

TP sujet 1 : Simulation d'une Guitare

1 Contexte et Objectifs du TP

Au cours des enseignements, vous êtes amenés à découvrir un ensemble de concepts permettant de caractériser, représenter, analyser et traiter des signaux porteurs d'informations. Au cours de la séance de TP, nous vous proposons de mettre en œuvre une partie de ces notions en travaillant sur le son et plus précisément sur sa caractérisation, sa modélisation et sa reproduction à l'aide de filtre.

Le Tp est décomposé en 3 parties :

- Analyse et caractérisation des signaux d'un instrument,
- Synthèse d'un filtre FIR permettant de reproduire le contenu harmonique d'une note,
- Synthèse d'un filtre IIR permettant de reproduire l'enveloppe temporelle d'une note.

Motivation

Il y a encore quelques années, les instruments virtuels étaient réservés aux compositeurs travaillant sur des logiciels onéreux. Or de nos jours, des logiciels gratuits reproduisant assez fidèlement les sons d'instruments sont facilement accessibles au plus grand nombre¹ notamment pour les guitares, pour lesquelles il suffit sur d'un smartphone pour jouer virtuellement un morceau de musique (Figure 1).



Figure 1 : application « Real Guitar » pour android de la société Kolb (<http://www.kolbapps.com/>)

¹ Pour vous en convaincre, utiliser les mots clés « guitar » et « virtual » sur un smartphone ou un PC. L'offre s'est largement développée et démocratisée avec l'avènement du numérique.

Pour reproduire les sons d'une guitare, l'approche la plus naturelle est de construire un **modèle physique**² commençant par l'analyse des vibrations des cordes. La mise en équation reste accessible mais pour une bonne fidélité du son, les interactions des cordes avec l'ensemble du corps et du manche doivent être prises en compte (Figure 2).

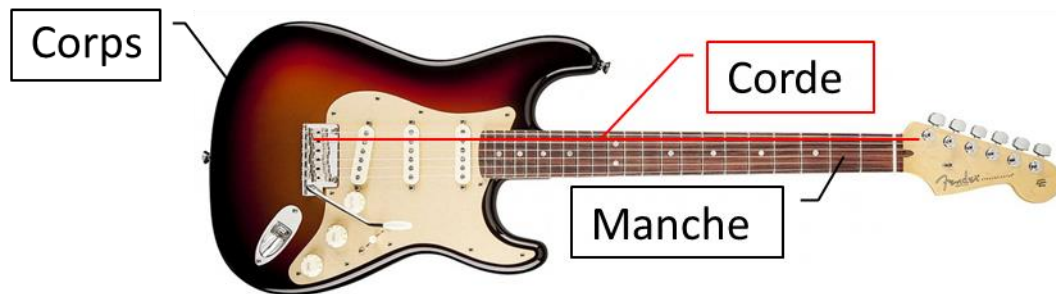


Figure 2 : Guitare électrique, modèle «Stratocaster », marque « Fender »

Cela est vrai que l'on soit sur une guitare acoustique³ ou électrique⁴. On se retrouve alors avec un modèle complexe composé d'équations aux dérivés partielles. Ce modèle est très fidèle et il est particulièrement adapté pour l'analyse des répercussions des choix de lutherie. Mais il est difficile à manipuler et simuler. Or les applications disponibles de guitare virtuelle nécessitent peu de ressources « mémoire » et « processeur » pour fonctionner. Elles utilisent donc des modèles plus simples en termes de dimension et de complexité pour reproduire de **manière suffisante** les sons produits par une guitare.

C'est cet objectif que vous allez essayer d'atteindre dans cette séance en cherchant à construire un **filtre générateur** permettant de reproduire des sons de guitare sur la base uniquement de l'analyse de signaux mesurés⁵.

2 Analyse et caractérisation d'un son de guitare

Dans cette partie, l'objectif est de comprendre les caractéristiques des signaux émis par une guitare par :

- une analyse dans le domaine temporelle ;
- une analyse dans le domaine fréquentielle ;
- une analyse dans le plan temps-fréquence ;

Les signaux continus à analyser sont traités dans leur grande majorité par des systèmes numériques. Les données manipulées sont donc en réalité des signaux discrets issus d'un échantillonnage effectué au moment de l'acquisition. Lorsque la fréquence d'échantillonnage

² On parle également de modèle de connaissance ou encore de modèle « boîte blanche »

³ E. Becache & Al, « Numerical Simulation of Guitar », Computers and Structures, Vol. 83, n°2, pp 107-126, 31/1/2005

⁴ J.L. Le Carrou & Al, « Guitare électrique : quel rôle pour les éléments de Lutherie ? », 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 12-16 Avril 2010

⁵ On parle parfois d'une approche « boîte noire » pour la modélisation du signal.

est « suffisamment » grande, il est possible de mener les analyses en abordant l'étude comme une étude « analogique ». Ce sera le parti pris dans le début de l'étude pour la modélisation avant de passer à la synthèse de filtre numérique. Malgré tout, concrètement, vous manipulez sous Matlab des échantillons.

Vous avez à votre disposition un enregistrement de chaque corde jouée à vide⁶ à savoir :

*“string1e.wav”, “string2b.wav”, “string3g.wav”,
“string4d.wav”, “string5a.wav”, “string6e.wav”*

Vous commencerez votre étude par l'analyse des données contenues dans *“string5a.wav”*

Question 1. A l'aide des instructions suivantes de Matlab :

$[x, Fs] = \text{audioread}('string5a.wav'); x = x(:, 1);$

Charger les données puis construire un vecteur temps pour réaliser un tracé de l'évolution temporelle de la mesure disponible x . Ecouter le son correspondant à l'aide de la fonction *sound*.

Question 2. Analyser votre tracé dans son ensemble, puis sur quelques intervalles. Proposer de premières hypothèses caractérisant l'évolution du signal x .

Question 3. Sur la base des échantillons x_k contenus dans le vecteur x à votre disposition, réaliser à l'aide d'une TFD une estimation du spectre X du signal x . A partir du tracé de X , compléter les éléments de réponse apportés Question 2.

Question 4. Compléter votre code avec les instructions suivantes :

figure;
np = 2^11;
*spectrogram(x,np,np/2^2,np*2^4,Fs);*
xlim([0 3000]); colorbar; shading interp;

Expliquer le rôle de la commande *spectrogram* et de ces paramètres d'entrée. Justifier le choix de *np*. A l'aide du tracé obtenu, finaliser votre modélisation du signal x .

Question 5. Valider votre analyse en utilisant les enregistrements restants.

⁶ Action avec une main sur la corde au niveau du corps pour la faire vibrer sans action de l'autre main au niveau du manche sur la même corde.

3 Génération d'un motif et périodisation

Dans cette partie, l'objectif est de construire un filtre RIF dont la réponse impulsionnelle correspondra à une période spécifique du signal x . Pour cela, il vous est proposé d'utiliser la méthode s'appuyant sur l'expression littérale du spectre souhaité.

Question 6. On décide de retenir pour la génération des sons, une fréquence d'échantillonnage ν_s de 11025 Hz. Justifier ce choix.

Question 7. A partir de l'analyse menée précédemment et notamment du tracé du spectre X de x , donner l'expression de la réponse impulsionnelle théorique h^* correspondante.

Question 8. Fixer l'ordre N_f de votre filtre en prenant en considération la durée de la réponse impulsionnelle h^* résultant et la caractéristique en fréquence H^* souhaitée. Tracer les coefficients de la réponse impulsionnelle.

Question 9. On souhaite un filtre causal, quelle(s) modification(s) faudra-t-il apporté aux coefficients de la réponse impulsionnelle définis précédemment ? Appliquer cette modification et tracer la caractéristique H^* correspondante.

4 Synthèse de l'enveloppe – filtre IIR

On cherche à réaliser une simulation d'une note de guitare, notamment la note de La dont l'évolution temporelle est représentée Figure 3.

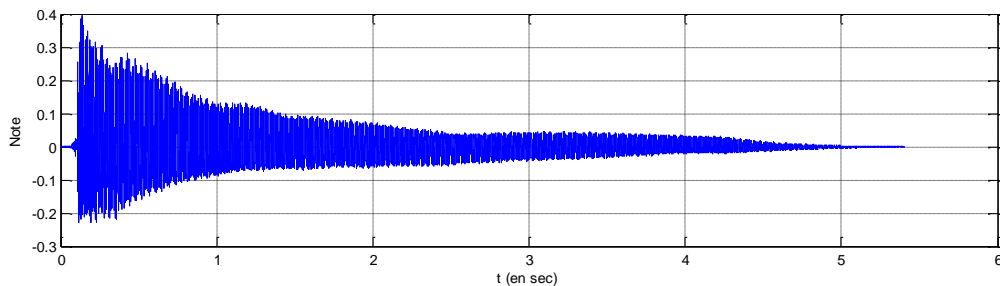


Figure 3 : Evolution temporelle de la note La

Pour cela, le filtre générateur défini précédemment va servir de point de départ. L'objectif va être ici de trouver une solution pour donner un caractère non stationnaire au signal généré.

Question 10. Théoriquement quelle entrée faudrait-il appliquer au système de réponse impulsionnelle h^* pour obtenir un signal de sortie y^* périodique, de période T_0 , dont chaque période est équivalente à h^* ?

Question 11. Le schéma (Figure 4) est une représentation de l'opération précédente. Quel problème cela pose-t-il ?

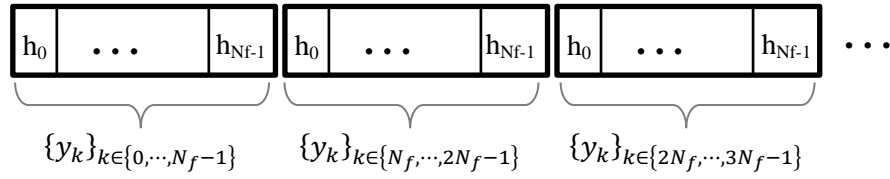


Figure 4 : Périodisation de la réponse impulsionnelle

Question 12. Il a été montré dans la littérature scientifique⁷ qu'il est possible de définir un système de convolution discret, causal, de type IIR permettant de reproduire de manière suffisante l'enveloppe d'une note de guitare.

La sortie *res* du filtre est définie par l'équation de récurrence suivante :

$$\forall k \in \mathbb{N}, \quad res_{k+N_f} = \varepsilon \times 0.5(res_k + res_{k-1}) + y_{k+N_f}$$

Avec :

- y_k tel que

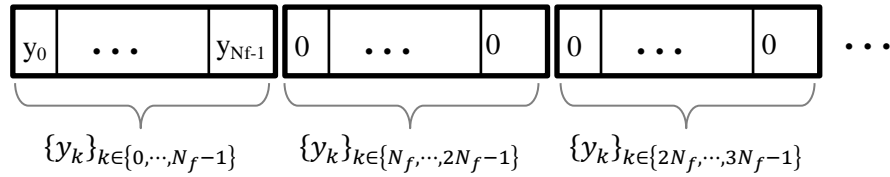


Figure 5 : Signal d'entrée du filtre RII

- ε fixe le taux de décroissance de l'enveloppe, il est déterminé à partir de la durée totale de la note souhaitée par :

$$\varepsilon = \frac{1}{|\cos(\pi \nu_0 T_s)|} e^{\left(-\frac{1}{D \nu_0}\right)}$$

Où

- D est le temps à partir duquel les composantes fréquentielles ont été réduites d'environ 60db. Il est obtenu à partir de la durée t_r souhaitée de la note par :

$$D = \frac{t_r}{\ln(1000)}$$

- ν_0 est la fréquence fondamentale de la note ;
- T_s est la période d'échantillonnage ;

A l'aide d'un schéma, analyser le fonctionnement du filtre en vous appuyant sur l'équation de récurrence, la Figure 4 et la Figure 5.

⁷ D.A. Jaffe & J.O. Smith, "Extension of the Karplus-Strong Plucked-String Algorithm", Computer Music Journal, Vol. 7, N° 2 (summer, 1983), pp. 56-69

Question 13. Mettez en œuvre ce filtre et analyser le résultat.

Question 14 : En vous aidant de l'annexe, mettez en œuvre un code permettant de jouer la partition suivante :

The image shows a musical score for guitar in G major, 4/4 time. The score consists of two systems. The first system has 8 measures with chords G, C, A7, D, B7, Em, C, D7, and G. The second system has 8 measures with chords G, D, C, D, D, G, C, and D7, ending on G. Each measure includes a guitar tablature below the staff.

Sur cette image, vous avez à la fois :

- la portée commençant par la clé de Sol sur laquelle on retrouve toutes les notes et leur durée ;
- la tablature indiquant le numéro de la case sur le manche de la guitare ainsi que la corde à jouer avec en partant de bas en haut : Mi grave, La, Ré, Sol, Si, Mi aigu ;
- L'écart entre 2 cases est de $\frac{1}{2}$ ton. Une gamme chromatique en contient 12 ;
Do Do# Ré Ré# Mi Fa Fa# Sol Sol# La La# Si Do
- La note de référence est le La à 110 Hz et il correspond à la corde de La jouée à vide ;
- La fréquence d'une note quelconque est obtenue en comptant le nombre nt de demi-ton (en plus ou en moins) la séparant de la note de référence (ce qui correspondra au nombre de case). La formule est $\nu_{note} = \nu_{ref} * 2^{\frac{nt}{12}}$

Vous avez maintenant suffisamment d'élément pour retrouver le titre de ce morceau.

ANNEXE

Notes	Octaves											
		-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Do	16,4	32,7	65,4	130,8	261,6	523,3	1046,5	2093,0	4186,0	8372,0	16744,0
	Do# / Reb	17,3	34,6	69,3	138,6	277,2	554,4	1108,7	2217,5	4434,9	8869,8	17739,7
	Re	18,4	36,7	73,4	146,8	293,7	587,3	1174,7	2349,3	4698,6	9397,3	18794,5
	Re# / Mib	19,4	38,9	77,8	155,6	311,1	622,3	1244,5	2489,0	4978,0	9956,1	19912,1
	Mi	20,6	41,2	82,4	164,8	329,6	659,3	1318,5	2637,0	5274,0	10548,1	21096,2
	Fa	21,8	43,7	87,3	174,6	349,2	698,5	1396,9	2793,8	5587,7	11175,3	22350,6
	Fa# / Solb	23,1	46,2	92,5	185,0	370,0	740,0	1480,0	2960,0	5919,9	11839,8	23679,6
	Sol	24,5	49,0	98,0	196,0	392,0	784,0	1568,0	3136,0	6271,9	12543,9	25087,7
	Sol# / Lab	26,0	51,9	103,8	207,7	415,3	830,6	1661,2	3322,4	6644,9	13289,8	26579,5
	La	27,5	55,0	110,0	220,0	440,0	880,0	1760,0	3520,0	7040,0	14080,0	28160,0
	La# / Sib	29,1	58,3	116,5	233,1	466,2	932,3	1864,7	3729,3	7458,6	14917,2	29834,5
	Si	30,9	61,7	123,5	246,9	493,9	987,8	1975,5	3951,1	7902,1	15804,3	31608,5

 Plage des fréquences fondamentales des notes jouées par une guitare