Projet signal
ENSC, 2ème année, 2016-2017

1 Introduction

1.1 Objectif

Le traitement du signal permet non seulement de manipuler du son, de la parole et de l'audio, mais aussi :

- ✓ d'analyser des signaux biomédicaux,
- ✓ d'aborder des problématiques dans le secteur de l'aéronautique liées aux signaux sonar et radar, à la localisation et à la navigation GPS, au *tracking* de missiles,
- ✓ d'étudier des systèmes de communications mobiles,
- ✓ de mettre en œuvre des systèmes combinant différents capteurs, *etc*.

Comme la parole et l'audio sont devenus des supports classiques sur le réseau Internet, qu'ils ne nécessitent pas trop d'expertise *a priori*, mais restent complexe à maîtriser, l'objectif de ce projet en traitement du signal est de vous familiariser avec les signaux audio et de mettre en pratique les enseignements fondamentaux de traitement du signal vus en première année et ce premier semestre, notamment le cours de processus aléatoires, de signal continu, de traitement numérique du signal et de synthèse de filtres numériques.

Ce projet est effectué en binôme pendant quatre séances de 3 heures. Le projet sera mené sous *matlab*.

1.2 Evaluation

L'évaluation du travail repose sur un rapport et une note de travail continu.

Le travail peut être mené en binôme. Le rapport d'une dizaine de pages maximum doit être dactylographié (sous *Word* ou *latex*).

Sous *Word*, les équations doivent être générées avec l'éditeur d'équations et numérotées. Les commentaires doivent être pertinents et tout résultat justifié. Les programmes *matlab* peuvent être mis en annexe. Des références bibliographiques peuvent être introduites et seront regroupées dans une section en fin de rapport.

Le rapport devra également comporter un bilan de l'organisation et du déroulement du projet, qui comprendra en particulier la liste des tâches entreprises, avec une évaluation du temps passé par chacun lors de chaque séance et entre les séances.

Des interfaces *matlab* peuvent aussi être mises en œuvre et seront comptées comme un bonus dans l'évaluation. Dans ce cas, l'envoi des codes par mail sera nécessaire. La qualité du code produit et une bonne organisation seront des points pris en compte pour la note de travail continu.

1.3 Contacts

Ce projet est proposé par Léo Legrand leo.legrand@u-bordeaux.fr et Brendan Le Bouill brendan.lebouill@ims-bordeaux.fr et E. Grivel. eric.grivel@enseirb-matmeca.fr.

2 Projet à mener

2.1 Introduction

L'objet du projet est de mettre en place une table de mixage numérique élémentaire. Elle permet de générer des signaux audio, de charger d'autres signaux puis d'appliquer différents traitements.

2.2 Etape 1 : générer un signal, une note puis une composition -séance 1-

✓ mettre en œuvre une fonction sous *matlab* permettant :

- de générer N échantillons d'un signal sinusoïdal d'amplitude unité, échantillonné à la fréquence f_{ech} de fréquence fondamentale f_0.
- de fournir sur une même figure, décomposée en deux zones, l'une au-dessus de l'autre, à l'aide de la fonction *subplot*, la représentation temporelle de N_{rep}<N échantillons du signal et le spectre d'amplitude. Sur une seconde figure, on fournira à titre indicatif le spectre de phase en précisant les intitulés des axes et en donnant un titre à la figure.
- d'écouter le signal à l'aide de la fonction *soundsc.*

  Application numérique : N=11025, N_{rep}=200, f_{ech}=44,1 kHz et f_0=880 Hz (Note A5).

✓ mettre en œuvre une fonction sous *matlab* permettant :

- de générer N échantillons d'un signal périodique, échantillonné à la fréquence f_{ech} présentant un fondamental à la fréquence f_0 et des harmoniques caractérisés par les fréquences $f=h \times f_0$ *avec* $h \leq h_{max}$.

  On supposera que les amplitudes des composantes harmoniques sont les suivantes :

h	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amplitude	1	0.7	0.95	0.75	0.6	0.65	0.65	0.5	0.6
h	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Amplitude	0.5	0.45	0.5	0.6	0.5	0.25	0.5	0.3	0.25
h	20	21	22	23	24	25	26		
Amplitude	0.3	0.4	0.4	0.3	0.25	0.2	0.15		

Tableau n°1 : définition des amplitudes des différentes composantes sinusoïdales harmoniques

- de fournir sur une même figure, décomposée en deux zones l'une au-dessus de l'autre, la représentation temporelle du signal et le spectre d'amplitude. Sur une seconde figure, on fournira à titre indicatif le spectre de phase.
- d'écouter le signal à l'aide de la fonction *soundsc.*

  Application numérique : N=11025, f_{ech}=44,1 kHz et f_0=880 Hz (note A5). On prendra h_{max}=2 (c'est-à-dire la somme d'un fondamental et d'un harmonique), puis h_{max}=3 et enfin h_{max}=25.

Question : est-il utile de regarder le spectrogramme dans ces cas ?

✓ mettre en œuvre une fonction sous *matlab* permettant :

- de composer une mélodie à la fréquence f_{ech} dont la succession des notes est la suivante :

  C4, C4, C4, D4, E4, D4, C4, E4, D4, D4, C4, D4 , D4, D4, D4, A3, B3, D4, C3, B3, A3, G3

  Il est à noter que le silence entre deux notes successives est caractérisé par M=2756 échantillons égaux à 0. La fréquence d'échantillonnage reste inchangée et vaut 44,1 kHz. Dans le rapport, donner la durée des silences.

- de fournir sur une même figure, décomposée en deux zones l'une au-dessus de l'autre, la représentation temporelle du signal et le spectrogramme. L'axe des abscisses pour les deux représentations doit correspondre au temps exprimé en secondes (s).

- d'écouter le signal à l'aide de la fonction *soundsc.*

✓ mettre en œuvre une fonction sous *matlab* permettant :

- de charger un signal audio dont l'extension est ici .mat ; on utilisera successivement les fichiers « mozart », « instru1 », « instru2 », « instru3 », « instru4 », « instru5 » et « instru6 » et la fonction *load*.

- de fournir sur une même figure, décomposée en deux zones l'une au-dessus de l'autre, la représentation temporelle du signal et le spectrogramme.

- d'écouter le signal à l'aide de la fonction *soundsc.*

- d'ajouter au signal « mozart » les composantes « instru1 », « instru2 », « instru3 », « instru4 », « instru5 » et « instru6 » respectivement aux instants suivants :

  On pourra jouer sur l'amplitude des différentes composantes.

2.3 Etape 2 : fading in / fading out -séance 2-

✓ Comment peut-on facilement créer un effet de « fading in » et de « fading out », qui vise à progressivement augmenter la puissance du signal en début de morceau ou à la réduire en fin de morceau ?
Proposer la théorie correspondante ainsi que le code *matlab*.

✓ Représenter le signal résultant de cet effet ainsi que son spectrogramme quand le signal à traiter est la mélodie générée ou le signal audio chargé. Ecouter les signaux et commenter.

2.4 Etape 3 : perturber le signal par un bruit blanc Gaussien ou un bruit tonal

✓ mettre en œuvre un premier traitement visant à bruiter le signal audio avec un bruit additif pour un rapport signal à bruit (RSB) donné.

Deux cas de bruit additif sont traités : d'une part une sinusoïde, c'est-à-dire un bruit coloré de nature tonale et d'autre part un bruit blanc centré. Pour ce dernier cas, on utilisera la fonction *randn*.

Il s'agit de développer une fonction *matlab* dont l'une des entrées permet de choisir le type de bruit. On définira le RSB en fonction des échantillons du signal et du bruit additif. On testera les cas suivants : 5 dB, 10 dB et 15 dB.

- ✓ Pour les deux cas de bruit additif à traiter, fournir sur une même figure, l'un au-dessus de l'autre, la représentation temporelle et le spectrogramme du signal de parole original, puis sur une seconde figure la représentation temporelle et le spectrogramme du signal de parole bruité. Faites en sorte que les axes temporels coïncident pour la représentation temporelle et le spectrogramme. Dans le rapport, commenter l'allure des spectrogrammes.

2.5 Etape 4 : création de versions retardées supplémentaires et atténuées -séance 2 et 3-

- ✓ Pour créer cet effet, justifier pourquoi cela pourrait revenir à mettre en place un filtre dont la fonction de transfert vérifie :

$$H(z) = 1 + \frac{g}{M}\left(z^{-k_0} + ... + z^{-k_0-M+1}\right)$$

où *M* est un entier non nul.
Quand *M*=1, que représenteraient *g* et k_0 ?

- ✓ Que peut-on dire de ce filtre : S'agit-il d'un filtre RIF ou RII ? Est-il causal ? Est-il stable ? Justifier votre réponse dans le rapport. Donner la réponse en fréquence du filtre à l'aide de la fonction *freqz* sous *matlab* quand *M*=1 puis quand *M* augmente et vaut 15. On justifiera les résultats obtenus en s'appuyant sur un raisonnement théorique quand *M*=1. Observez la position des pôles et des zéros dans le plan complexe quand ils existent et faites le lien avec l'allure de la réponse en fréquence du filtre proposé. On cherchera à avoir un retard entre deux versions égal à τ=0,1 ms et on prendra *g*=0,6.

  Augmenter ensuite la valeur de τ en prenant τ=1 ms puis τ=0,05 s et τ=0,5 s. Commenter.

- ✓ Utiliser la fonction *filter* sous *matlab* pour créer cet effet.
- ✓ Représenter le signal résultant de cet effet ainsi que son spectrogramme quand le signal à traiter est la mélodie générée ou le signal audio chargé. Ecouter les signaux et commenter. Jugez-vous le traitement toujours pertinent ?

2.6 Etape 5 : création de versions retardées supplémentaires et atténuées

- ✓ Pour créer cet effet, justifier que l'on opte pour un filtre dont la fonction de transfert vérifie :

$$H(z) = \frac{1}{1 + \frac{g}{M}\left(z^{-k_0} + ... + z^{-k_0-M+1}\right)}$$

où *M* est un entier non nul.
Que représenterait *g* ? Que représenterait k_0 ?

  Que peut-on dire de ce filtre : s'agit-il d'un filtre RIF ou RII ? Est-il causal ? Est-il stable ? Justifier votre réponse dans le rapport. Donner la réponse en fréquence du filtre à l'aide de la fonction *freqz* sous *matlab* quand *M*=1 puis quand *M* augmente et vaut 15. On justifiera le résultat en s'appuyant sur un raisonnement théorique dans le cas où *M*=1. Quelle est l'influence de *M* et de k_0 ?

- ✓ Utiliser la fonction *filter* sous *matlab* pour créer cet effet.
- ✓ Représenter le signal résultant de cet effet ainsi que son spectrogramme quand le signal à traiter est la mélodie générée ou le signal audio chargé. Ecouter les signaux et commenter.

2.7 Etape 6 : égaliseur fondé sur un banc de filtres -4ème séance-

On se propose ici de réaliser un égaliseur fondé sur un banc de filtres en considérant les bandes de fréquences suivantes :

N° de bande	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Limites basse et haute (en Hz)	0 à 100 Hz	100 à 200 Hz	200 à 300 Hz	300 à 400 Hz	400 à 510 Hz	510 à 630 Hz	630 à 770 Hz	770 à 920 Hz	920 à 1080 Hz
N° de bande	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Limites basse et haute (en Hz)	1080 à 1270 Hz	1270 à 1480 Hz	1480 à 1720 Hz	1720 à 2000 Hz	2000 à 2320 Hz	2320 à 2700 Hz	2700 à 3150 Hz	3150 à 3700 Hz	3700 à 4400 Hz
N° de bande	19	20	21	22	23	24	25		
Limites basse et haute (en Hz)	4400 à 5300 Hz	5300 à 6400 Hz	6400 à 7700 Hz	7700 à 9500 Hz	9500 à 12000 Hz	12000 à 15500 Hz	Au-delà de 15500 Hz		

Tableau n°2 : définition des bandes dites critiques

- ✓ Qu'est-ce qu'une bande critique en psychoacoustique ?
- ✓ Synthétiser un filtre passe-bande à l'aide de la méthode de la fenêtre ; on notera les limites basse et haute de la bande passante f_{cb} et f_{ch}. Déterminer l'expression théorique de la réponse impulsionnelle pour un gain $0<G\leq1$ dans la bande passante.
- ✓ Ecrire une fonction *matlab* dédiée à ce type de synthèse de filtre et analyser l'influence de la longueur de la fenêtre sur la réponse en fréquence du filtre, notamment à l'aide de la fonction *freqz*.
- ✓ Ecrire une fonction permettant de créer un banc de filtres correspondant aux bandes critiques décrites dans le tableau n°2 pour des gains possiblement différents dans chaque bande de fréquence et permettant de fournir un signal de sortie.

2.8 Etape 7 : égaliseur fondé sur la transformée de Fourier

On se propose ici de réaliser un égaliseur fondé sur la transformée de Fourier discrète du signal ; chaque composante est alors multiplié par un gain. On utilise la transformée de Fourier inverse.

2.9 *Etape 8 : analyse d'un code existant -5ème séance-*

4 fonctions développées sous *matlab* sont proposées par votre encadrant de projet. À partir du code *matlab*, déduire les traitements effectués en présentant des schémas synaptiques, des équations aux différences, etc. Commenter.

2.10 *Etape 9 : génération d'une version remixée de la flute enchantée de Mozart*

En exploitant l'ensemble des fonctions proposées, réaliser un mixage du signal « mozart ».

2.11 *Bonus : création d'une interface sous matlab*

Annexe 1 : rappel sur synthèse d'un filtre RIF par la méthode de la fenêtre : exemple d'un filtre de type passe-bas

Soit un filtre numérique idéal à synthétiser dont la réponse en fréquence est donnée à la figure 1. Le filtre est de type passe-bas et de fréquence de coupure f_c :

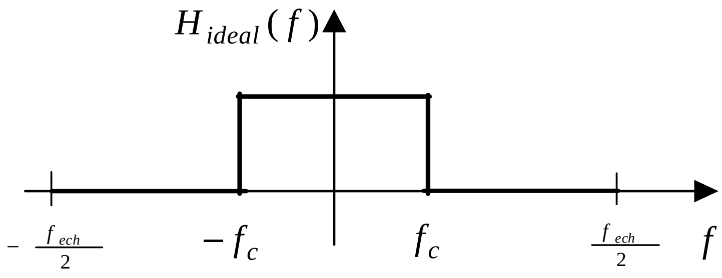

Figure 1 Réponse en fréquence d'un filtre passe-bas idéal

Le filtre étant numérique, cette réponse est périodique et reproduite tous les f_{ech}.

Soit $H_{ideal,continu}(f)=\begin{cases}1 & |f|\le f_c\\ 0 & \text{ailleurs}\end{cases}$, le filtre numérique idéal satisfait :

$$H_{ideal}(f)=H_{ideal,continu}(f)*\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\delta\left(f-kf_{ech}\right). \qquad [1]$$

A partir de la transformée de Fourier inverse de la relation [1], on peut associer à ce gabarit, la réponse impulsionnelle suivante :

$$\begin{aligned}h_{ideal}(t)&=TF^{-1}\left(H_{ideal,continu}(f)\right)\times TF^{-1}\left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\delta\left(f-kf_{ech}\right)\right)\\&=\int_{-\infty}^{+\infty}H_{ideal}(f)\exp(j2\pi ft)df\times\frac{1}{f_{ech}}\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\delta\left(t-kT_{ech}\right)\\&=\frac{1}{f_{ech}}\int_{-f_c}^{f_c}\exp(j2\pi ft)df\times\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\delta\left(t-\frac{k}{f_{ech}}\right)\\&=\frac{1}{f_{ech}}\frac{\sin\left(2\pi f_c t\right)}{\pi t}\times\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\delta\left(t-\frac{k}{f_{ech}}\right)\end{aligned} \qquad [2]$$

La relation [2] aboutit aux valeurs suivantes de la réponse impulsionnelle discrète, pour tout $k\neq 0$:

$$h_{ideal}(k)=2\frac{f_c}{f_{ech}}\frac{\sin(2\pi k\frac{f_c}{f_{ech}})}{2\pi k\frac{f_c}{f_{ech}}}. \qquad [3]$$

La réponse impulsionnelle d'un filtre passe-bas idéal vaut par ailleurs en k=0 :

$$h_{ideal}(0) = 2\frac{f_c}{f_{ech}}. \quad [4]$$

Une telle réponse impulsionnelle est cependant de longueur infinie et non causale. Du fait de la décroissance relativement rapide de la réponse impulsionnelle idéale $h_{ideal}(k)$, on peut approximer le filtre en opérant en deux étapes comme suit :

1. en fenêtrant la réponse impulsionnelle, c'est-à-dire en multipliant la réponse impulsionnelle idéale $h_{ideal}(k)$ par une fenêtre d'apodisation $w(k)$ centrée en 0. Ce choix fait que $h(k)$ devient une version tronquée de la réponse impulsionnelle idéale notée $h_{fen}(k)$:

   $$h_{fen}(k) = h_{idéal}(k)w(k) \quad [5]$$

2. en effectuant un décalage temporel de la réponse impulsionnelle de façon à rendre le filtre causal ; en effet, en introduisant un tel décalage, on ne change pas le gabarit du filtre en amplitude, mais on modifie la phase. Ainsi, si l'on considère une réponse impulsionnelle de longueur impaire N=2L+1, la réponse impulsionnelle s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} h_{pb}(k) = 2\frac{f_c}{f_{ech}} \dfrac{\sin(2\pi(k-L)\frac{f_c}{f_{ech}})}{2\pi(k-L)\frac{f_c}{f_{ech}}} w(k-L) \text{ si } 0 \le k \le 2L \text{ et } k \ne L \\ h_{pb}(L) = 2\frac{f_c}{f_{ech}} \\ h_{pb}(k) = 0 \text{ sinon} \end{cases} \quad [6]$$

Annexe 2 : Fréquences des notes A0 à C8

Note	A0	A0#	B0	C1	C1#	D1	E1	F1	F1#
Fréquence fondamentale (Hz)	27.500	29.135	30.868	32.703	34.648	36.708	41.203	43.654	46.248
Note	G1	G1#	A1	A1#	B1	C2	C2#	D2	D2#
Fréquence fondamentale (Hz)	48.999	51.913	55.000	58.270	61.735	65.406	69.296	73.416	77.782
Note	E2	F2	F2#	G2	G2#	A2	A2#	B2	C3
Fréquence fondamentale (Hz)	82.407	87.307	92.499	97.999	103.83	110.00	116.54	123.47	130.8
Note	C3#	D3	D3#	E3	F3	F3#	G3	G3#	A3
Fréquence fondamentale (Hz)	138.59	146.83	155.56	164.81	174.61	185.00	196.00	207.65	220.00
Note	A3#	B3	C4	C4#	D4	D4#	E4	F4	F4#
Fréquence fondamentale (Hz)	233.08	246.94	261.63	277.18	293.66	311.13	329.63	349.23	369.99
Note	G4	G4#	A4	A4#	B4	C5	C5#	D5	D5#
Fréquence fondamentale (Hz)	392.00	415.30	440.00	466.16	493.88	523.25	554.37	587.33	622.25
Note	E5	F5	F5#	G5	G5#	A5	A5#	B5	C6
Fréquence fondamentale (Hz)	659.25	698.46	739.99	783.99	830.61	880.00	932.33	987.77	1046.5
Note	C6#	E6	F6	F6#	G6	G6#	A6	A6#	B6
Fréquence fondamentale (Hz)	1244.5	1318.5	1396.9	1480.0	1568.0	1661.2	1760.0	1864.7	1979.5
Note	C7	C7#	D7	D7#	E7	F7	F7#	G7	G7#
Fréquence fondamentale (Hz)	2093.0	2217.5	2349.3	2489.0	2637.0	2793.8	2960.0	3136.0	3322.4
Note	A7	A7#	B7	C8					
Fréquence fondamentale (Hz)	3520.0	3729.3	3951.1	4186.0					