

Signaux et Systèmes Linéaires

TP No. 3 : Analyse spectrale de signaux enregistrés et filtrage

Noms, Prénoms : Ortiz Emma, François-Charlot Axel

Groupe : C

Date : 27/11/2020

Préparation à fournir avec le compte-rendu

Rédiger les réponses aux questions suivantes et lire attentivement l'énoncé qui suit :

- Qu'appelle-t-on densité spectrale d'énergie d'un signal d'énergie finie ? Comment la calcule-t-on ?

On appelle densité spectrale d'énergie finie et on la notera $\Gamma_s(f)$ la quantité suivante :

$$\Gamma_s(f) = |S(f)|^2$$

Elle mesure l'énergie $\Gamma_s(f)df$ relative aux composantes harmoniques de s et contenues dans l'intervalle $[f, f+df]$.

- Comment nomme-t-on la principale caractéristique temporelle attachée à un filtre linéaire ?

La principale caractéristique temporelle attachée à un filtre linéaire est le temps de réponse du filtre (réponse indicielle)

- A quelle excitation du filtre cette caractéristique correspond-elle ?

Elle correspond à une excitation de type Heaviside

- Quel est son lien avec le gain complexe (ou réponse en fréquence) ?

$$\mathcal{L}[e^{-i2\pi ft}] = H(f) e^{i2\pi ft}$$

- Qu'appelle-t-on « bande à -3 dB » d'un filtre ? Quelle est la valeur (en linéaire) du gain complexe aux limites de la bande à -3 dB si le gain vaut 1 dans la bande passante ?

On appelle « bande à -3 dB » d'un filtre l'ensemble des fréquences qui ne sont pas supprimées par le filtre.

Consignes :

- Le répertoire de travail sera exclusivement sur le compte d'un des membres du binôme (changer le répertoire courant de Matlab®). Mais pour certains traitements, on fera appel à des fonctions pré-programmées. Les fonctions utiles sont accessibles sur CPe-campus dans le cours Signaux et Systèmes Linéaires, rubrique Travaux Pratiques. Récupérer les fichiers .m, les signaux de sons isolés et la phrase attribuée par l'intervenant en début de séance.
- Au fil du TP, regrouper dans un fichier annexe (type Word ou Libre Office) les codes Matlab® développés ainsi que les Figures obtenues. Veiller à associer systématiquement une légende explicite à chaque Figure ou Tableau.

L'évaluation portera sur la réalisation mais surtout sur la **qualité des commentaires et des justifications des résultats obtenus**. Il convient donc de rédiger un compte-rendu. Il sera tenu compte de la qualité de la programmation. Une attention particulière sera portée à la pertinence des coordonnées et titres portés sur les courbes. La présentation, la qualité du français et de l'orthographe seront notées.

Le compte rendu sera à rendre la semaine suivante sur CPe-campus.

Enoncé

Dans ce TP on réalisera l'analyse spectrale de signaux de parole qui sont fournis et disponibles sur CPe-campus puis on étudiera le filtrage de ces signaux dans différentes bandes spectrales.

1 Analyse spectrale de signaux de base

On dispose de l'enregistrement de deux « phonèmes » de la langue française, une voyelle et une consonne dans des fichiers nommés **aaa.wav** et **chhh.wav**.

Les fréquences d'échantillonnage de ces signaux sont différentes. On veillera dans les scripts à laisser cette fréquence dans une variable.

1.1 Outils de lecture des fichiers et d'écoute des signaux sous Matlab

Tous les signaux sont accessibles en téléchargeant le fichier sur CPe-campus et en le plaçant dans le répertoire de travail puis en utilisant la syntaxe :

[x,Fe]= audioread('nomfichier.wav') ; % permet de lire les valeurs du signal stockées dans le fichier audio .wav

Variables de sortie :

- **x** données lues : valeurs du signal,
- **Fe** fréquence d'échantillonnage en Hz.

sound(x,Fe) permet d'écouter le signal rejoué à la fréquence Fe. On peut aussi utiliser **soundsc** (même syntaxe).

1.2 Analyse spectrale des signaux de base

Pour la voyelle et la consonne :

- tracer le signal en fonction du temps (fonction **plot**).
- Calculer la transformée de Fourier de ce signal avec la fonction **TransFourier.m**.
- Calculer et afficher la densité spectrale d'énergie du signal.

Compte-rendu : Fournir scripts et figures. Noter les caractéristiques des spectres (fréquence maximum, forme du spectre, fréquence des raies, etc...).

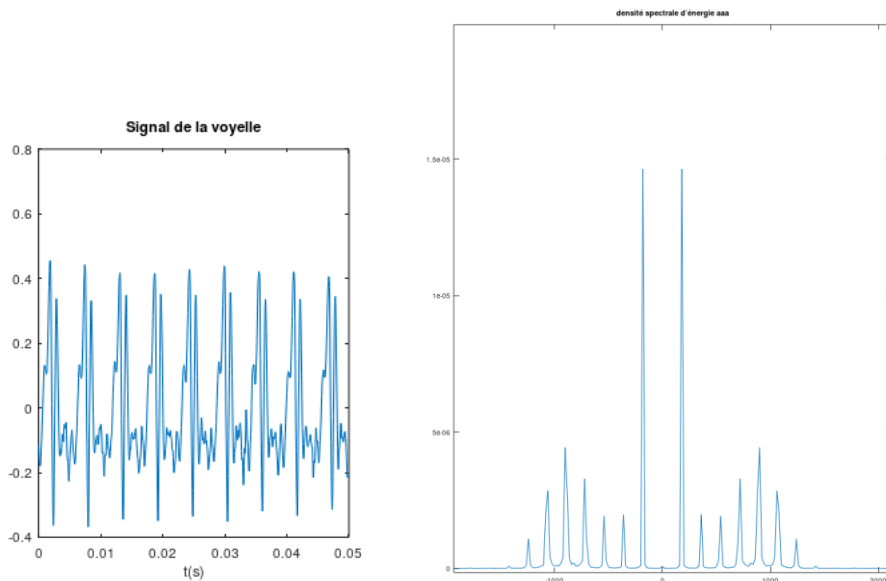
```
[xa,Fea]= audioread('aaa.wav');
L = length(xa);
t1 = (0:L-1)/Fea;
subplot(1,2,1)
plot(t1,xa)
```

```

xlabel('t(s)')
title('Signal de la voyelle')

[Transaaa,faaa] = TransFourier(xa,t1);
subplot(1,2,2)
plot(faaa,abs(Transaaa).^2)
xlabel('f')
ylabel('|S(f)|^2')
title('Densité spectral d' énergie du signal')

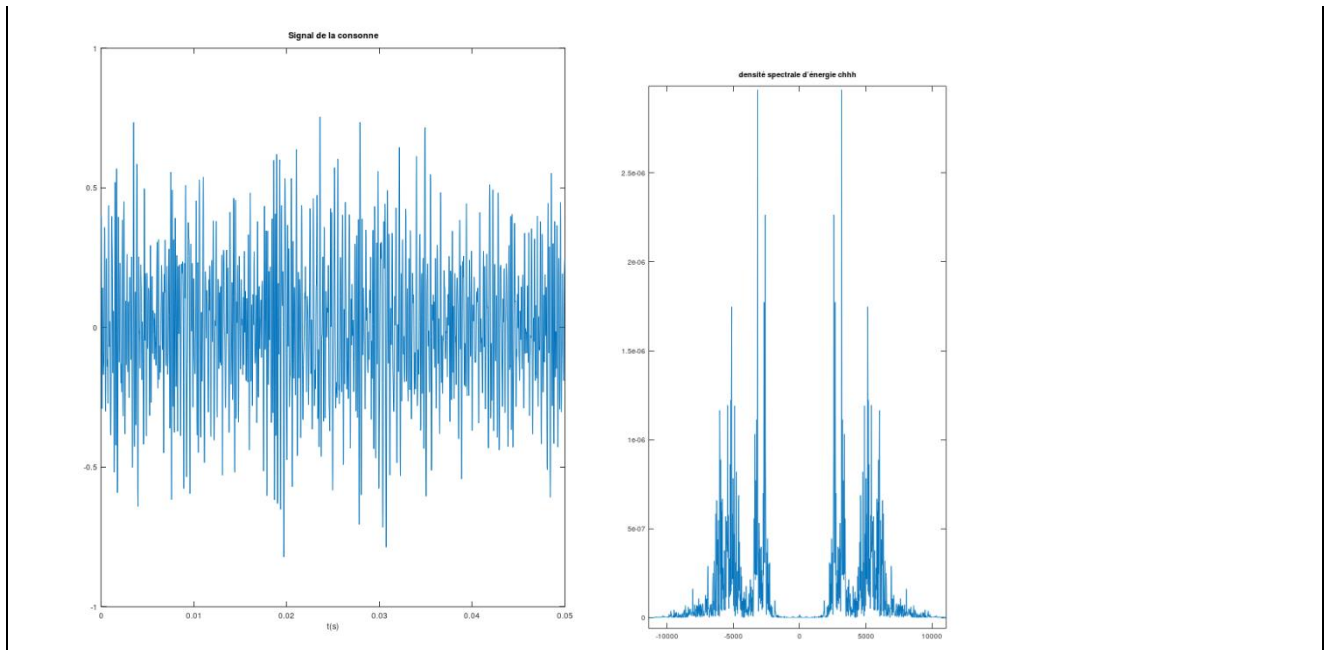
```



```

[xch,Fech]= audioread('chhh.wav');
L = length(xch);
t2 = (0:L-1)/Fech;
subplot(1,2,1)
plot(t2,xch)
xlabel('t(s)')
title('Signal de la consonne')
[Transchhh,fchhh] = TransFourier(xch,t2);
subplot(1,2,2)
plot(fchhh,abs(Transchhh).^2)
xlabel('f')
ylabel('|S(f)|^2')
title('Densité spectrale d' énergie du signal')

```



Quelles sont les différences majeures entre les signaux et les spectres de cette voyelle et de cette consonne ?

Le signal de la consonne semble être beaucoup plus « bruité » que celui de la voyelle. La voyelle est un signal périodique dont on distingue clairement les périodes, alors que la consonne ne l'est pas du tout.

Finalement, on peut mesurer que le fondamental de l'onde de la voyelle aaa est à 180Hz. Ses harmoniques sont eux à des fréquences multiples de 180 (360Hz, 540Hz, 750Hz...). Il s'agit donc bien d'une onde pseudo périodique décrite par une série de Fourier. Cette analyse est cependant inapplicable à la consonne car le signal n'est pas périodique.

Interprétation biologique :

Dans notre langage, les voyelles sont produites par les cordes vocales dans notre gorge. Si on considère les cordes vocales comme de simples cordes soumises à une excitation et que l'on effectue une résolution numérique grâce aux ondes de d'Alembert (comme vu en SPE), on obtient une équation différentielle dont les solutions sont des (quasi-) OPPH. C'est pour cela que la voyelle est une onde périodique.

En revanche, les consonnes sont produites par la langue, les dents et l'écho dans la gorge. Il s'agit alors d'un son beaucoup plus complexe que les voyelles.

2 Filtrage passe-bas de signaux de base

Vérifier que le fichier **PB.m** se trouve bien dans le répertoire courant.

La fonction **PB** permet de filtrer passe-bas un signal dans la bande **[-Fc, Fc]** quand le signal est échantillonné à la fréquence **Fe**.

La syntaxe est : **sfiltre = PB(sinitial, Fe, Fc) ;**

Pour chacun des signaux précédemment analysés, procéder à la caractérisation du filtre, puis au filtrage et enfin à l'analyse spectrale du signal filtré comme décrit dans les paragraphes suivants.

Attention, les deux signaux n'ont pas la même cadence d'échantillonnage.

2.1 Caractérisation d'un filtre passe-bas

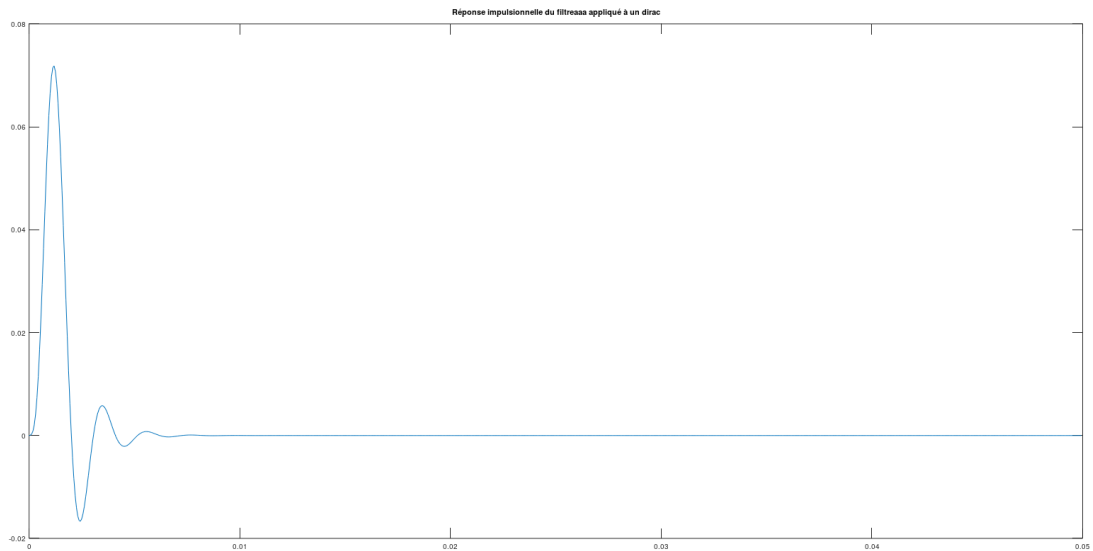
Il s'agit ici de calculer la réponse impulsionnelle, puis le gain complexe (réponse en fréquence) pour une fréquence d'échantillonnage donnée et une fréquence de coupure donnée.

- Au vu de la densité spectrale du signal à filtrer, choisir une fréquence de coupure **Fc**.

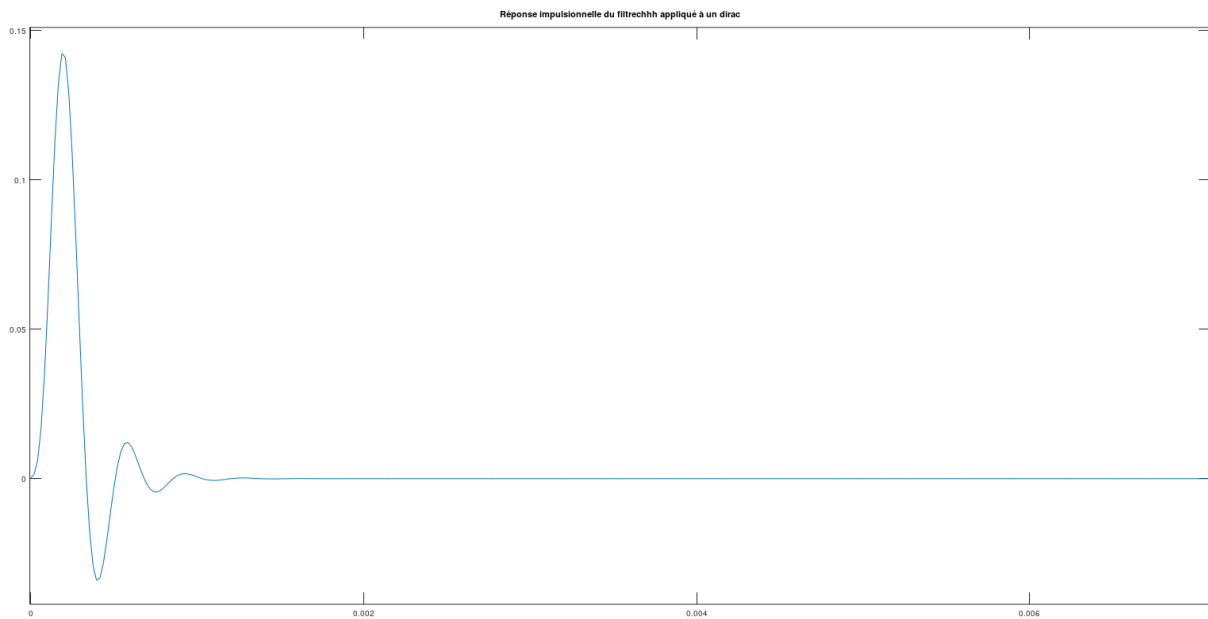
D'après les figures des densités spectrales des deux signaux, on choisit comme fréquence de coupure $F_c=500$ Hz pour la voyelle et $F_c=3000$ Hz pour la consonne. En choisissant ces fréquences, on s'assure d'isoler au mieux de fondamental (si tant est que l'on peut parlé d'un fondamental pour la consonne), qui est la fréquence transportant la majorité de l'énergie du signal de nos 2 sons. Cependant cette coupure ne sera pas parfaite et les fréquences inférieurs proche des fréquences de coupure seront toujours visibles, bien qu'atténuée.

- Pour tracer la réponse impulsionnelle de ce filtre, concevoir le signal d'entrée adéquat, le filtrer à l'aide de **PB** et observer en sortie cette réponse impulsionnelle que l'on tracera en fonction du temps. On s'assurera que le signal d'entrée est suffisamment long pour visualiser la totalité de la réponse impulsionnelle en sortie.

```
Fcx = 500 ;  
dirac1 = zeros(1,length(t1));  
dirac1(1) = 1;  
dirf1 = PB(dirac1, Fea, Fcx);  
plot(t1,dirf1);  
title('Réponse impulsionnelle du filtreaaa appliqué à un dirac')
```



```
Fcy = 3000;
dirac2 = zeros(1,length(t2));
dirac2(1) = 1;
dirf2 = PB(dirac2, Fch, Fcy);
```



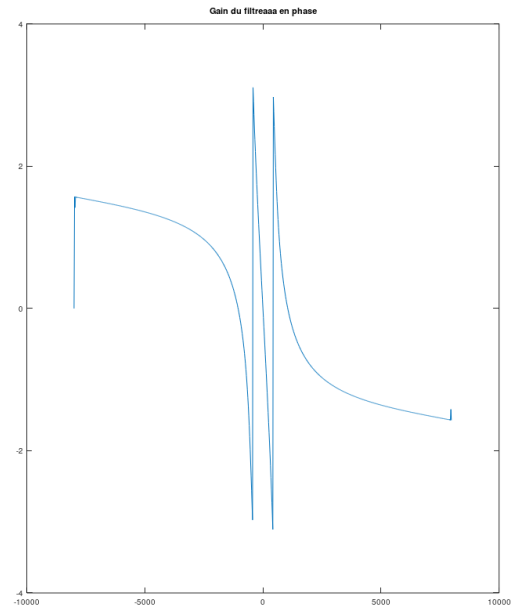
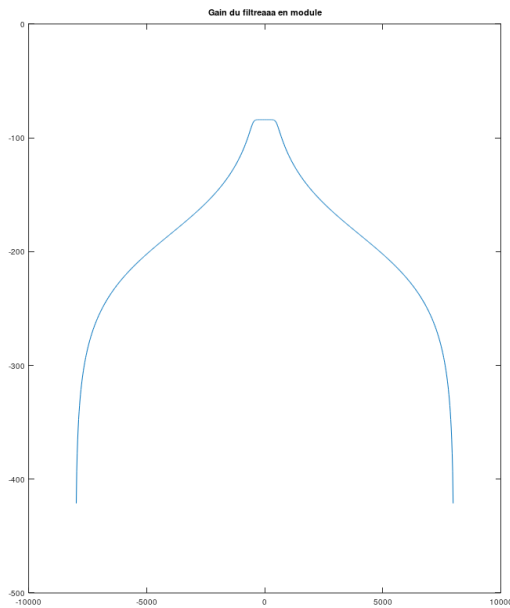
- Calculer (TransFourier) puis tracer le gain complexe du filtre en module et phase.

Code et tracé (voyelle)

```
[Transfdirf1,ffiltrech] = TransFourier(dirf1,t1);
subplot(1,2,1);
plot(ffiltrech,20*log10(abs(Transfdirf1)));
title('Gain du filtreaaa en module')
subplot(1,2,2);
plot(ffiltrech,atan2(imag(Transfdirf1),real(Transfdirf1)));
```

title('Gain du filtreaaa en phase') ;

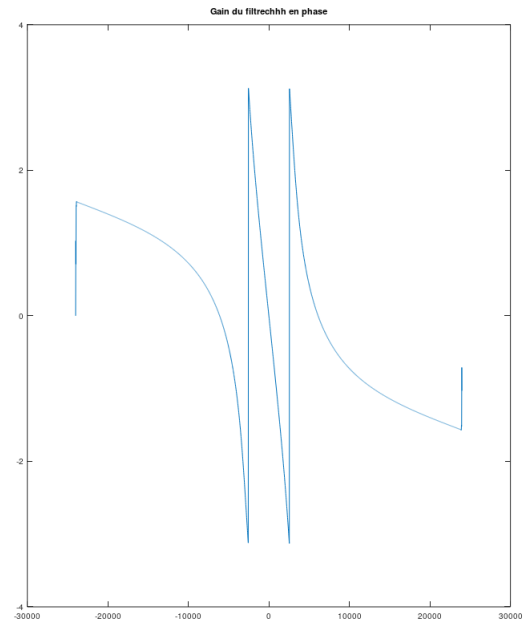
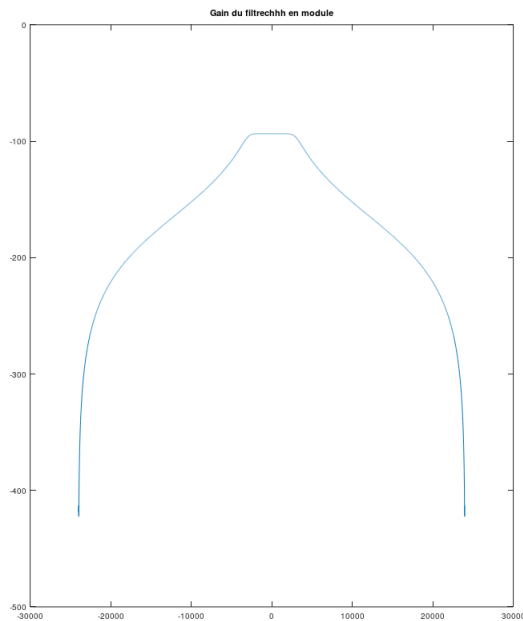
La forme étrange de la phase dans les fréquences proches de -300/300 Hz, qui pourrait s'expliquer par le fait que le gain soit quasi constant (et qu'il s'agisse de la bande passante)



Code et tracé (consonne)

```
[Transfdir2,ffiltrech1] = TransFourier(dirf2,t2);
subplot(1,2,1);
plot(ffiltrech1,20*log10(abs(Transfdir2)));
title('Gain du filtrechhh en module');
subplot(1,2,2);
plot(ffiltrech1,atan2(imag(Transfdir2),real(Transfdir2)));
title('Gain du filtrechhh en phase');
```


On remarque encore cette forme étrange de la phase proche de la gamme de fréquence de la bande passante.



- Mesurer la bande passante à -3 dB du filtre.

Caractéristiques du filtre (voyelle)

Pour simplifier la mesure, on trace un trait à -3 dB du gain maximum :

```
BP = (max(20*log10(abs(Transfdirf1))-3))*ones(1,length(ffiltrech));
```

On mesure alors graphiquement l'intersection de la courbe et de la droite. On obtient une bande passante de -500 à 500 Hz.

Caractéristiques du filtre (consonne)

En suivant la même méthode, on obtient une bande passante de -3000 à 3000 Hz.

2.2 Filtrage d'un son de base

Utiliser **PB** à nouveau pour filtrer la séquence de la voyelle (ou celle de la consonne).

```
fcx = 500;
fcy = 3000;
aaafiltre=PB(xa,Fea,fcx);
```

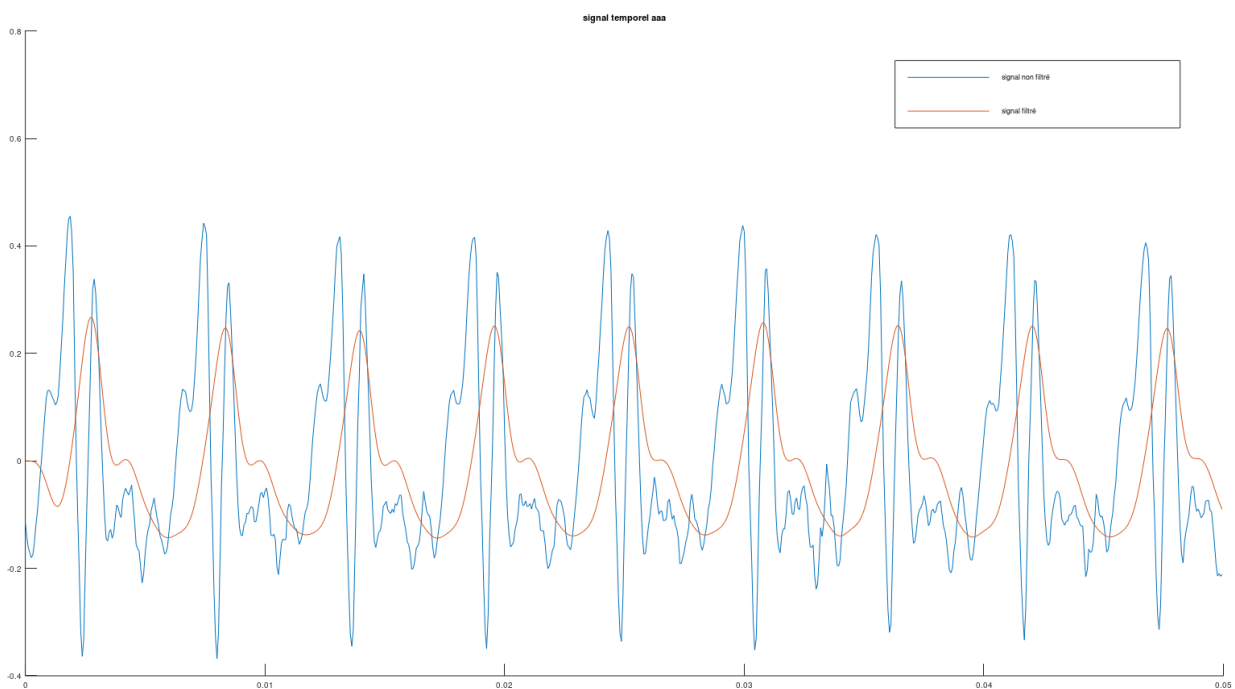
```
chhhfiltre=PB(xch,Fech,fcy);
```

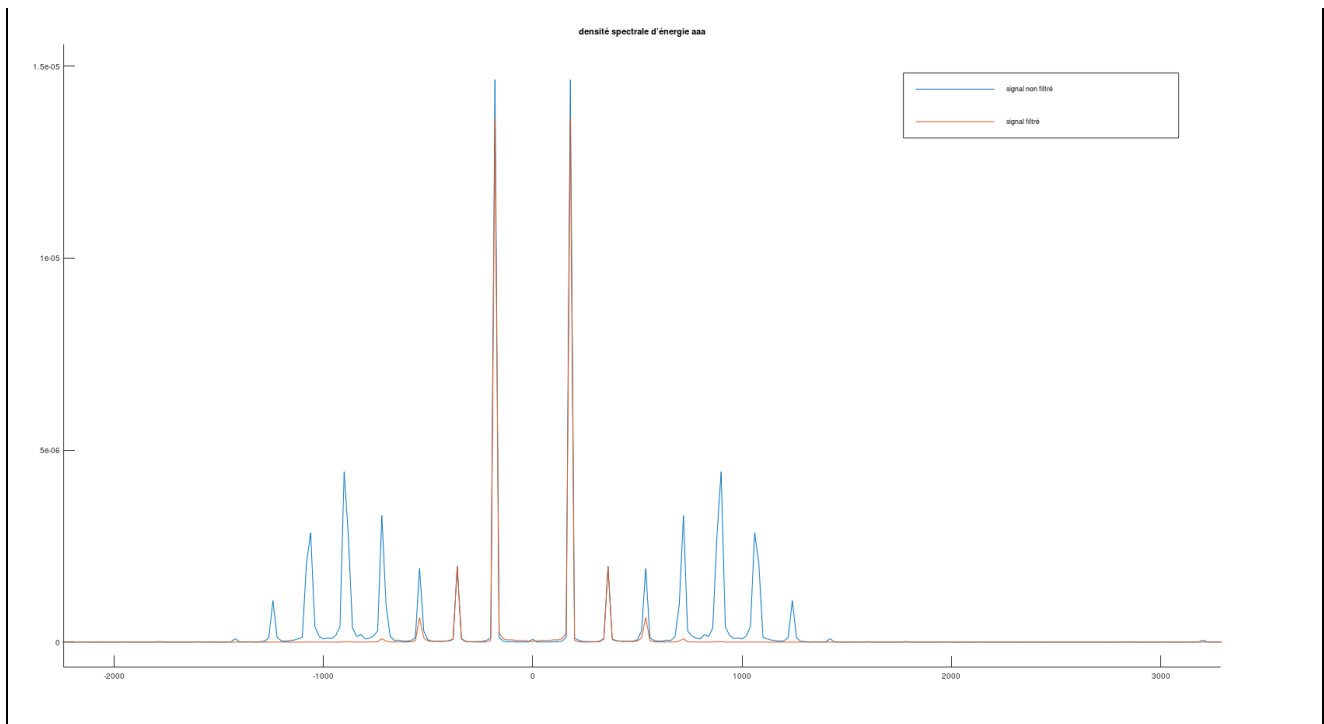
Procéder au calcul et à l'affichage de la densité spectrale d'énergie du signal filtré.

```
[Transfaafiltre,faafiltre] = TransFourier(aaafiltre,t1);
[Transfchhhfiltre,fchhhfiltre] = TransFourier(chhhfiltre,t2);
subplot(1,2,1);
plot(faaafiltre,abs(Transfaafiltre).^2);
title('densité spectrale d'énergie aaa');
subplot(1,2,2);
plot(fchhhfiltre,abs(Transfchhhfiltre).^2);
title('densité spectrale d'énergie chhh');
```

Tracer les courbes utiles pour comparer signaux et spectres avant et après filtrage.

Tracés (voyelle)

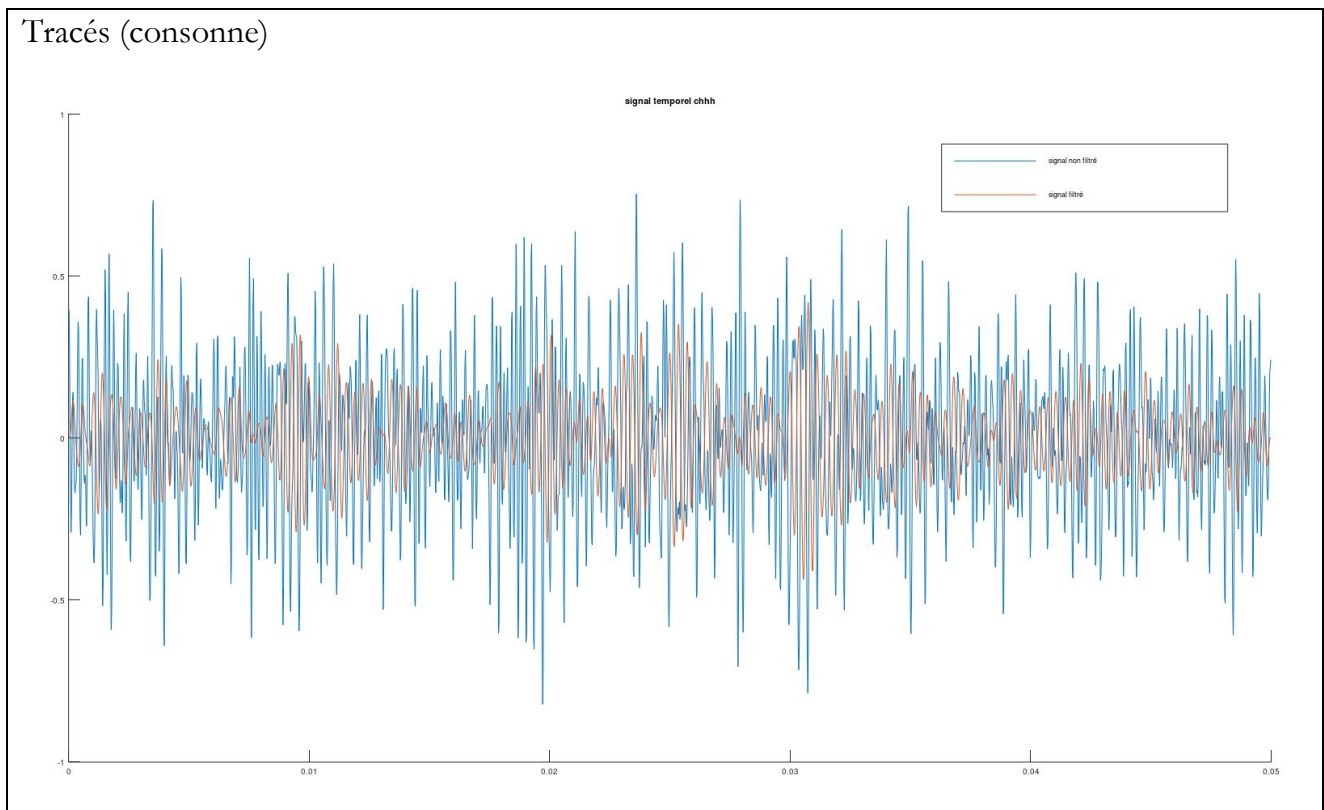


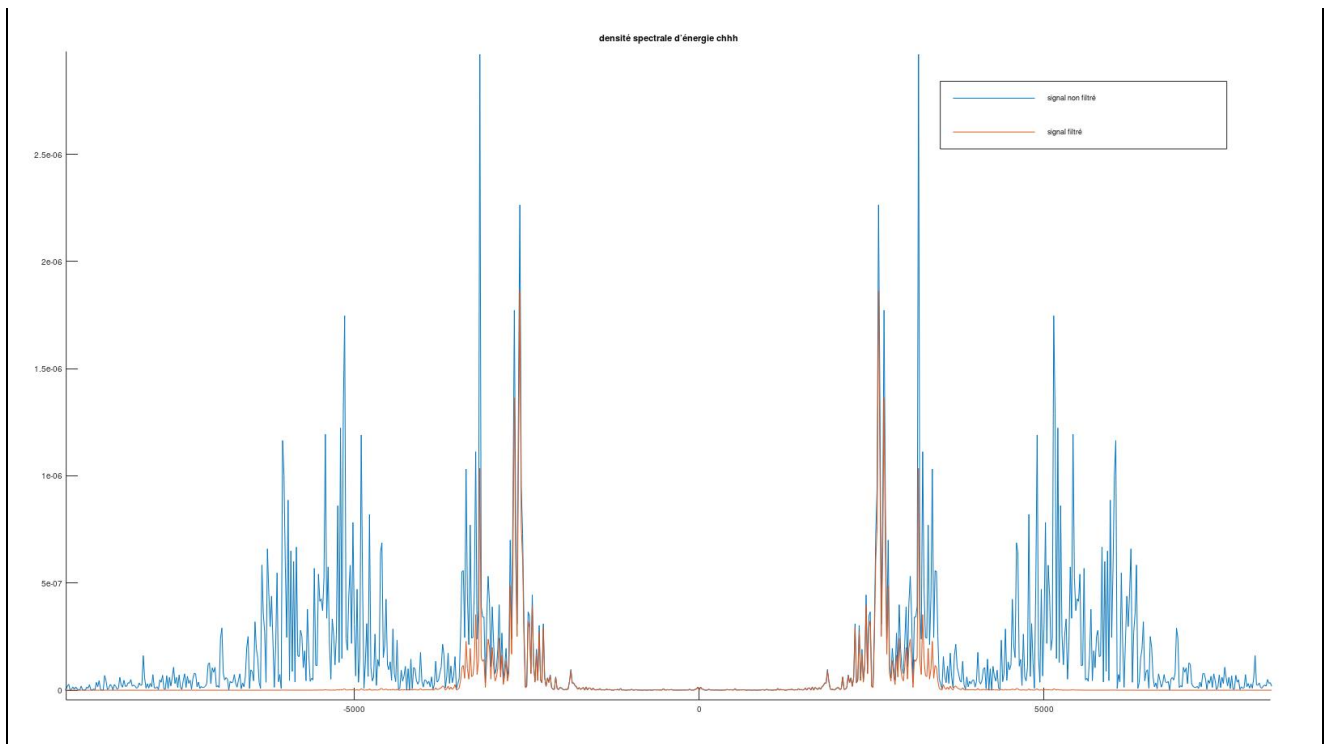


Analyse résultat filtrage (voyelle)

Comme nous pouvons le constater, le filtre a bien coupé les signaux harmoniques hautes fréquence du son au-delà de 500Hz. Cela a pour effet d'avoir un signal temporel plus proche d'une fonction sinus simple, sans ses harmoniques.

Tracés (consonne)





Analyse résultat filtrage (consonne)

Pour la consonne, l'analyse du signal temporel montre clairement que le filtre modifie le signal mais de manière moins compréhensible intuitivement que pour la voyelle. Cependant l'analyse de la densité spectrale d'énergie révèle que le filtre a beaucoup atténué les fréquences au-delà de 3000Hz, laissant quasiment intact les basses fréquences. Cela valide bien le principe de fonctionnement du filtre passe bas. Malgré cela, le signal filtré s'apparente encore à du bruit.

3 Filtrage d'une phrase dans la bande téléphonique

S'assurer que l'on dispose du fichier **filtel.m** dans le répertoire de travail.

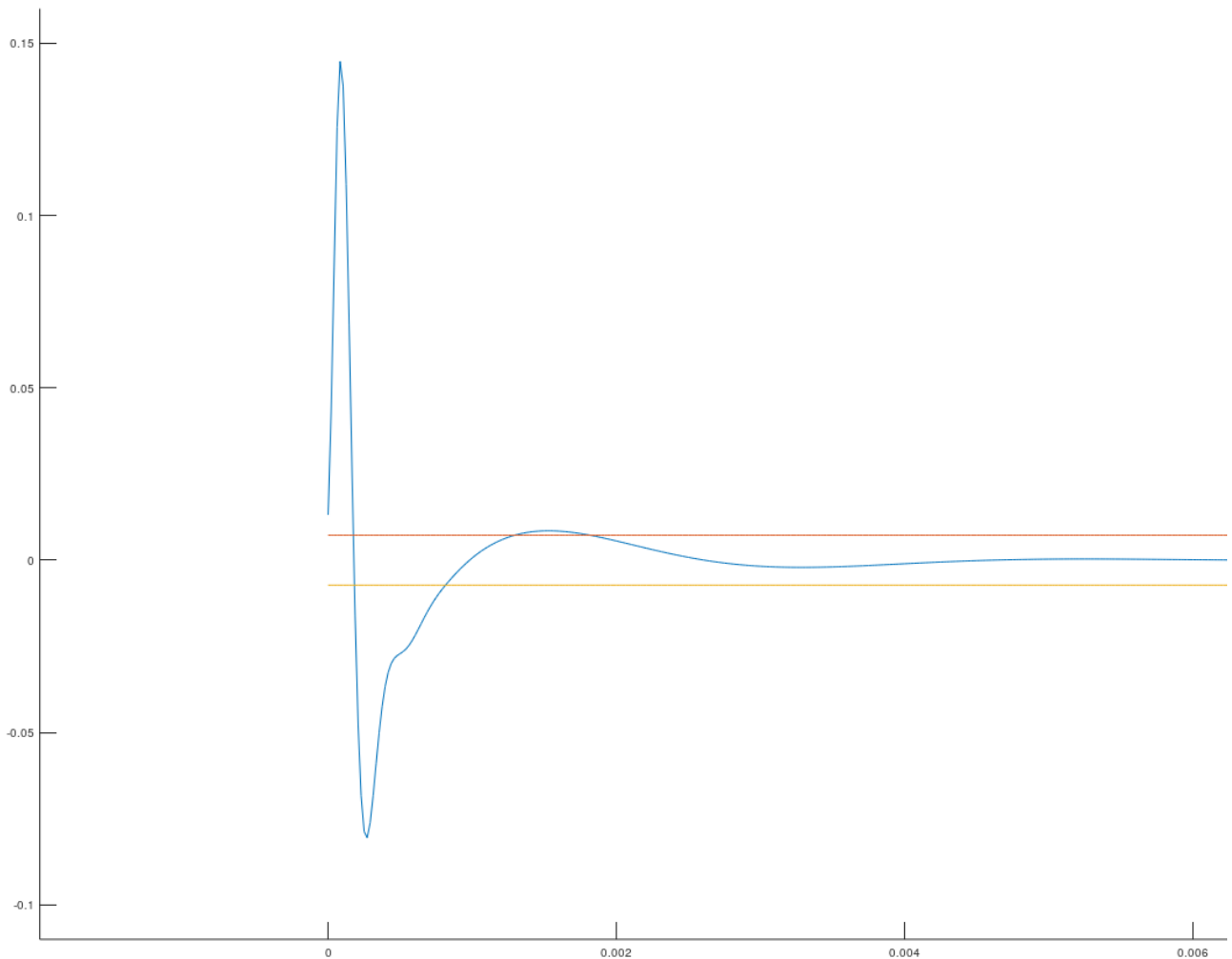
On travaille sur la phrase (toute la phrase) attribuée par l'intervenant en début de séance.

La fonction **filtel** permet de filtrer un signal dans la « bande téléphonique ». Pour une séquence **x** échantillonnée à la fréquence **Fe**, la syntaxe d'appel à la fonction est : **z= filtel(x,Fe) ;**

3.1 Caractérisation du filtre

Comme réalisé en partie 2.1, caractériser le filtre en temps et en fréquence en injectant à l'entrée un signal convenable de longueur au moins 500 échantillons à 48000 Hz. Mesurer la bande passante à -3 dB de ce filtre.

Tracé réponse impulsionnelle (avec zoom si nécessaire)

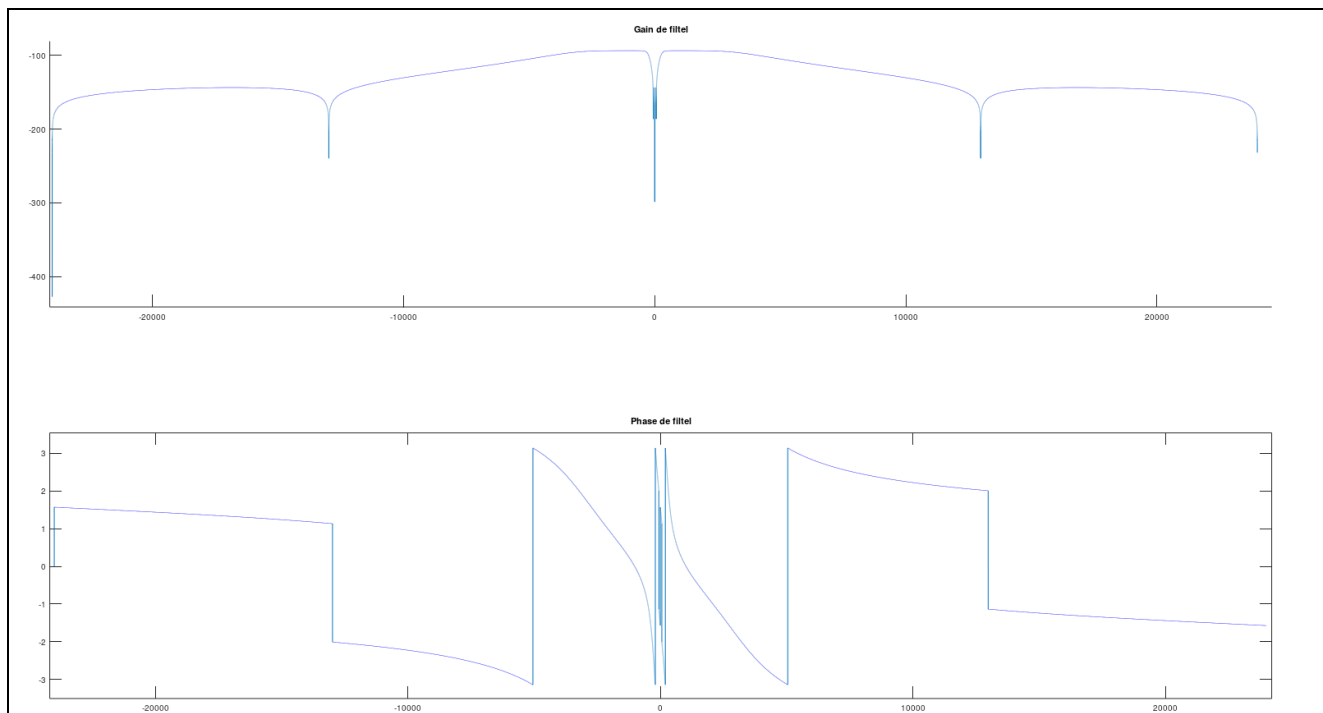


Caractéristique en temps de la réponse impulsionnelle

Pour déterminer le temps de réponse du filtre, on trace les droites pour indiquer le temps de réponse à 5% avec la commande suivante :

```
tr5 = (max(RepImpulFiltel)*0.05)*ones(1,length(t3));
```

On mesure alors que le temps de réponse à 5% est de 0.00185s. Ce filtre réagit beaucoup plus rapidement que celui étudié précédemment.

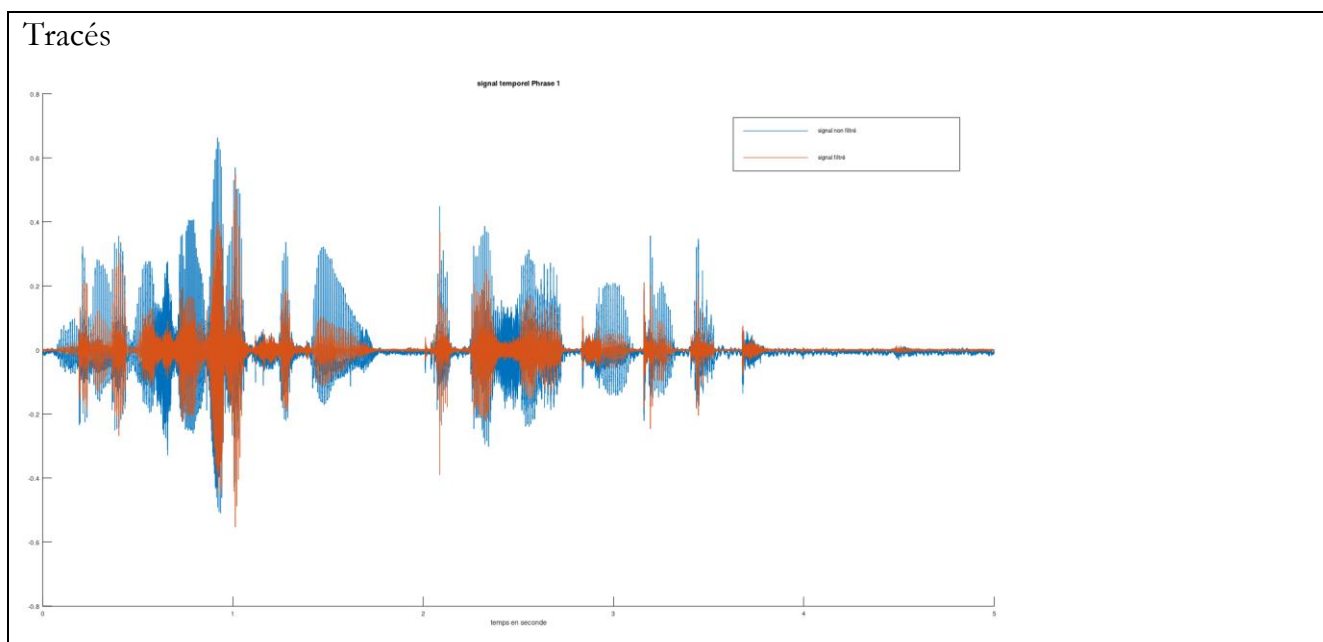


Caractéristiques fréquentielles du gain complexe

Pour déterminer les caractéristiques de ce filtre, nous traçons une droite indiquant -3 dB par rapport au gain maximum comme vu précédemment (2.1). On constate alors que la bande passante du filtre est $[-3400 ; -300] \cup [300 ; 3400]$. Cette bande passante disposée en 2 bandes indique que nous avons affaire à un passe bande.

3.2 Filtrage de la phrase

- Tracer sur une même figure, l'un en dessous de l'autre, le signal original et le signal filtré (gradués en secondes).



- Ecouter les deux signaux avant et après filtrage à l'aide de la fonction **sound** de Matlab

Analyse

Le second signal est, selon moi, comme s'il y avait de la friture. Il crépite, principalement sur les voyelles, alors que le premier non. Le signal est aussi moins fort, comme étouffé. Cependant, le message reste audible et compréhensible.

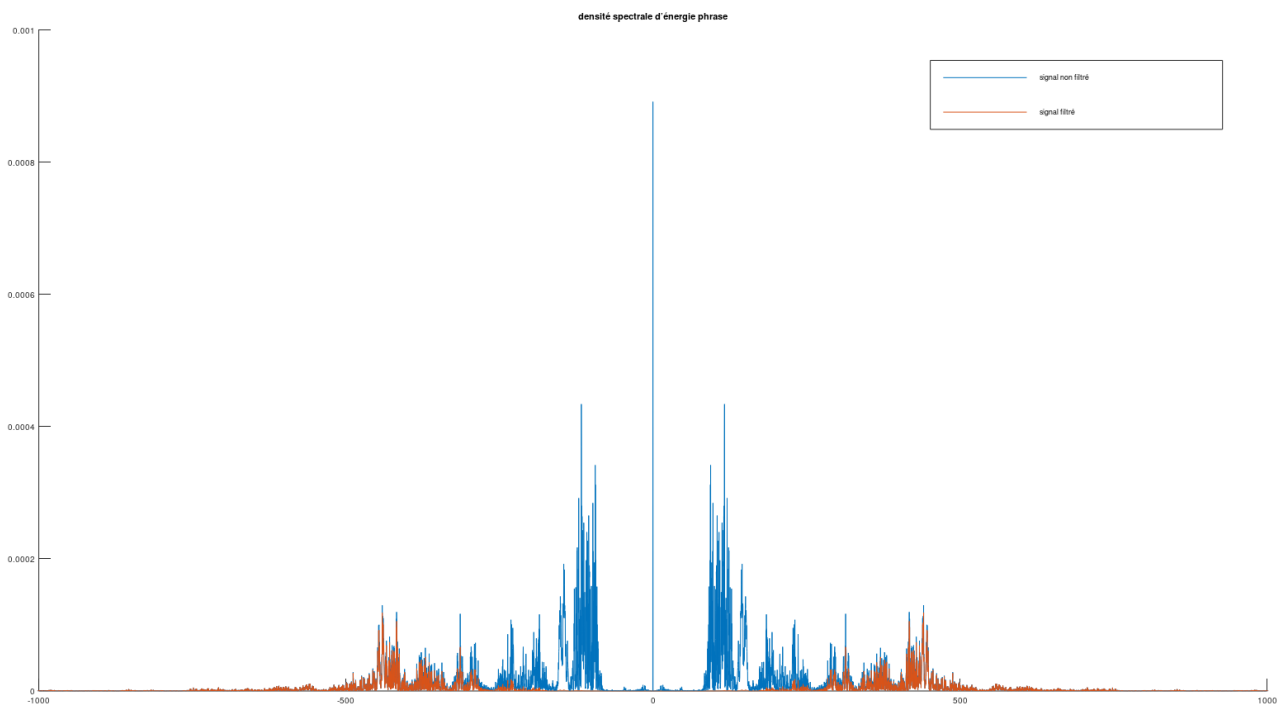
- Réaliser le calcul des densités spectrales d'énergie des deux phrases.

Code

```
[xphrase,Fphrase]=audioread('phrase1.wav');
L = length(xphrase);
t3 = (0:L-1)/Fphrase;
[Transfphrase,fphrase] = TransFourier(xphrase,t3);
xphrasefiltre = filtel(xphrase,Fphrase);
[Transfphrasefiltre,fphrasefiltre] = TransFourier(xphrasefiltre,t3);
DensPhrase = abs(Transfphrase).^2
DensPhraseFiltre = abs(Transfphrasefiltre).^2
```

- Sur une autre figure, afficher l'une en dessous de l'autre les deux densités spectrales graduées en Hz et les comparer.

Tracés et analyse



Sur ce tracé des densités spectrales, on constate que toutes les fréquences situées entre 300 et 3400 (et idem symétriquement pour les fréquences négatives) restent quasiment inchangées dans leur amplitude. Cela montre définitivement que ce filtre est un passe bande. De plus, les fréquences inférieures à 300Hz sont très atténuées, ce qui explique les déformations entendues : les voyelles étant plutôt des sons basses fréquences, le filtrage passe bande supprime le fondamental (qui transporte la majeure partie de l'énergie de la lettre) et c'est pour cela que les voyelles sont très déformées une fois filtrées.