}} \times f = 1,782 \times f$
Si Do♭	$(2)^{\frac{11}{12}} \times f = 1,888 \times f$
Do Si♯	$(2)^{\frac{12}{12}} \times f = 2 \times f$

Document 1 Description d'un manche de guitare.

La photographie de la figure montre le manche d'une guitare classique. La longueur d'une corde à vide L_0 est de 65,2 cm.



Les six cordes se différencient par leur masse par unité de longueur et leur diamètre.