

OBJECTIFS DU PROJET ET ATTENDU DU RAPPORT

Ce projet a pour objectif de vous faire faire une réalisation en autonomie.

Les principales différences par rapport aux séances de TP sont :

- En plus de comprendre les « scripts » fournis, vous devez créer votre propre programme réalisant notamment la fonction principale du vocodeur de phase
- Vous n'avez plus juste à relier les observations à vos connaissances théoriques sur un thème précis mais vous devrez également penser, expliquer, justifier votre réalisation en fonction de vos connaissances et d'une bibliographie.
- Vous devrez rédiger un rapport complet. A lui seul, il devrait permettre au lecteur de comprendre l'objectif de votre travail, avoir les explications et justifications théoriques qui permettent de comprendre votre démarche pour la réalisation du vocodeur de phase, la réalisation (principe des algorithmes utilisés pour toutes les fonctions, y compris celles qui sont fournies) et, bien entendu, les résultats obtenus commentés.

Vous ne devez donc pas vous contenter de répondre aux questions du sujet. Ce dernier n'est là que pour vous guider et pour vous permettre de ne pas « passer à côté » de points importants.

- Vous êtes libre de faire des propositions, des tests, des suggestions, proposer des traitements supplémentaires, des améliorations...

En conclusion, vous devez vous approprier le projet : vous ne répondez pas à des questions mais vous présentez votre projet.

TRAVAIL A REALISER

Des programmes Matlab (fichiers avec l'extension .m) vous sont fournis.

Les commandes principales sont données dans ces programmes commentés. Vous devez bien entendu les comprendre et pouvez éventuellement les compléter/modifier (par exemple si vous souhaitez ajouter une figure, modifier des paramètres...).

Vous aurez à réaliser 2 fonctions principales :

- 1- le principe du vocodeur de phase → interpolation dans le domaine fréquentiel
- 2- la robotisation de la voix

RENDU DU TRAVAIL

Vous travaillerez en binôme. Chaque binôme enverra à son encadrant(e) un fichier compressé (**nom1_nom2.zip**) où nom1 et nom2 sont les noms des élèves constituant le binôme.

Ce fichier devra contenir tous les programmes Matlab (fichiers .m) nécessaires, les fichiers audio (.wav) utilisés ainsi que le rapport sous format (.pdf). Attention, pas de script Matlab dans le rapport (nous aurons les programmes). *Attention, tout doit fonctionner directement en lançant le programme principal que vous nommerez « Vocodeur.m ».*

Délai pour la remise du rapport :

Vous avez jusqu'au vendredi 15/02 pour envoyer votre travail (par mail).

ORGANISATION GENERALE DU PROGRAMME VOCODEUR DE PHASE

INTRODUCTION :

Le vocodeur consiste à « coder » de la voix. Le vocodeur de phase agira essentiellement sur la phase du signal. Attention, ici le terme de « codage » n'est pas pris au sens du codage de données mais au sens « modification ».

Nous allons voir 3 types de modifications de la voix :

- Le premier consiste à modifier la vitesse de la parole sans modifier le pitch. Le pitch étant lié à la fréquence fondamentale de la voix correspondant à la hauteur de la voix (grave, aigue...).
On garde la « même voix » mais les mots seront prononcés plus lentement ou plus rapidement.
- Le deuxième consiste à modifier le pitch de la voix sans modifier la vitesse de prononciation.
- Enfin, le troisième va appliquer un effet de « robotisation » de la voix.

Un programme principal vous est fourni, « **Vocodeur.m** » permettant de lancer les 3 modifications. Vous pouvez modifier les paramètres, le compléter pour observer les signaux, tester sur d'autres fichiers de parole...

Remarque : l'année dernière, par exemple, un groupe d'élèves s'est enregistré en train de chanter et, grâce à la modification de pitch, a ajouté des « chœurs artificiels »... saurez-vous nous surprendre ?

Structure (minimale) du programme principal « **Vocodeur.m** » :

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1- <u>Modification de la vitesse</u> | → appel de la fonction PVoc.m |
| 2- <u>Modification du pitch</u> | → appel de la fonction PVoc.m + ré-échantillonnage |
| 3- <u>Robotisation de la voix</u> | → appel de la fonction Rob.m |

A : MODIFICATION DU PITCH, MODIFICATION DE LA VITESSE : « *PVoc.m* »

Exemple d'utilisation de la modification de la vitesse : dans la publicité radio/télé pour gagner du temps... et donc de l'argent !

Pour la modification du pitch, c'est un effet à appliquer sur la voix. S'il y a des instruments, ceux-ci seront « distordus ».

Pour ces 2 premiers effets, la modification se fait dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier à court terme (voir TP 1 pour le principe de la TFCT).

En effet, le signal de parole n'est pas strictement stationnaire. Par contre, on peut le considérer stationnaire sur une durée relativement faible (20 à 30 ms environ).

Nous utiliserons donc ses caractéristiques dans une fenêtre temporelle et ferons la TF fenêtre par fenêtre. La fenêtre de pondération est une fenêtre de Hanning (vous pouvez voir la documentation de la fonction « *hann* » de Matlab).

Pour cela la fonction ***TFCT.m*** vous est fournie.

Nous appliquerons ensuite les modifications nécessaires à chaque portion (fenêtre/trame) du signal fréquentiel. Vous allez alors créer la fonction que nous avons nommée « ***TFCT_Interp.m*** ».

Nous reviendrons ensuite dans le domaine temporel par une TF à court terme inverse : fonction fournie « ***TFCTInv.m*** ».

Ces 3 fonctions, *TFCT*, *TFCT_Interp* et *TFCTInv*, seront appelées dans l'ordre à partir d'une fonction plus générale « ***PVoc.m*** » fournie.

La seule différence entre la variation du pitch et la variation de la vitesse est que pour la variation du pitch, il ne faut pas oublier de ré-échantillonner le signal résultant pour avoir toujours 1 échantillon tous les T_e et donc garder la même fréquence d'échantillonnage F_e (→ on garde la même « vitesse »). Pour cela, on utilise la fonction « ***resample*** » de Matlab dans le programme *Vocodeur.m*.

Le principal travail d'implémentation dans cette partie, est la réalisation du programme de la fonction *TFCT_Interp.m*. En vous aidant de votre recherche bibliographique et de l'annexe, vous devrez comprendre ce que doit réaliser cette fonction (et pourquoi) et, bien sûr, l'implémenter.

Remarque : lorsque vous modifiez le pitch, vous pouvez également écouter (et observer) ce que cela donne en additionnant le résultat au signal d'origine... on peut faire des duos, des trios (test avec *Extrait.wav*)... on peut ajouter des « sopranos », « contre-ténors » ou « basses » dans une chorale qui n'en a pas (test avec *Halleluia.wav*)...

B : ROBOTISATION DE LA VOIX : « **ROB.M** »

La robotisation de la voix permet d'obtenir un son synthétique largement utilisé dans le cinéma lorsque l'on veut faire « parler » des robots... d'où le terme « robotisation » de la voix. Cet effet est également largement utilisé en musique depuis quelques décennies déjà et qui revient ces dernières années notamment dans le RAP et le RNB (attention, à ne pas confondre avec « l'autotune »).

Pour ce troisième effet, la modification se fait dans le domaine temporel et le principe est alors différent des 2 autres.

Cet effet sera réalisé par la fonction « **Rob.m** » que vous devez créer et à laquelle on fait appel dans le programme principal « *Vocodeur.m* ».

Vous devrez comprendre ce que doit réaliser cette fonction (et pourquoi) et, bien sûr, l'implémenter.

Une façon simple d'obtenir cet effet peut être réalisée directement dans le domaine temporel. On notera cependant qu'une méthode plus robuste consisterait à utiliser la transformée de Hilbert et de jouer sur la phase de chaque trame de la TFCT (nous ne détaillerons pas cela dans le cadre de ce cours).

Nous allons moduler 1 sinusoïde (ou plus exactement une exponentielle complexe) à une fréquence f_c : $y_{rob}(t) = y(t) \cdot \exp(-j2\pi f_c t)$. Comme le résultat est un signal complexe, nous devons récupérer la partie réelle de ce dernier.

La valeur de f_c déterminera le « degrés de robotisation ». Vous pourrez faire les tests avec $f_c = 2000, 1000, 500$ et 200 . Expliquez ce qu'il se passe pour chaque valeur de f_c .

On notera que les choix de f_c trop grand (2000 et 1000) ne sont pas judicieux en terme de son mais vous permettront de comprendre ce qu'il se passe, notamment dans le domaine fréquentiel...

En fonction du résultat « sonore », vous pouvez proposer une autre valeur de f_c qui vous semblerait plus judicieuse.

Remarque : la robotisation est plus « judicieuse » sur un signal de parole plutôt que sur une voix chantée (tests sur Diner.wav). D'ailleurs ce serait bien de tester sur votre propre voix. Il suffit d'enregistrer un extrait de votre voix et d'appliquer la robotisation sur cet extrait...

ANNEXE

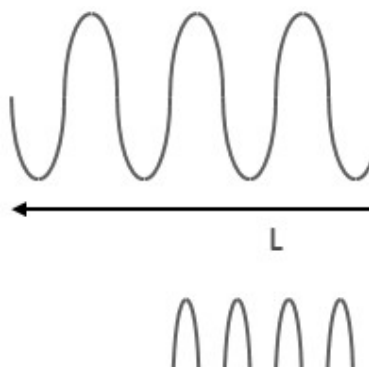
A - PRINCIPE GENERAL DU VOCODEUR DE PHASE

L'objectif est de « déplacer » le « pitch » d'un signal audio. Ce dernier étant défini par une fréquence fondamentale, le déplacement (ou transposition) se fait donc dans le domaine fréquentiel.

Une transposition directe de fréquence a pour effet de modifier la durée du signal.

Exemple sur une sinusoïde (figure ci-dessous) :

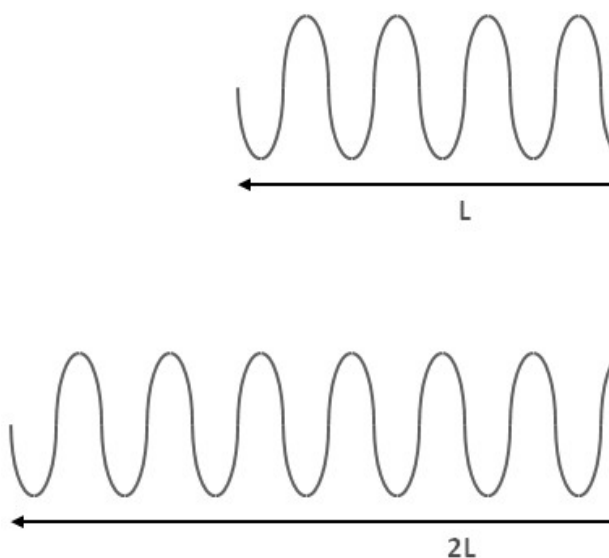
On considère une sinusoïde de fréquence f_0 (courbe du haut). La transposition à une fréquence 2 fois plus élevée, $2.f_0$, donnerait la courbe du bas dont la durée est 2 fois plus courte (le son serait alors 2 fois plus « rapide »), car le nombre d'échantillons est le même.



Ref. <http://www.guitarpitchshifter.com/algorithm.html#33>

Pour avoir l'impression d'avoir le même son mais prononcé (s'il s'agit de la parole) ou joué (s'il s'agit d'un instrument) par une voix ou un instrument d'une octave au-dessus par exemple, il faudrait d'abord interpoler pour avoir une durée 2 fois plus grande, puis transposer la fréquence (voir figure ci-dessous).

C'est ce que doit faire la fonction *TFCT_Interp.m* que vous devez créer.



Ref. <http://www.guitarpitchshifter.com/algorithm.html#33>

D'autre part, le passage dans le domaine fréquentiel ne peut se faire par une simple transformée de Fourier sur tous les échantillons. En effet, le signal n'est pas stationnaire sur l'ensemble de la durée. Par exemple, un signal de parole peut être considéré stationnaire sur une durée de 20 à 30 ms.

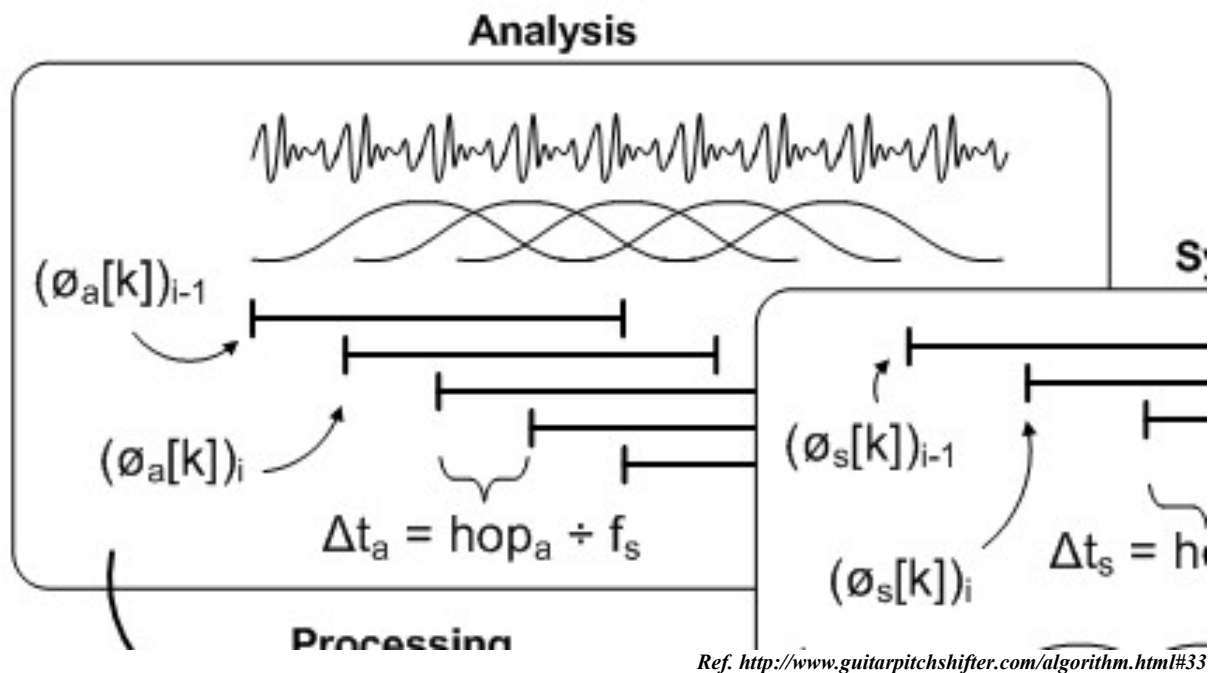
Dans cet intervalle, le pitch peut être considéré constant et nous pouvons lui appliquer la transposition. Nous devons donc le faire par tranches et chaque tranche sera appelée « trame ».

On utilise alors la transformée de Fourier à Court Terme (TFCT ou STFT en anglais) dont le principe a été abordé lors du premier TP.

Trois étapes sont nécessaires dans le vocodeur de phase :

- 1- Le passage dans le domaine fréquentiel par TFCT correspondant à la phase « analyse » → fonction Matlab fournie : *TFCT.m*
- 2- La transposition de fréquence correspondant à la phase « traitement » → fonction Matlab à faire : *TFCT_Interp.m*
- 3- Le retour dans le domaine fréquentiel correspondant à la phase « synthèse » → fonction Matlab fournie : *TFCTInv.m*

On considère le schéma général ci-dessous :



Ref. <http://www.guitarpitchshifter.com/algorithm.html#33>

1- L'analyse → TFCT :

On rappelle que pour la TFCT, les trames ne sont pas juxtaposées mais se chevauchent sur un intervalle noté Nov dans les programmes et hop dans le schéma ci-dessus. D'autre part, avant d'appliquer la TF à une trame, on la pondère par une fenêtre. Nous avons choisi une fenêtre de Hanning.

Le résultat de TFCT sera donné non pas par un vecteur mais une matrice de N lignes et N_{tr} colonnes. N est le nombre de points de la TF pour chaque trame et N_{tr} est le nombre de trames. Chaque colonne représente donc la TF de chaque trame.

On notera que l'on ne garde que les échantillons aux fréquences positives de la TF (de 0 à $F_e/2$) → $N = 1 + N_{fft}/2$ si N_{fft} est le nombre de points de calcul de la TF.

2- Le traitement → l'interpolation dans le domaine fréquentiel :

Pour que le son reconstruit par TFCT inverse soit le plus fidèle possible au son original, il faut qu'en chaque fréquence la phase du signal modifié soit la même (ou la plus proche possible) du signal original.

En effet, l'information de phase entre 2 trames successives est très importante.

Pour chaque trame, le traitement devra donc faire une transposition du spectre d'amplitude (module de TF) et faire un traitement particulier de la phase (argument de la TF). D'où le terme de vocodeur de phase.

Voici le principe de la fonction que vous devez implémenter : *TFCT_Interp.m* :

La fonction débutera ainsi :

```
function y = TFCT_Interp(X,t,Nov) ;

% X est la matrice issue de la TFCT
% t est le vecteur des indices sur lesquels doit être faite
% l'interpolation
% Nov est le nombre d'échantillons correspondant au chevauchement des
% fenêtres (trames) lors de la TFCT

[nl,nc] = size(X); % récupération des dimensions de X
N = 2*(nl-1);      % calcul de N (= Nfft en principe)

% Initialisations
%-----
% Spectre interpolé
y = zeros(nl, length(t));

% Phase initiale
ph = angle(X(:,1));

% Déphasage entre chaque échantillon de la TF
dphi0 = zeros(nl,1);
dphi0(2:nl) = (2*pi*Nov) ./ (N ./ (1:(N/2)));

% Premier indice de la colonne interpolée à calculer
% (première colonne de Y). Cet indice sera incrémenté
% dans la boucle
ind_col = 1;

% On ajoute à X une colonne de zéros pour éviter le problème de
% X( : , ind_col + 1) en fin de boucle
X = [X,zeros(nl,1)];

% Boucle pour l'interpolation
%-----
% Pour chaque valeur de t, on calcule la nouvelle colonne de Y à partir de 2
% colonnes successives de X
Algorithme à faire ici !!!
```

Principe de l'algorithme :

- Pour chaque trame (numérotée par ind_col), il faut faire une boucle sur toutes les valeurs de t.
- Pour chaque valeur de t, on appliquera le traitement de 2 colonnes successives de X pour calculer 1 colonne de y :
 - On récupère les 2 colonnes de X : X2col
 - On calcule le module My interpolé
 - On calcule la colonne de y : $y(:, \text{ind_col}) = \text{My} .* \exp(j * \text{phi})$
 - On met à jour la nouvelle phase phi qui sera utilisée pour le calcul de la prochaine colonne de y (prochaine trame)
 - On incrémente l'indice colonne : $\text{ind_col} = \text{ind_col} + 1$;

Fin de l'algorithme.

- Calcul des échantillons de la colonne (trame) interpolée numéro c du module de y (tn étant le n^e élément de t) :

$$My(:, c) = \alpha X(:, c) + \beta X(:, c + 1)$$

avec :

$$\beta = tn - \text{floor}(tn)$$

$$\alpha = 1 - \beta$$

- Mise à jour de la phase lors du calcul de la c^e colonne de y :
calcul de la variation de phase entre 2 colonnes successives de X

$$d\varphi = \text{angle}(X(:, c + 1)) - \text{angle}(X(:, c)) - d\varphi_0$$

nous devons également s'assurer que la phase varie toujours entre - pi et + pi

$$d\varphi = d\varphi - 2\pi \cdot \text{round}\left(\frac{d\varphi}{2\pi}\right)$$

et finalement :

$$\varphi = \varphi + d\varphi + d\varphi_0$$

3- La synthèse → TFCT inverse

On utilise la TFCT inverse pour revenir dans le domaine temporel en combinant les trames fenêtrées et en appliquant une TF inverse.

La fonction doit donc renvoyer un vecteur de même longueur que le vecteur temps (t) choisi pour l'interpolation.