TP 1 de traitement des signaux
Analyse de Fourier

1. Représentation spectrale

a) Ecrire une fonction calculant le spectre, en utilisant le module (abs) de la transformée de Fourier rapide (FFT). Affichez le spectre d'une sinusoïde de fréquence 121 Hz, échantillonnée à 8KHz et de durée 0.25 seconde.
Veillez à ce que les abscisses soient en Hz.
Quelle est la précision en fréquence (pas entre chaque point sur l'axe des fréquences) ?

b) Complétez la fonction en permettant de prolonger le signal par des zéros. Affichez le spectre. Que constatez-vous ?
Quelle est la précision en fréquence ?

Rq : La fonction fft permet d'étendre directement le signal par des zéros en écrivant

Y=fft (y, N) avec N supérieur à la longueur du signal. Prenez de préférence une puissance de deux par exemple 2^{14}

c) Améliorer la fonction en multipliant le signal par une fenêtre de Hamming avant l'extension par des zéros.
A quoi correspond ce produit dans le domaine fréquentiel ?
Affichez le spectre.

d) Tracez le spectre du signal suivant $y = \sin(2\pi.121.t) + 0.1 \sin(2\pi.134.t)$ avec et sans fenêtre de Hamming.
Comparez les effets de la fenêtre de Hamming à la fenêtre rectangulaire

2. Repliement spectral

a) Générer signal sinusoïdal de fréquence 220Hz échantillonné à 8000Hz et de durée 2 seconde. Ecouter le signal (fonction soundsc) et tracer le spectre à l'aide de la fonction précédemment écrite. Qu'observez-vous?

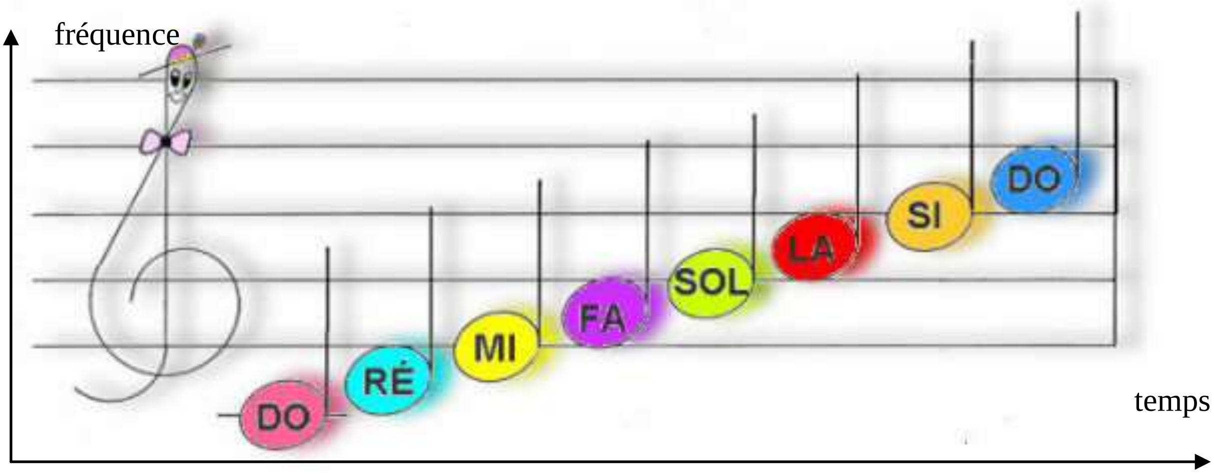
b) Générer ensuite la même note échantillonnée à 400Hz. Ecouter le signal. Qu'entendez vous? Est ce différent ? Pourquoi? Justifier.

3. Spectrogramme

Introduction

Le solfège permet une représentation temps/fréquence de la musique. Cette représentation est assez proche du spectrogramme d'un signal.

Gamme de Do majeur



Travail demandé

a) Sachant que les notes do re mi fa sol la si do correspondent aux fréquences suivantes 130.81 ; 146.83 ; 164.81 ; 174.61 ; 195.99 ; 220 ; 246.94 ; 261.62 , créez à l'aide de sinusoïdes échantillonnées à 8 KHz un signal correspondant aux notes de la gamme de do majeur , la durée de chaque note étant d'une demi-seconde.

b) A l'aide de la fonction spectrogram (utilisée comme ci-dessous), affichez le spectrogramme de ce signal et comparez le à la portée ci-dessus.

spectrogram(x, WINDOW, NOVERLAP, NFFT, Fs,)

NFFT=2^{14}
WINDOW=2^{10}
NOVERLAP= WINDOW/2

Expliquez brièvement le fonctionnement de la fonction spectrogram (cf help)

D Musique

mi=164.81
fa=174.61;
fa_diese=184.61;
la=220;
si=246.94;
frq_chanson=[mi mi fa fa_diese la fa_diese la fa_diese fa_diese fa mi si mi mi];
dure_note=[1/2 1/2 1/2 1 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1/2 1] /2;

a) A l'aide de sinusoïdes, créez un signal reproduisant la mélodie ci-dessus. Ecoutez à l'aide de la fonction sound.
b) Rajouter des composantes fréquentielles à des demi-multiples de la note. Par exemple ½, 3/2 et 4/2.
   Faites varier la brillance du signal en assignant différentes amplitudes à ces nouvelles composantes.
c) Ajoutez également à chaque note une enveloppe temporelle du type exp(-2*t) .
d) Passez la mélodie dans « l'amplificateur » du A-e) . Ecoutez

TP 2 de traitement numérique du signal
Filtrage numérique

Objectif de ce TP

L'objectif est de se familiariser avec les outils de filtrage disponibles dans Matlab. On applique la théorie du filtrage sur des exemples que sont la réduction de bande où le filtrage de parole bruitée.

Filtrage de bande

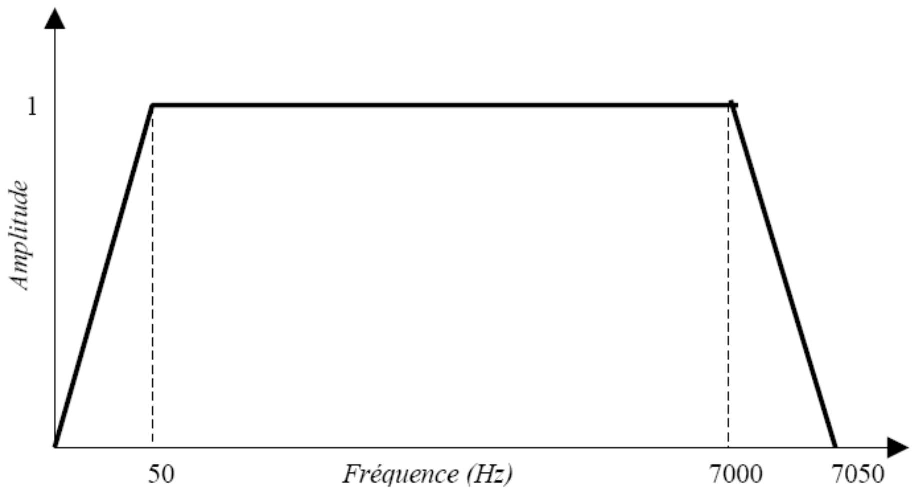
Introduction

L'objectif de cet exercice est de mettre en évidence l'effet de la bande de fréquence utilisée sur l'audibilité d'un signal sonore. On utilisera la méthode de synthèse de filtres FIR optimaux de Parks-McClellan.

Travail demandé

On vous demande d'illustrer l'influence de la largeur de bande de fréquence sur un signal sonore de parole échantillonné à 16kHz (avec donc 8kHz de bande passante). On propose d'écouter la différence entre la bande de fréquence du téléphone (300-3400 Hz) et un signal de bande AM (50-7000Hz). Pour ce faire, on vous demande de filtrer le signal dans la bande AM et ensuite dans la bande téléphone.

On propose d'utiliser des filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR) à l'aide de la fonction *firpm* (*remez* dans les anciennes versions de Matlab). Cette fonction réalise des filtres optimaux à l'aide de l'algorithme de Parks-McClellan. Afin d'obtenir les paramètres, on vous demande d'utiliser d'abord la fonction *firpmord* (*remezord* dans les anciennes versions de Matlab) qui donne les paramètres pour une certaine spécification du filtres (ordre du filtre, plage de fréquence, amplitude). Afin de bien comprendre ces fonctions utilisez la fonction *help firpmord/firpm*.
On demande de prendre des déviations de 0.05 dans la bande passante et 0.1 dans la bande d'arrêt. On demande de réaliser les filtres passe bande 300Hz – 3400Hz et 50Hz – 7050 Hz , avec une bande de transition symétrique de 50Hz (voir schéma). Observez l'ordre de ce dernier.
Réalisez maintenant un filtre passe bas 0-7000 Hz (avec une bande de transition de 50 Hz puis de 100Hz). Est ce vraiment très différent du point de vue du signal entendu ? Comparez les ordres ? Justifiez la différence.



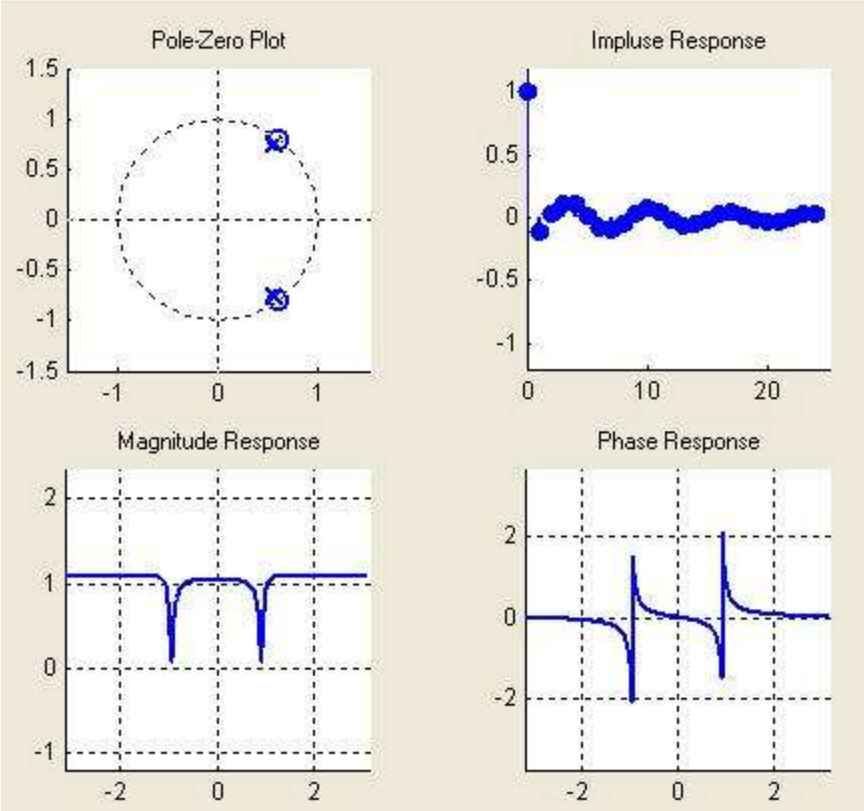
Filtrage de bruit – réjecteur de fréquence (notch)

Introduction

Lorsqu'on dispose d'un signal par exemple sonore, il se peut qu'un bruit caractéristique à une fréquence précise vienne perturber le signal original. Il est donc nécessaire de dimensionner un filtre qui supprime la/les quelques fréquences parasites. Il faut donc un filtre qui laisse passer tout le spectre excepté certaines fréquences. Ce type de filtre s'appelle un notch et est défini par la fonction de transfert suivante :

$$H(z) = \frac{(z - e^{j\omega_1})(z - e^{-j\omega_1})}{(z - re^{j\omega_1})(z - re^{-j\omega_1})}$$

où ω_1 est la pulsation correspondant à la fréquence qu'on veut rejeter.
Il est à noter que le notch sera d'autant plus précis que les pôles et zéros respectifs seront proches comme représenté sur la figure suivante :



Travail demandé

a) Comprendre le fonctionnement du filtre réjecteur de fréquence.

On fournit dans le répertoire de travail un fichier contenant un son (load mtlb).

b) Ecouter le signal et afficher le spectre
c) Créer et ajouter au signal les deux bruits sinusoïdaux suivants

- Un bruit d'amplitude 1 et de fréquence 3000 Hz
- Un bruit d'amplitude 0.8 et de fréquence 3100 Hz

d) Afficher le spectre et observer la différence suite à l'ajout du bruit
e) Réaliser le filtre notch qui va rejeter les deux fréquences parasites (3000 et 3100 Hz)
f) Observer la réponse en fréquence du filtre et vérifier le bon dimensionnement
g) Tracer le plan z et vérifier que le filtre est stable (tracer la réponse impulsionnelle pour vérifier)
h) Filtrer et écouter le signal. Qu'observez-vous ?

i) Observer la réponse en fréquence du filtre
j) Tracer le plan z. Que concluez-vous au niveau de la stabilité (tracer la réponse impulsionnelle).

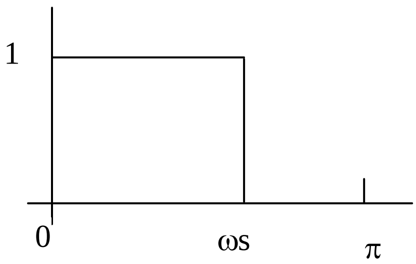
TP 3: Filtres à réponse impulsionnelle infinie

A-Rappel sur les filtres numériques

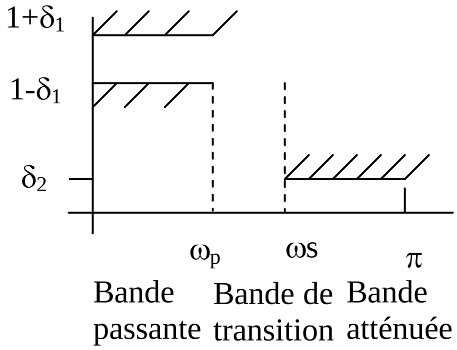
Un filtre numérique est un système linéaire invariant fonctionnant en temps discret et réalisé en utilisant une précision arithmétique finie. La conception (synthèse) des filtres numérique se fait en trois étapes:

1) La spécification des propriétés désirées du système.
2) L'approximation de ces spécifications en utilisant un système discret causal.
3) La réalisation du système en utilisant une précision arithmétique finie.

Dans le cas d'un filtre passe bas par exemple, les spécifications sont données sous la



Filtre passe bas idéal



Limites des tolérances pour l'approximation d'un filtre passe bas idéal

On distingue une bande passante où l'amplitude de la réponse en fréquence est approximée par 1 à une tolérance de $\pm\delta_1$:

$$1-\delta_1 < \left|H(e^{j\omega})\right| < 1+\delta_1 \qquad |\omega| \le \omega_p$$

Une bande atténuée ou bande d'arrêt où l'amplitude de la réponse en fréquence est approximée par 0 à une de tolérance inférieure à δ_2:

$$\left|H(e^{j\omega})\right| \le \delta_2 \qquad \omega_s \le |\omega| \le \pi$$

Dans le cas des systèmes à réponse impulsionnelle infinie (RII) (Infinite impulse response: IIR), on doit approximer la réponse en fréquence désirée par une fonction rationnelle alors que dans le cas des filtres à réponse impulsionnelle (RIF) (Finite impulse response: FIR), la réponse en fréquence désirée est approximée par une fonction polynomiale.

Système RII

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{b=0}^{M} b_k z^{-k}}{\sum_{k=0}^{N} a_k z^{-k}}$$

$$y(n) = -\sum_{k=1}^{N} a_k y(n-k) + \sum_{k=0}^{M} b_k x(n-k) \qquad M\neq 0 \;\; N\neq 0$$

Une approche de synthèse des filtres numériques consiste à transformer un filtre analogique en un filtre numérique qui répond aux spécifications désirées. Les filtres analogiques de Buterworth, de Chebyshev et elliptiques sont des filtres types utilisés.

Une approche permettant le passage d'une fonction de transfert analogique à une fonction de transfert numérique est la transformation bilinéaire définie par :

$$p = \frac{2}{T}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$$

B-travail demandé

1) Synthétiser un filtre numérique passe bas de type Butterworth en utilisant la transformation bilinéaire. Les spécifications du filtre sont les suivantes:

-Fréquence d'échantillonnage **10000** Hz
-Bande passante de **0** à **1000** Hz : atténuation de moins de 1 dB
-Bande d'arrêt de 1500 Hz à 5000 Hz supérieure à 15 dB

a) Tracer la réponse en fréquence du filtre
b) Tracer le plan z.
c) Représenter la réponse impulsionnelle.
d) Filtrer le signal audio et écouter le signal de sortie.

2) Utiliser la fonction Matlab *butter* pour calculer un filtre de Butterworth de même ordre que 1 et de même bande passante.
Tracer la réponse en fréquence et comparer avec celle de 1).

3) a) Utiliser l'interface sptool (fonction Matlab *sptool*) pour synthétiser un filtre de Butterworth de mêmes caractéristiques que le filtre 1). Représenter sa réponse en fréquence et sa réponse impulsionnelle.

4) Utiliser l'interface sptool pour calculer des filtres de chebyshev et elliptiques de type passe bas de mêmes caractéristiques que le filtre 1).

TP 4

Application du filtrage numérique à l'annulation d'écho et à la déréverbération

A. Annulation d'écho

Introduction

Grâce à la fonction d'auto-corrélation, il est possible d'étudier la similitude entre deux signaux. En effet, la fonction d'auto-corrélation est définie par

$$R_x = \frac{1}{N}\sum_{k=-\infty}^{+\infty} x(k).x(k+n)$$

Si maintenant on considère un signal avec écho. On obtient un signal de la forme :

$$y(n) = x(n) + \alpha.x(n-N)$$

où α est l'atténuation du signal écho et N est le décalage en échantillons. On va donc essayer d'estimer le délai N. On ne s'intéresse pas à α dans notre cas. On considère un signal causal.

Si on calcule la fonction d'auto-corrélation sur un signal avec écho, on peut montrer facilement que l'on observe un pic en 0 (évident) mais aussi 2 pics aux valeurs N et –N. Par exemple, dans le cas suivant, avec α=0.8 et N=1000, on observe bien un pic en 0, 1000 et –1000.

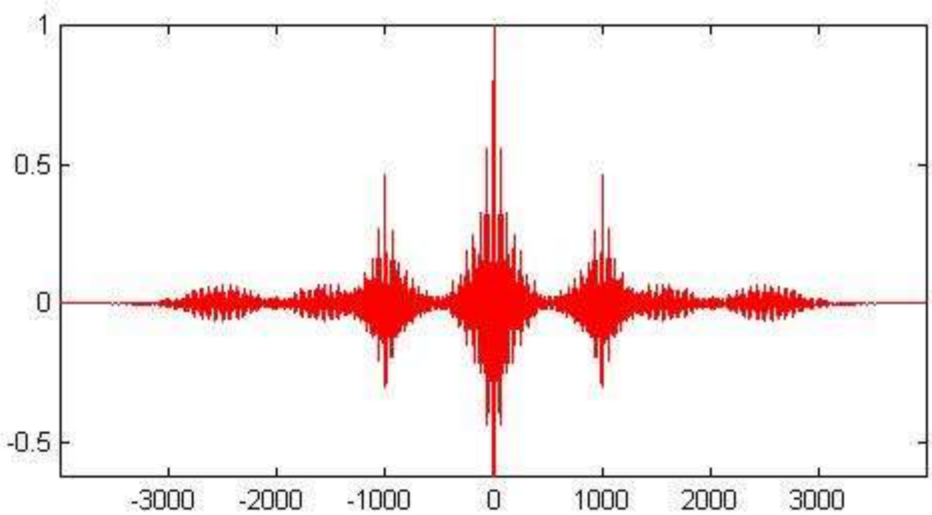


Figure 1 : Fonction d'auto-corrélation d'un signal avec écho

En traçant la fonction d'auto-corrélation, on peut trouver le délai en nombre d'échantillons N.

Il existe deux méthodes pour résoudre ce problème :

1°) On peut souhaiter regarder l’évolution du signal de manière temporelle et le modifier (connaissant le mécanisme d’écho et α) pour obtenir le signal restauré. (se baser sur l’équation aux différences finies).
2°) On peut également évaluer la fonction de transfert du système qui transforme le signal normal en signal écho et effectuer l’opération inverse (en utilisant la fonction « filter »). Vous devez alors écrire la transformée en z et prendre l’inverse. Puis vous devez effectuer le filtrage.

Travail demandé

Vous trouverez dans le répertoire de travail un fichier son (echo.wav). Ce fichier contient un écho dont le coefficient d’atténuαon eest 0.6. On demande d’effectuer l’annulation d’écho par les deux méthodes expliquées dans l’introduction. On vérifiera l’exactitude par une simple audition du résultat.

Pour évaluer le délai par la méthode de la fonction d’auto-corrélation, on propose d’utiliser la fonction d’auto-corrélation donnée dans matlab par la fonction xcorr. Vous devez spécifier les abscisses.

B. Réverbération

Introduction

La transmission de la parole ou du chant est soumise à l’effet de l’environnement qui nous entoure. La réverbération est ainsi un phénomène très important. Le son que nous émettons est soumis aux délais dus aux réflexions dans toutes les directions.

Cet effet de réverbération modifie la façon dont nous percevons le son. Si l’effet d’écho est généralement qualifié d’effet dérangeant, la réverbération quant à elle donne un effet « d’ambiance » fort apprécié par le monde de la musique. Ainsi certaines salles de spectacle sont reconnues pour l’acoustique, et donc notamment la réverbération, qu’offre l’endroit. De même, les artistes qui enregistrent des chansons vont travailler dans des environnements sans réverbération. L’effet est ensuite ajouté en post-traitement. C’est cette étape que nous proposons de réaliser.

Afin de caractériser une salle, on pourrait en mesurer la réponse impulsionnelle et ensuite effectuer la convolution avec le signal qu’on veut traiter. Une réponse impulsionnelle typique est donnée à la figure 1. Malheureusement cette méthode est difficilement applicable à cause de la complexité du calcul.

Une autre solution consiste à créer une structure qui reproduit la réponse impulsionnelle typique. Il faut noter que la réponse impulsionnelle comporte deux parties. Tout d’abord, les réverbérations courtes, c’est-à-dire les échos directs à très court terme. Ensuite, on a les réverbérations tardives en forme d’exponentielle décroissante.

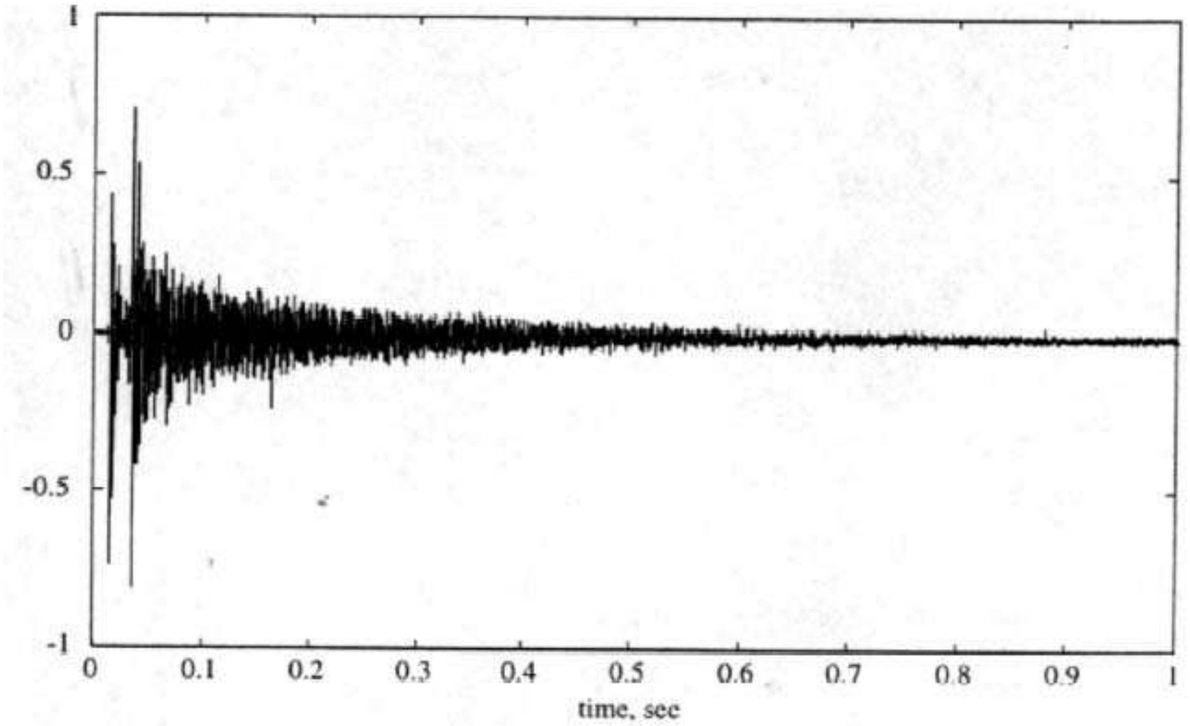


Figure 2: Réponse impulsionnelle en réverbération

Travail demandé

• On demande de réaliser une fonction retournant les vecteurs a,b (attention au sens matlab) correspondant à la fonction de transfert suivante compte tenu des paramètres N et g

$$H_1(z)_N^g = \frac{g + z^{-N}}{1 + g.z^{-N}}$$

a) Tracer la réponse en fréquence de ce filtre (prenons par exemple g=0.7 et N=6). Que remarquez-vous ? Comment appelle-t-on ce type de filtre ? Tracer le plan z. Montrer le lien entre le plan Z et la réponse en fréquence. Observez la phase.

b) Tracer la réponse impulsionnelle. Quelle est la différence par rapport à la réponse impulsionnelle d'un simple délai. A quoi sert ce filtre dans le cadre de la réverbération

c) Si on écrit l'équation aux différences, quelle est la différence par rapport à un simple écho ?

d) Ecouter la sortie du filtre quand on applique un signal de parole à l'entrée (avec g=0.7 et N=1050). Qu'entend-on ? Expliquer le rôle de la phase.

• On demande de réaliser une fonction retournant les vecteurs a,b (attention au sens matlab) correspondant à la fonction de transfert suivante compte tenu des paramètres N et g (prenons par exemple g=0.7 et N=6).

$$H_2(z)_N^g = g + z^{-N}$$

même question qu'au point précédent (a et b). Comparer avec la phase du H_1