

## T.P. P8 : Acoustique musicale

**Objectif :** Comprendre la décomposition fréquentiel d'un son dont on fait l'acquisition. Analyser un spectre de fréquence d'un son et y associer les notions de fréquence, hauteur, timbre et intensité de ce son. Notion de gamme tempérée.

### I.- Analyse d'un son

#### 1) Décomposition fréquentiel d'un signal : spectre de Fourier.

E.1. : Allumer l'ordinateur et lancer **REGRESSI**.

E.2. : Choisir **Fichier** puis **nouveau** et **simulation**. Une fenêtre s'ouvre avec la création d'une variable de contrôle par défaut le temps. Choisir une durée totale de **50 ms** pour un nombre de points de **4096**.

C.3. : On rappelle l'expression d'un signal (tension, intensité, mouvement, onde...) sinusoïdal :  $s(t) = S_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$

Q.4. : Donner le nom de chaque terme de cette expression

E.5. : On veut créer le signal  $s_1 = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 100 \cdot t)$ . Cliquer sur **Y+** puis sélectionner grandeur calculée et recopier son expression.

S.6. : Représenter  $s_1(t)$ . quelle est la valeur de l'amplitude  $S_1$  et de la fréquence  $f_1$  de ce signal.

E.7. : De manière analogue, créer les grandeurs :

$$s_3 = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 300 \cdot t)$$

$$s_5 = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 500 \cdot t)$$

$$s_7 = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 700 \cdot t)$$

$$s_9 = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 900 \cdot t)$$

$$s_{11} = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot 1100 \cdot t)$$

E.8. : Créer enfin le signal  $s = s_1 + (1/3) \cdot s_3 + (1/5) \cdot s_5 + (1/7) \cdot s_7 + (1/9) \cdot s_9 + (1/11) \cdot s_{11}$ .

S.9. : Représenter le signal  $s(t)$ . Quelle est sa fréquence  $f$  ? A quel signal bien connu  $s(t)$  vous fait-il penser ?

C.10. : Un signal créneau de fréquence  $f$  est composé d'une somme de signaux sinusoïdaux de fréquences  $f_n$  égale à un nombre impair de fois la fréquence  $f$  et d'amplitude  $S_n$  décroissantes :  $S_n = S_1/n$ .

Le mathématicien Joseph Fourier a montré que tout signal périodique de fréquence  $f$  pouvait se décomposer en une somme

(infinie) de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples entiers de  $f$ .

C.11. : On peut mettre en évidence cette décomposition en passant du mode de représentation temporelle  $s(t)$  au mode de représentation fréquentiel  $s(f)$  aussi appelé décomposition spectrale, spectre de Fourier ou analyse de Fourier.

E.12. : Cette analyse de Fourier est réalisable sur REGRESSI au moyen de l'icône **fenêtre Fourier**. Cliquer sur cette icône et sélectionner ensuite dans le menu de cette fenêtre l'onglet **graphe temporel** pour disposer des deux représentations. Enfin, dans le menu **options** puis **calcul**, sélectionner **signal périodique**.

S.13. : Représenter l'analyse spectrale de  $s_1$ . Justifier l'allure du spectre de Fourier obtenu.

S.14. : Représenter l'analyse spectrale de  $s$ .

Q.15. : Montrer qu'on retrouve la composition du signal  $s(t)$  en ses différentes composantes  $s_1$  à  $s_{11}$  avec les amplitudes  $S_n$  et les fréquences  $f_n$ .

#### 2) Fondamental et harmoniques

E.16. : On a réalisé l'acquisition du son d'un la de diapason à l'aide d'un microphone. On a enregistré le fichier sur le réseau sous **sons spécialité** puis **la3diapason.rw3**. Télécharger puis ouvrir ce fichier.

E.17. : Réaliser l'analyse de Fourier de ce la. Que constate-t-on ? Pourquoi parle-t-on de son pur ? Quel est la fréquence du mode fondamental ? Y-a-t'il des harmoniques ? Si oui quelles sont leurs fréquences et amplitudes ?

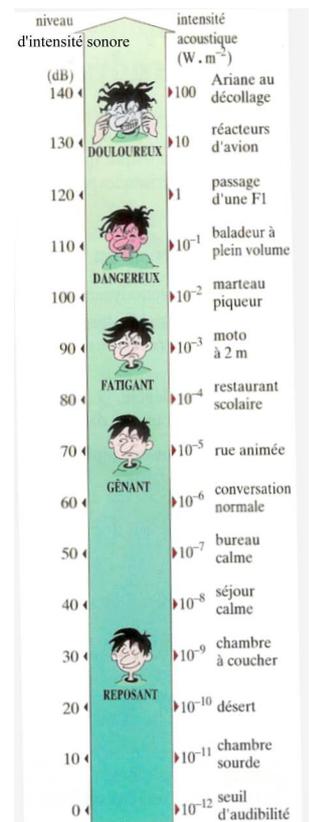
E.18. : Sur le même site, on a enregistré le fichier d'acquisition du son d'un même la de guitare à l'aide d'un microphone : **la3guitare.rw3**. Télécharger puis ouvrir ce fichier.

E.19. : Réaliser l'analyse de Fourier de ce la. Que constate-t-on ? Pourquoi parle-t-on de son composé ? Quel est la fréquence du mode fondamental ? Y-a-t'il des harmoniques ? Si oui quelles sont leurs fréquences et amplitudes ?

C.20. : Ainsi, pour un signal sonore, l'analyse spectrale permet la décomposition du son en ses différents modes propres de vibration : elle renseigne donc sur les amplitudes et les fréquences du mode fondamental et des modes harmoniques.

### II.- Caractéristiques des sons

E.21. : A partir du site ou sur <http://www.micrelec.fr/sp>, télécharger le fichier waver.zip et l'installer. **WAVER** est un logiciel permettant de visualiser rapidement les spectres de Fourier de sons enregistrés au format .wav. Il est disponible en version de démonstration pour une exploitation durant une courte période d'essai.



## 1) L'intensité acoustique I et le niveau d'intensité sonore L

C.22. : L'intensité acoustique I est la grandeur physique traduisant la puissance d'un son. Elle est liée à l'amplitude de la vibration sonore, ainsi qu'à la puissance transmise au récepteur après propagation (l'amplitude d'une onde diminuant au fur et à mesure de sa propagation en raison des phénomènes d'amortissement et d'atténuation). Elle correspond à la puissance sonore reçu par unité de surface du récepteur et s'exprime donc en  $W.m^{-2}$ .

Q.23. : En supposant que le phénomène d'atténuation est le principal responsable de la diminution de l'intensité acoustique, déterminer l'intensité acoustique à  $d = 25m$  d'une source de  $150 W$  de puissance sonore. Justifier.

C.24. : Le seuil d'audibilité d'un son par l'oreille humaine est noté  $I_0$  et vaut :  $I_0 = 10^{-12} W.m^{-2}$ . La douleur correspond à une intensité acoustique dépassant  $1 W.m^{-2}$ . Pour simplifier le domaine de variation, on utilise une échelle logarithmique en introduisant le niveau d'intensité sonore L qui s'exprime en décibel acoustique dBA.

$$L = 10 * \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10 * \log\left(\frac{I}{10^{-12}}\right)$$

Q.25. : Donner le niveau d'intensité sonore d'un récepteur percevant une intensité acoustique de  $10^{-3} W.m^{-2}$ .

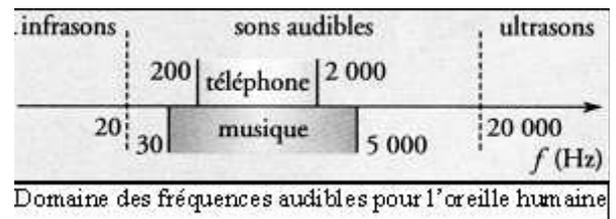
E.26. : Illustrer les définitions suivantes par une mesure, un schéma, une copie d'écran avec légende, etc.... Utiliser un des fichiers suivants disponible sur le réseau sous sons spécialité et instruments numériques :

Piano la3 piano\_fort.wav

Piano La3\_4\_5\_6.wav

Guitare La 3\_2\_1.wav

La3 piano\_clav\_guit.wav



## 2) Hauteur d'un son

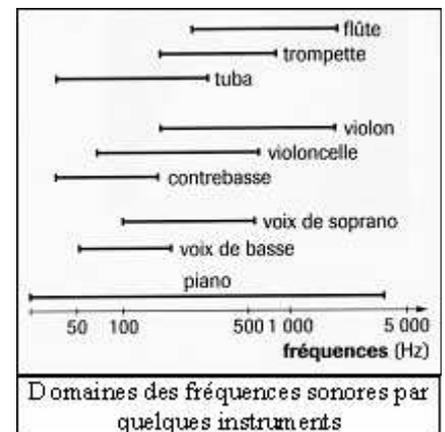
C.27. : L'oreille humaine est sensible aux sons purs dont la fréquence est comprise entre 20 Hz et 20 kHz en moyenne. Les basses fréquences donnent des sons qualifiés de graves, et les hautes fréquences de sons dits aigus. Un son composé est dit plus haut qu'un autre lorsqu'il est perçu plus aigu. Comme le mode fondamental est souvent celui de plus grande amplitude, c'est lui qui fixe la fréquence principale du signal sonore perçu et donc la hauteur du son.

## 3) Enveloppe d'un son

C.28. : L'enveloppe d'un son est la courbe reliant les maxima des amplitudes du son au cours du temps. On distingue 3 phases pour l'enveloppe d'une note :

- le transitoire d'attaque : correspond à la montée en amplitude en début d'émission
- le corps : correspond à une faible variation de l'amplitude
- le transitoire d'extinction : correspond à la diminution de l'amplitude en fin d'émission

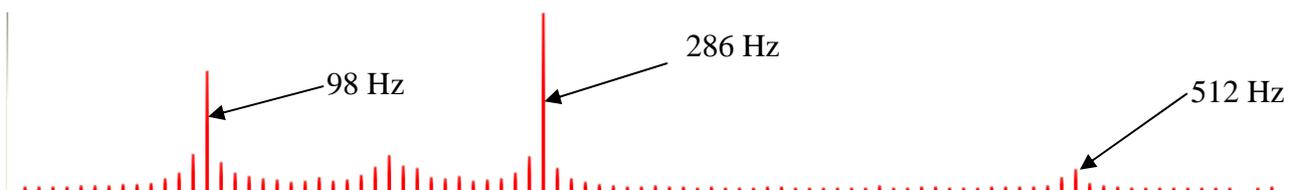
L'attaque et l'extinction sont des transitoires (i.e. des phénomènes très limités dans le temps) mais ils jouent un très grand rôle dans la reconnaissance de l'instrument jouant la note.



## 4) Le timbre d'un son

C.29. : Le timbre (parfois appelé couleur) d'un son est caractéristique de l'instrument de musique et du musicien jouant la note considérée. Des sons de même hauteur émis par deux instruments différents ont un timbre différent qui permet de les distinguer. Il dépend de sa composition en harmoniques. Un son pur n'émet pas d'harmoniques alors qu'un son composé peut en posséder de très nombreuses.

Q.30. : Le timbre d'un instrument est aussi fonction du musicien : par exemple : justifier l'allure de la figure ci-dessous qui représente le spectre de Fourier du son émis par une corde de guitare pincée en son milieu.



## II.- Sonagramme d'un son

E.31. : Le sonagramme d'un signal sonore est une représentation graphique de l'évolution des fréquences au cours du temps. Les nuances de couleurs utilisées permettent de distinguer l'évolution de l'intensité du son au cours du temps. Les sonagrammes permettent de comparer les timbres des signaux sonores. On s'intéresse dans cette partie à l'étude des timbres d'une même note jouée par différents instruments.

E.32. : On utilise pour cela le logiciel **SPECTROGRAM** dont une version de démonstration (valable 10 jours après son installation) est téléchargeable sur le site ou sur <http://www.visualizationsoftware.com/gram.html>. Télécharger et installer ce logiciel.

E.33. : Pour visualiser un sonagramme : ouvrir **SPECTROGRAM** puis choisir **function** et **scan file**.

Sélectionner le fichier : **La3 piano\_clav\_guit.wav** (même note jouée au piano, au clavecin et à la guitare) et dans la fenêtre de contrôle, s'assurer que la durée du fichier sonore (**sample characteristics**) correspond bien à la durée de l'affichage (**scroll display width**).

S.34. : Pour ce fichier, comparer les évolutions au cours du temps des fréquences pour une note jouée au piano, à la guitare et au clavecin. **Recopier** et compléter le tableau suivant :

	<b>Piano</b>	<b>Clavecin</b>	<b>Guitare</b>
Fréquence du fondamental			
Nombre d'harmoniques			
Durée des harmoniques			
Intensité des harmoniques			

S.35. : Représenter les sonagrammes de la clarinette, du violon et du xylophone en utilisant les fichiers appropriés présents sur le réseau :

**Violon Fa3\_La.wav**

**Gamme clarinette.wav**

**Gamme xylophone.wav**

Q.36. : Comparer les sonagrammes de notes jouées au violon, à la clarinette et au xylophone en recopiant et complétant le tableau. Tenter de trouver une explication des différences observées.

	<b>Piano</b>	<b>Clavecin</b>	<b>Guitare</b>
Nombre d'harmoniques			
Durée des harmoniques			
Intensité des harmoniques			

S.37. : A l'aide du fichier **Timbales Ré2.wav**, représenter et commenter le sonagramme des timbales.

### III.- Gamme tempérée

#### 1) Octave

Utiliser **SPECTROGRAM**

E.38. : Comparer les fréquences des fondamentaux des notes des fichiers suivants : **Guitare La 3.wav** et **Flute traversière La4.wav**. Comment appelle-t-on un tel intervalle sonore ?

E.39. : Pour le fichier GammeTrompette Fa3.wav, relever les fréquences  $f_n$  des fondamentaux des 6 notes jouées et calculer le rapport  $f_{n+1}/f_n$ . Conclure en comparant le résultat à  $2^{1/12}$ .

Q.40. : Sachant que la gamme (suite de note comprise dans une octave) tempérée (adoptée pour la musique occidentale depuis 2 siècle) est divisée en 12 intervalles appelée demi-tons. Etablir la valeur du rapport entre les fréquences de deux notes séparées d'un demi-ton. Appliquer ce résultat à l'intervalle d'octave. Conclure.

E.41. : A l'aide de **WAVER** en mode libre, construire quelques intervalles remarquables comme la seconde (1 ton), la tierce (2 tons), la quarte (2 tons et demi) et la quinte (3 tons et demi).

Q.42. : Au Moyen-Âge, seuls les intervalles de tierce, de quinte et d'octave étaient considérés comme religieusement acceptables... Rechercher pourquoi.

#### 2) Consonance

Utiliser **SPECTROGRAM**

E.43. : En utilisant le fichier Piano Fa\_La\_Do.wav, relever les concordances entre les fréquences de certaines harmoniques de ces trois notes. Noter les fréquences et les rangs des harmoniques qui coïncident.

E.44. : Il y a deux tons entre fa et la et 1 ton et demi entre la et do. Quels sont les rapports des fréquences fondamentales entre fa et la, entre la et do et entre fa et do ? Retrouver les consonances précédentes.