

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie électrique et génie informatique

RAPPORT APP3

Traitement numérique des signaux

Présenté à

Monsieur Eric Plourde

Présenté par

Pascal-Emmanuel Lachance – LACP3102

Anthony St-Laurent Cyr – STLA0801

Sherbrooke 18 Janvier 2022

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction.....	1
2.	Schéma bloc	1
2.1.	Extraction des paramètres	1
2.2.	Synthèse	2
3.	Analyse et synthèse.....	3
3.1.1.	Spectres de Fourier (La#).....	3
3.1.2.	Harmoniques obtenues (La#).....	4
3.1.3.	Tableaux des fréquences, amplitudes et phases des harmoniques retenues (La#)	5
3.1.4.	Graphique des enveloppes temporelles obtenues (La#).....	6
3.2.	Basson	7
3.2.1.	Spectres de Fourier	7
3.2.2.	Harmoniques (Basson).....	8
3.2.3.	Tableaux des fréquences, amplitudes et phases des harmoniques retenues (Basson)	9
3.2.4.	Graphique des enveloppes temporelles obtenues (Basson)	10
4.	Filtre Passe-Bas RIF	11
4.1.	Calculs de la longueur N du filtre passe-bas	11
4.2.	Graphique de la fonction de réponse en fréquence (amplitude seule, en dB)....	12
5.	Filtre Coupe-bande RIF	13
5.1.	Équation aux différences et le calcul des valeurs des coefficients.....	13
5.2.	Graphique de la réponse à l'impulsion $h(n)$	14
5.3.	Graphique de la réponse à une sinusoïde de 1000 Hz.....	15
5.4.	Graphiques amplitude et phase de la réponse en fréquence.....	16
5.5.	Graphiques des spectres d'amplitude des signaux basson avant et après filtrage	17
6.	Conclusion	18

TABLES DES FIGURES

Figure 1 : schéma bloc d'extraction des paramètres	1
Figure 2 : Schéma bloc de la synthèse	2
Figure 3 : Échantillons audios initiaux du LA# et transformée de Fourier	3
Figure 4 : amplitudes et phases des harmoniques du LA#.....	4
Figure 5 : enveloppe du LA#	6
Figure 6 : spectre de Fourier du basson original.....	7
Figure 7 : spectre de Fourier du basson final.....	7
Figure 8 : amplitudes et phases des harmoniques du basson.....	8
Figure 9 : enveloppe du basson.....	10
Figure 10 : amplitude du filtre passe bas en fonction de fréquence normalisé.....	12
Figure : figure de hn centré de	14
Figure : résultante de la sinus à 1 kHz	15
Figure : réponse en fréquence du filtre coupe-bande.....	16
Figure : spectre d'amplitude du basson original	17
Figure : spectre d'amplitude du basson après filtrage	17
Figure : spectre d'amplitude du basson après filtrage en cascade et fenêtre	17

1. Introduction

Dans le rapport suivant nous présenterons l'étude et la modification de deux sons à filtrer et manipuler dans le but de produire les 8 premières notes de la 5^e symphonies de Ludwig van Beethoven. De plus, nous devons filtrer une sinus de 1000 Hz qui a été ajouté dans un son de basson pour extraire celui-ci.

2. Schéma bloc

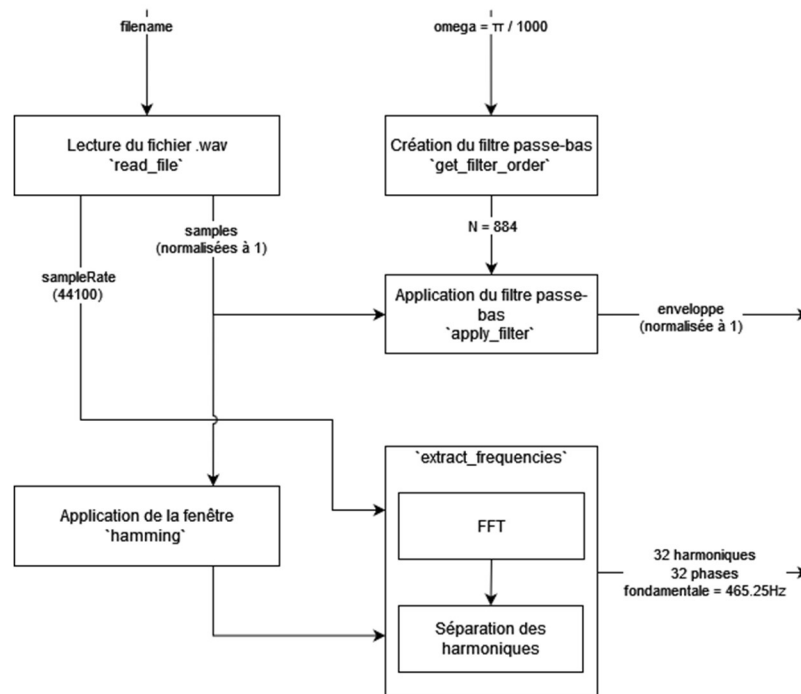
2.1.Extraction des paramètres

L'extraction des paramètres de la note commence par une lecture du fichier .wav pour en ressortir les échantillons audios, normalisés à 1, ainsi que la fréquence d'échantillonnage du fichier audio. Ces informations sont ensuite utilisées à deux endroits :

Dans un cas, les échantillons vont dans une fenêtre de hamming puis une FFT, de laquelle les harmoniques sont séparées. Pour séparer les harmoniques, la fréquence fondamentale est trouvée en cherchant l'échantillon audio ayant la plus haute amplitude. Les harmoniques subséquentes sont trouvées avec les multiples de cet index de fréquence, jusqu'à 32 harmoniques.

Dans l'autre cas, les échantillons se font passer au travers d'un filtre passe-bas, configuré avec un facteur ω de $\frac{\pi}{1000}$, afin de générer une enveloppe du signal audio, qui se fait elle-aussi normaliser à 1.

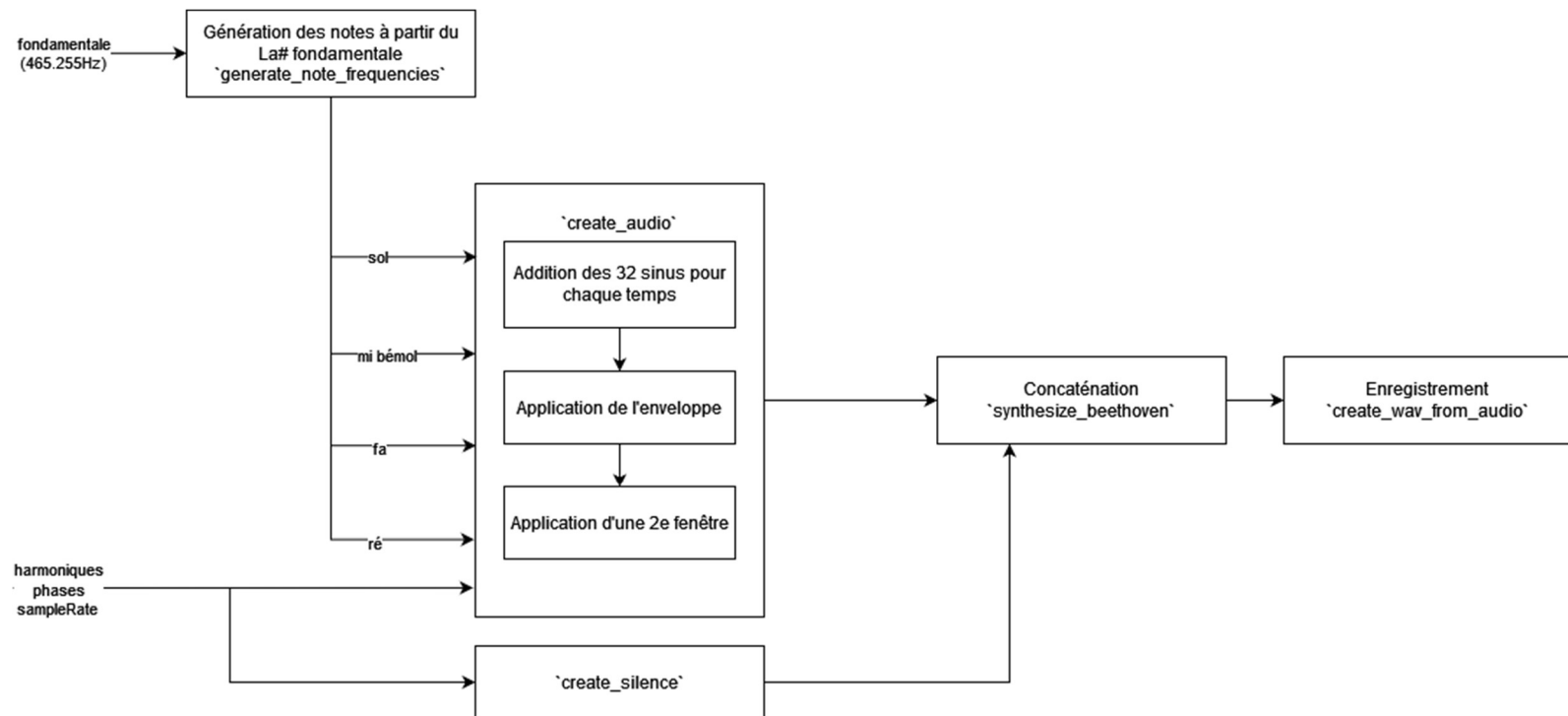
Figure 1 : schéma bloc d'extraction des paramètres



2.2.Synthèse

La synthèse musicale prend les informations de l'extraction des paramètres afin de créer des morceaux. Dans un premier temps, les fréquences des autres notes sont trouvées à partir de la fréquence fondamentale, à l'aide des facteurs fournis. Par la suite, les morceaux sont générés en créant un tableau de temps t , configuré avec la longueur désirée en seconde et la fréquence d'échantillonnage. Pour chaque point dans le temps, 32 sinus, basées sur les harmoniques extraites, décalées par les fréquences trouvées précédemment, sont additionnées. Par la suite, l'enveloppe initiale est appliquée sur le signal. Nous avons essayé d'appliquer une deuxième fenêtre de hamming, ce qui reste une possibilité mais nous n'avons pas été convaincu du résultat. Tout ces segments audios sont concaténés pour recréer la 5^e symphonie de Beethoven.

Figure 2 : Schéma bloc de la synthèse

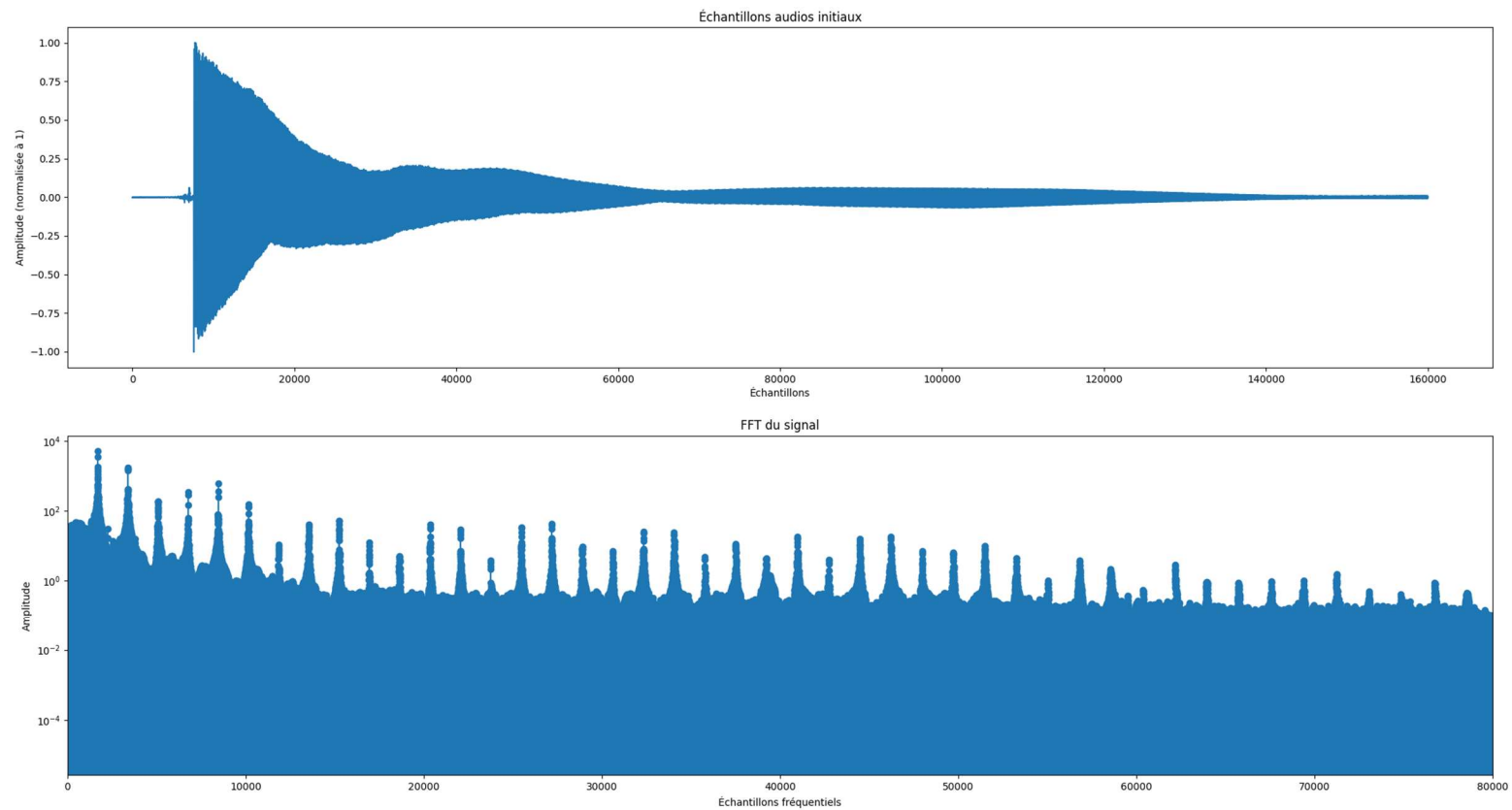


3. Analyse et synthèse

3.1.1. Spectres de Fourier (La#)

Dans l'analyse spectrale de notre échantillon audio du La#, les harmoniques de la note sont très visibles à une intervalle régulière.

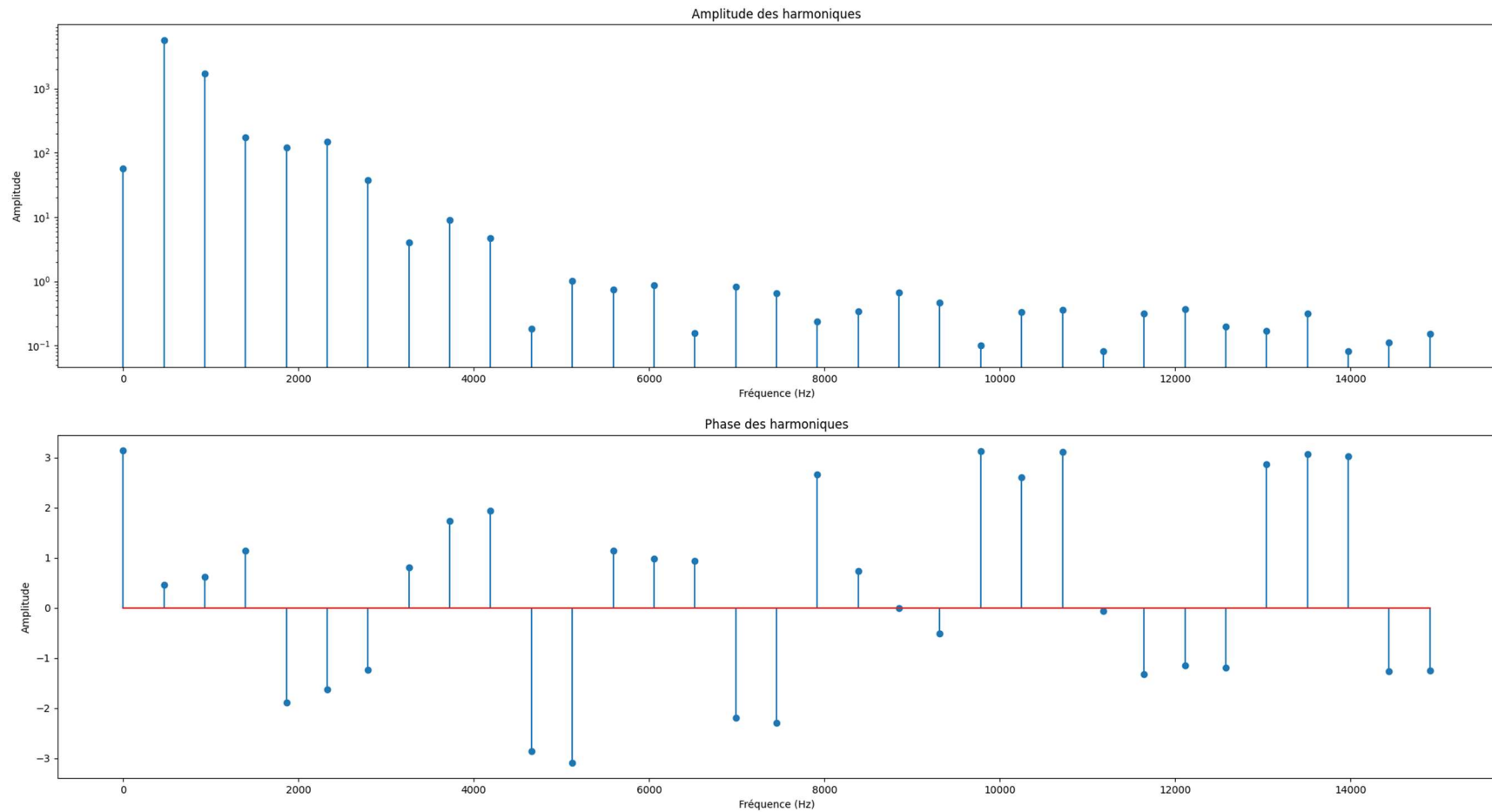
Figure 3 : Échantillons audios initiaux du LA# et transformée de Fourier



3.1.2. Harmoniques obtenues (La#)

En séparant ses harmoniques à partir de la fréquence fondamentale trouvée de 465.80625Hz (voir 2.1), on obtient les deux graphiques ci-dessous, représentant l'amplitude et la phase des harmoniques sélectionnées de la note du La#.

Figure 4 : amplitudes et phases des harmoniques du LA#



3.1.3. Tableaux des fréquences, amplitudes et phases des harmoniques retenues (La#)

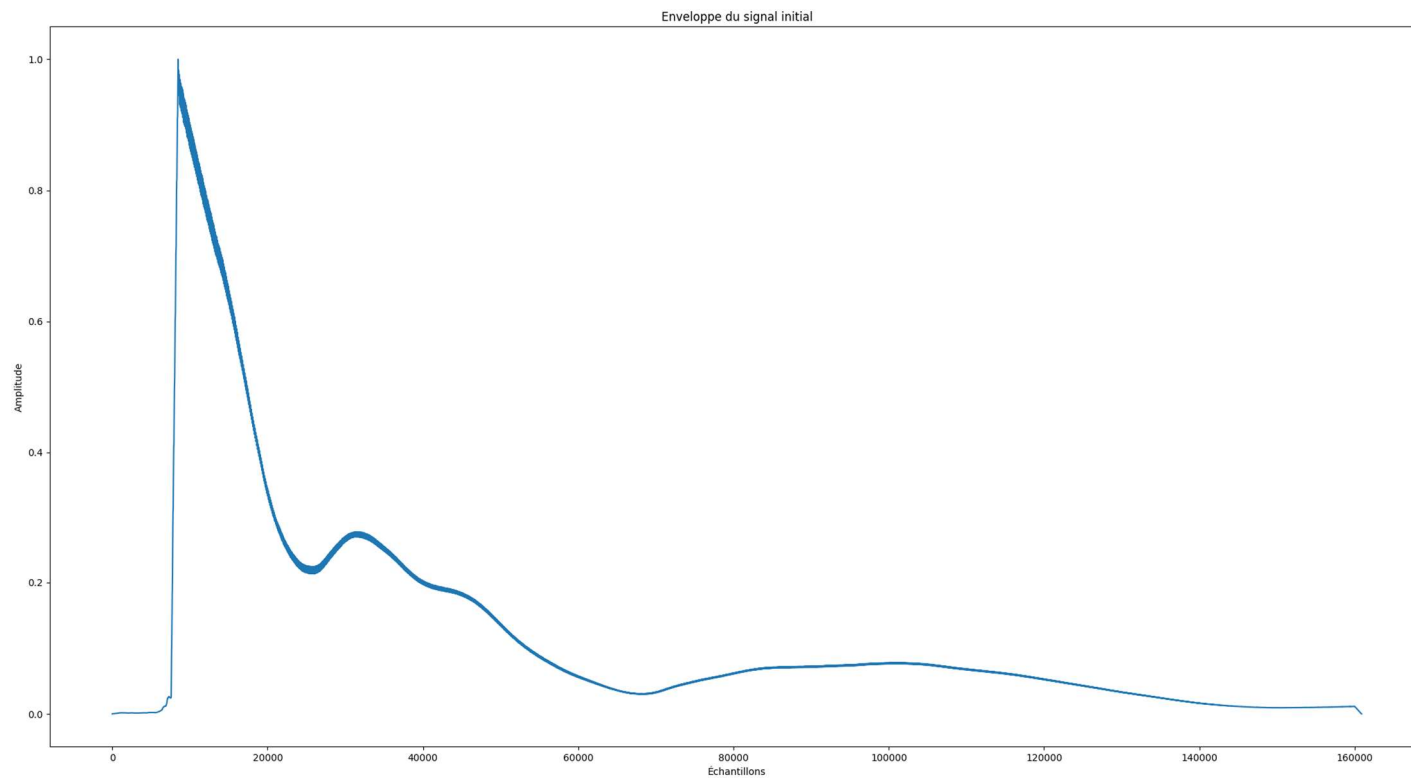
Tableau 1 : fréquences, amplitudes et phases des harmoniques du LA#

Fréquence (Hz)	Amplitude	Phase
0.0	56.563602693602704	3.141592653589793
465.80625000000003	5696.476818451655	0.46255504366324907
931.61250000000001	1723.7792575442784	0.6126820470546785
1397.41875	173.13675204394607	1.1439409139873793
1863.22500000000001	120.5093570296594	-1.8839218058823133
2329.03125	147.83661904709302	-1.6348243993151435
2794.8375	37.41972922092848	-1.2330546917606737
3260.64375	4.027024837375682	0.8122069456029627
3726.45000000000003	9.031294621808488	1.7362881724013872
4192.25625	4.73213739818838	1.93992976980577
4658.0625	0.18250215599582778	-2.8647218936500516
5123.8687500000001	1.008767154118064	-3.0911399865467817
5589.675	0.7413895710200324	1.14722822186951
6055.4812500000001	0.86258755782288	0.9853470827593795
6521.2875	0.15598099790340725	0.9392412715900531
6987.0937500000001	0.8217428152953669	-2.188235894010074
7452.90000000000001	0.6480823542900153	-2.290216839133623
7918.70625	0.23773878390572795	2.658536895054225
8384.5125	0.34453737362418396	0.739549068490159
8850.31875	0.6788696464124503	-0.0044758114072458695
9316.125	0.46360144768196354	-0.5050298938157664
9781.9312500000001	0.10175410989024392	3.1307048918274054
10247.7375000000001	0.33475321419912063	2.60628589878429
10713.54375	0.3639045512306231	3.1131594614135
11179.35	0.08082228813419867	-0.06030713394237021
11645.15625	0.3149815286899557	-1.317903728439425
12110.9625000000001	0.3646752373655427	-1.1491752595235802
12576.7687500000001	0.19701930113821384	-1.195231720779619
13042.575	0.17061425566058164	2.862669342760699
13508.38125	0.3132345564332837	3.0685545199040125
13974.1875000000002	0.08201770130653101	3.026266604718876
14439.9937500000001	0.11080724432829228	-1.2714806228286304
14905.8000000000001	0.15414316822042334	-1.249143056567957

3.1.4. Graphique des enveloppes temporelles obtenues (La#)

L'enveloppe temporelle a été générée en convoluant le signal d'entrée redressé par un filtre passe-bas, conçu pour couper à une fréquence $\omega = \frac{\pi}{1000}$. Dans notre cas, nous avons normalisés l'enveloppe à 1 pour pouvoir l'utiliser comme facteur multiplicatif par la suite. Cette enveloppe a été générée avant l'application d'une fenêtre de Hamming sur le signal. Elle représente bien le signal d'entrée redressé.

Figure 5 : enveloppe du LA#



3.2. Basson

3.2.1. Spectres de Fourier

Dans les deux graphiques suivants, nous pouvons observer les spectres de Fourier. Dans la première figure, on voit l'original qui nous donne la référence et pour faciliter la visualisation de la coupe de fréquence à 1000 Hz, nous avons placé notre axe des fréquences de 0 à 1500. Ainsi, si nous observons la partie à 1000 Hz des deux figures nous observons une perte significative d'amplitude après le filtrage.

Figure 6 : spectre de Fourier du basson original

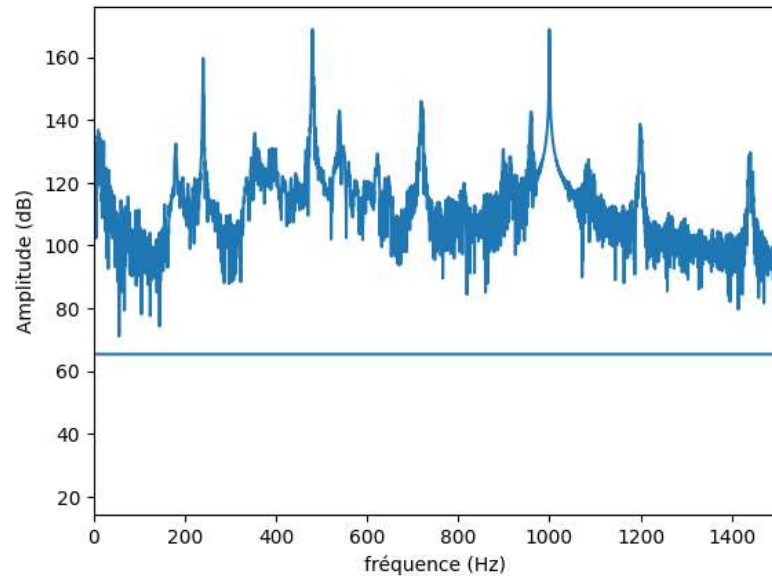
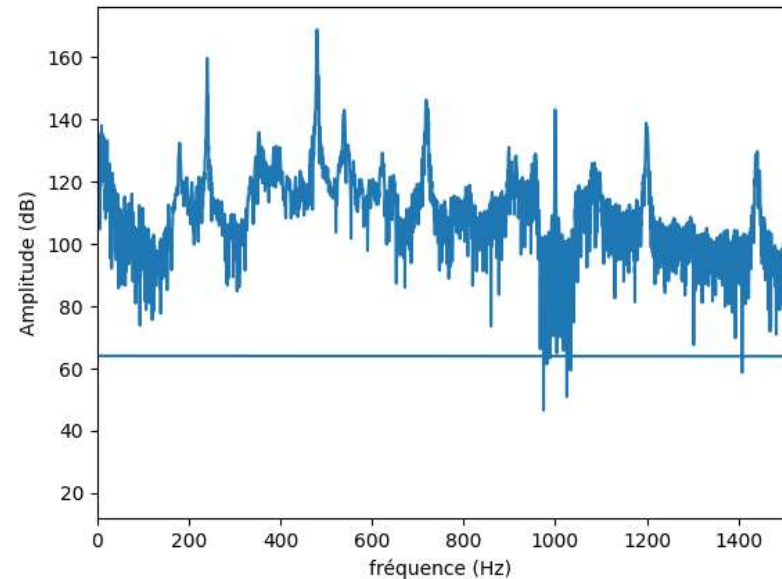


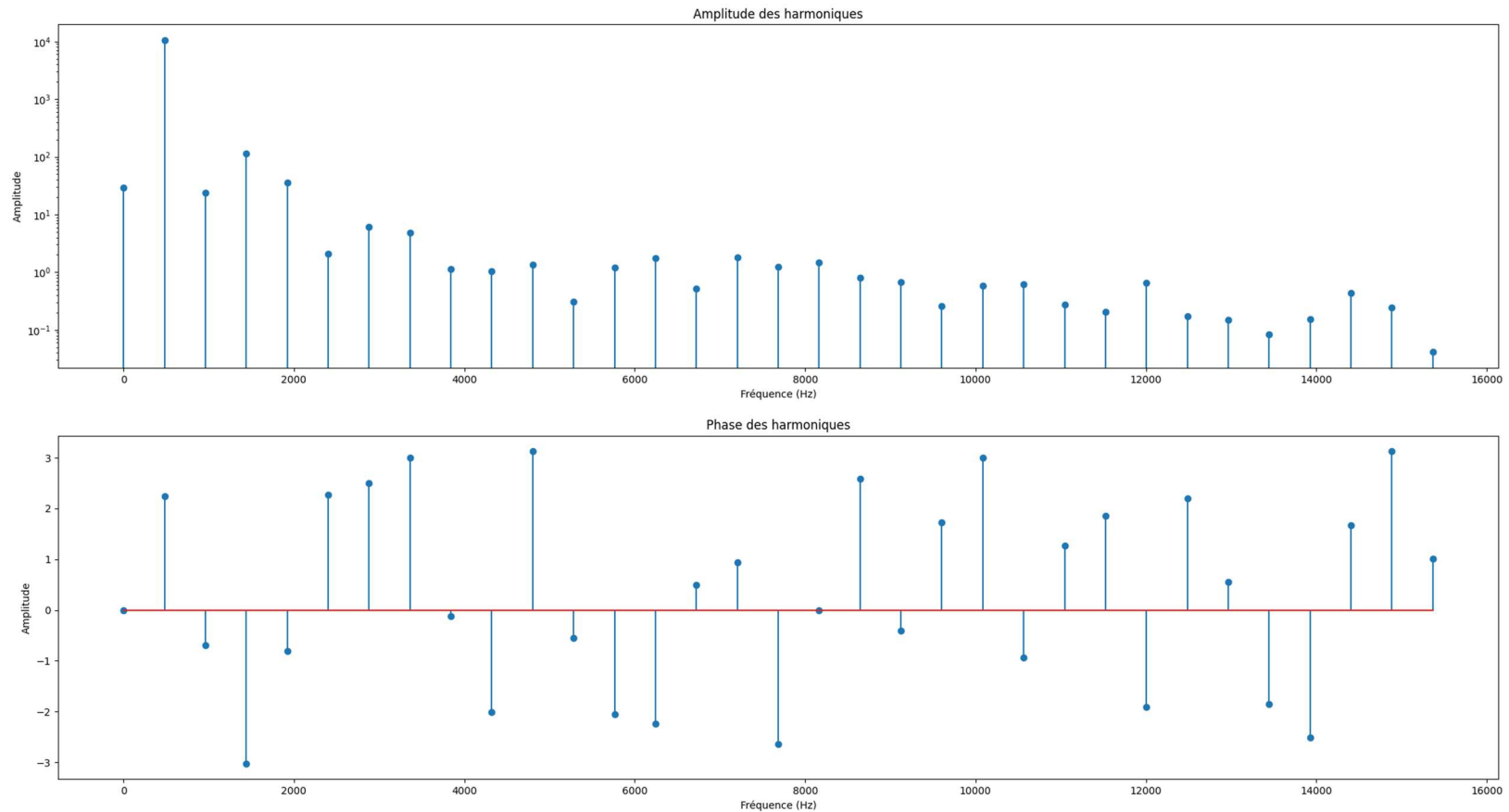
Figure 7 : spectre de Fourier du basson final



3.2.2. Harmoniques (Basson)

Après l'application des filtres coupe-bande, nous avons obtenus un nouveau signal et dans le but de poursuivre l'analyse nous avons reproduit le processus vu dans la 3.1 pour réobtenir une suite d'harmonique complet pour le basson.

Figure 8 : amplitudes et phases des harmoniques du basson



3.2.3. Tableaux des fréquences, amplitudes et phases des harmoniques retenues (Basson)

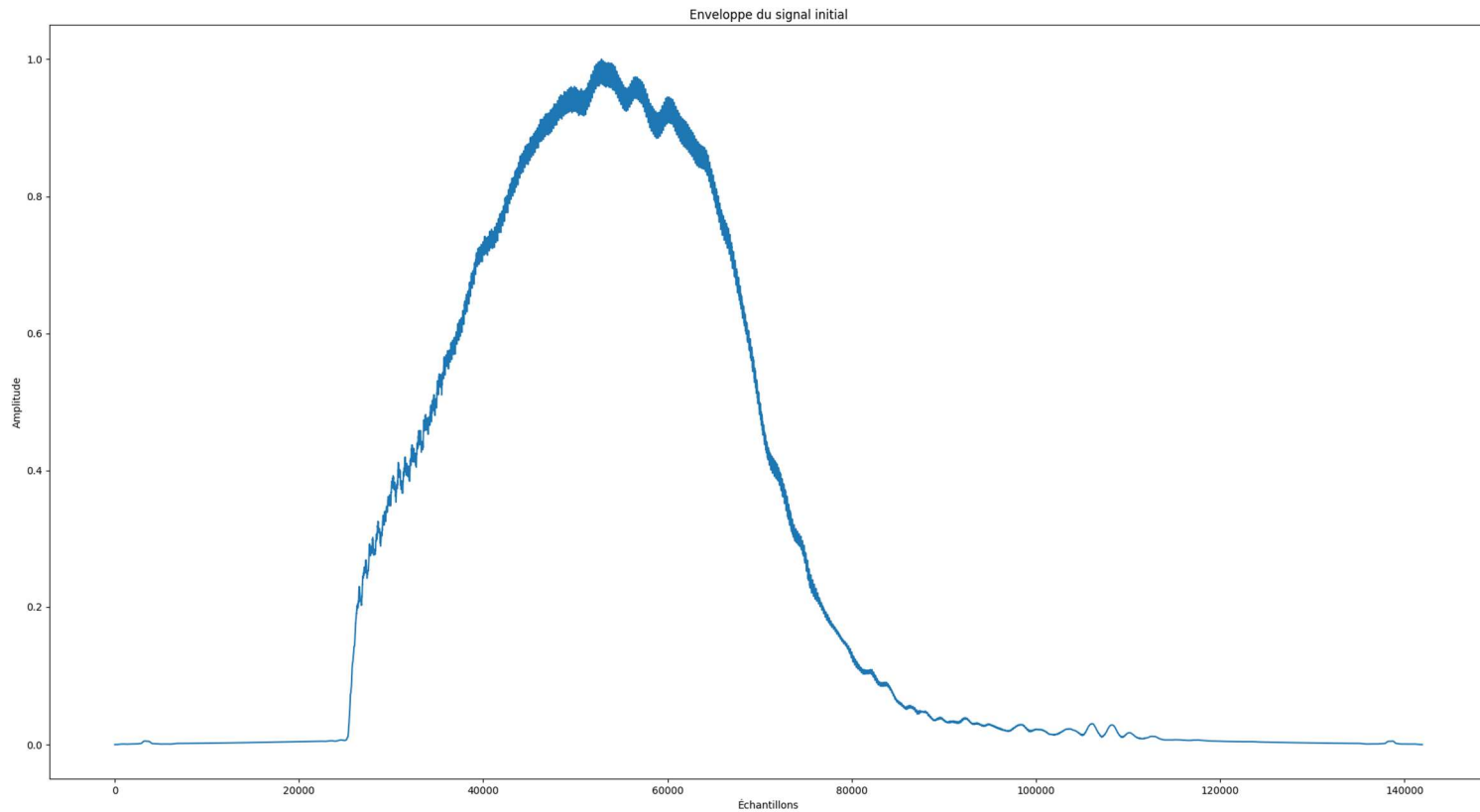
Tableau 2 : fréquences, amplitudes et phases des harmoniques retenues

Fréquence (Hz)	Amplitude	Phase
0.0	29.504022499365735	0.0
480.2382133995037	10633.133240575717	2.2464154035688484
960.4764267990074	23.65933220563114	-0.6969108354979708
1440.714640198511	113.14205180173595	-3.025420909874855
1920.9528535980148	35.63750773936771	-0.8076067383469597
2401.1910669975186	2.0738727088223796	2.26975460804198
2881.429280397022	6.067190938172004	2.5009748682487474
3361.667493796526	4.901062517859552	2.998108363183088
3841.9057071960297	1.1312759178345226	-0.11267189814171857
4322.143920595533	1.0406203673359122	-2.0029420024425777
4802.382133995037	1.3667340531732988	3.1308635618242304
5282.620347394541	0.30479224791722787	-0.5506091342017548
5762.858560794044	1.2072887311805731	-2.0511957104856333
6243.096774193548	1.7704214239066878	-2.2415664158606523
6723.334987593052	0.5123070892328959	0.5000454191289596
7203.573200992556	1.7843815477575664	0.9461551118321708
7683.811414392059	1.2391053656922064	-2.6454532747343023
8164.049627791563	1.4907411092633822	-0.008958206866223967
8644.287841191066	0.8114220664942812	2.583187779078237
9124.526054590571	0.6753698749637964	-0.41310258756911633
9604.764267990075	0.26028281499855044	1.7297270900590813
10085.002481389578	0.5749758182263658	2.995909968557046
10565.240694789081	0.6117055196181962	-0.9369873255930955
11045.478908188585	0.2781088999578492	1.2697427648370874
11525.717121588088	0.20496513592713694	1.8585437338698276
12005.955334987593	0.6606661714224464	-1.9131774206841472
12486.193548387097	0.17034635539722856	2.1973579091522923
12966.4317617866	0.15042525484196997	0.5509611483246504
13446.669975186103	0.08271167358663645	-1.8533623257347747
13926.908188585607	0.1529271362373983	-2.505490079996791
14407.146401985112	0.4321694816984216	1.6736892623259965
14887.384615384615	0.24086073042766099	3.1284036231413825
15367.622828784119	0.04109253885370916	1.0128733024043326

3.2.4. Graphique des enveloppes temporelles obtenues (Basson)

Pour obtenir, l'enveloppe du basson nous avons appliqué le filtre dans l'exacte même procédé décrit dans 3.1 pour ainsi obtenir la figure suivante. De plus, celle-ci est très concluante, car elle nous permet d'avoir une note rallongé dans le temps avec une amplitude dynamique représentant mieux la vie réel.

Figure 9 : enveloppe du basson



4. Filtre Passe-Bas RIF

4.1. Calculs de la longueur N du filtre passe-bas

Pour le calcul de la longueur N du filtre passe bas. Nous avons utilisé l'équation de $|H(\omega)|$ suivante en connaissant 2 valeur de $H(\omega)$ pour isoler le $h(n)$. Avec ce $h(n)$, nous pouvons maintenant itérer avec différents N en sommant chaque valeur de ω et comparer la valeur à $\pi/1000$ qui vaut -3 dB. Nous avons ainsi obtenu $N = 884$.

$$(1) |H(\omega)| = \sum h(n)e^{-j\omega n}$$

$$(2) 0 \text{ dB} = \sum h(n)e^{-j0n}$$

$$(3) 1 = \sum h(n)e^{-j0n}$$

$$(4) 1 = h(n) \times N$$

$$(5) h(n) = 1/N$$

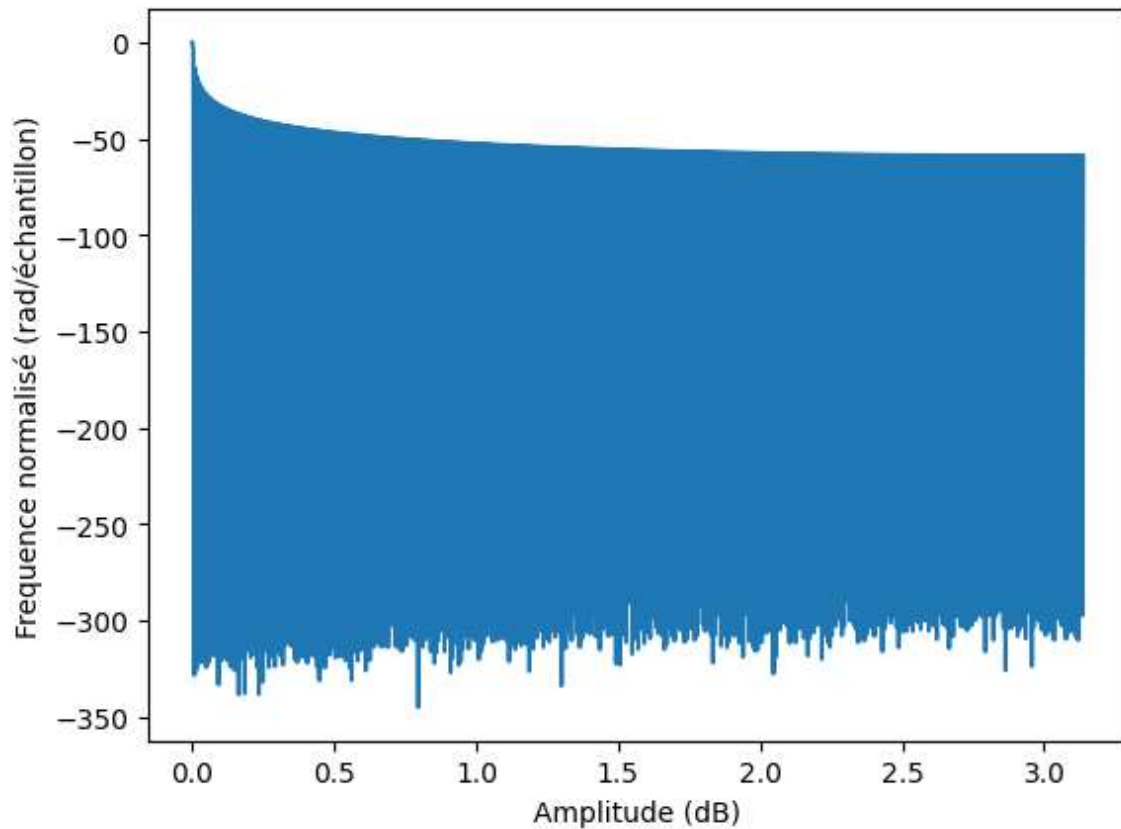
$$(6) -3 \text{ dB} = 1/N \sum e^{-j\frac{\pi}{1000}n}$$

$$N = 884$$

4.2. Graphique de la fonction de réponse en fréquence (amplitude seule, en dB)

La réponse en fréquence du filtre passe-bas visible dans le graphique ci-dessous, nous pouvons constater que nous avons effectivement un gain de 0 dB à 0 et d'une descente progressive de l'amplitude après $\pi/1000$ qui est à -3 dB.

Figure 10 : amplitude du filtre passe bas en fonction de fréquence normalisé



5. Filtre Coupe-bande RIF

5.1. Équation aux différences et le calcul des valeurs des coefficients

Avec l'utilisation de la méthode de la fenêtre, on a obtenu notre hLp qui représente la fonction du filtre passe-bas de notre cas. Ensuite avec cette hLp, nous avons calculer le h(n) avec l'équation 10 on obtient le h(n) qui est l'ensemble des coefficients qu'on place dans la sommation avec (x-K).

$$(7) \omega_0 = \frac{2 \times fc1 \times \pi}{fe} \text{ pour } fc1 = 1000, N = 6000, fe = 41000$$

$$(8) m = \frac{fc2 \times N}{fe} \text{ pour } fc2 = 40$$

$$(9) k = 2 \times m + 1$$

$$(10) hLp = \frac{\frac{\sin \pi nk}{N}}{\frac{\sin \pi n}{N}} \text{ pour } n! = 0 \text{ et } hLp = \frac{k}{N} \text{ pour } n = 0$$

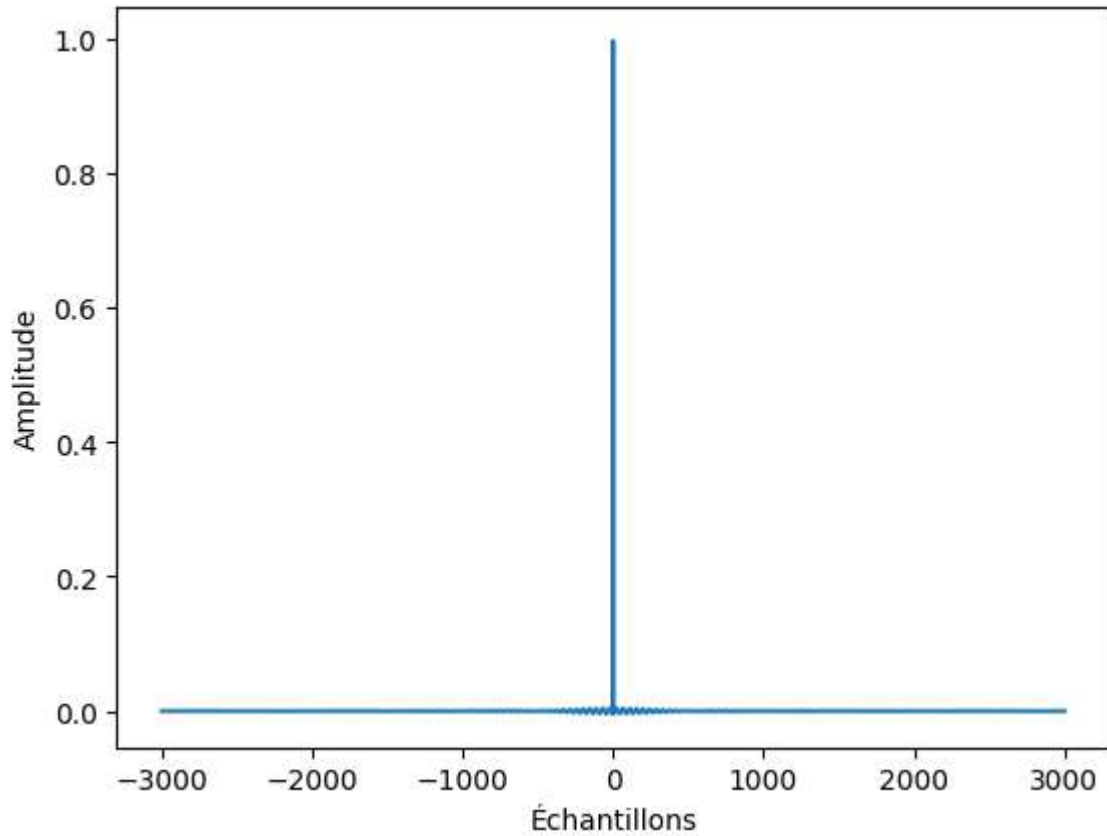
$$(11) h(n) = \delta_n - 2(hLp \times \cos \omega_0 n)$$

$$(12) |H(\omega)| = \sum h(k) \times [n - k]$$

5.2. Graphique de la réponse à l'impulsion $h(n)$

Comme observé dans la figure suivante, la réponse impulsionnelle de notre filtre maintient presque la valeur de l'impulsion Dirac, car nous coupons qu'une seule mince bande de fréquences de celle-ci, ce qui induit de légère impulsion quasiment imperceptible.

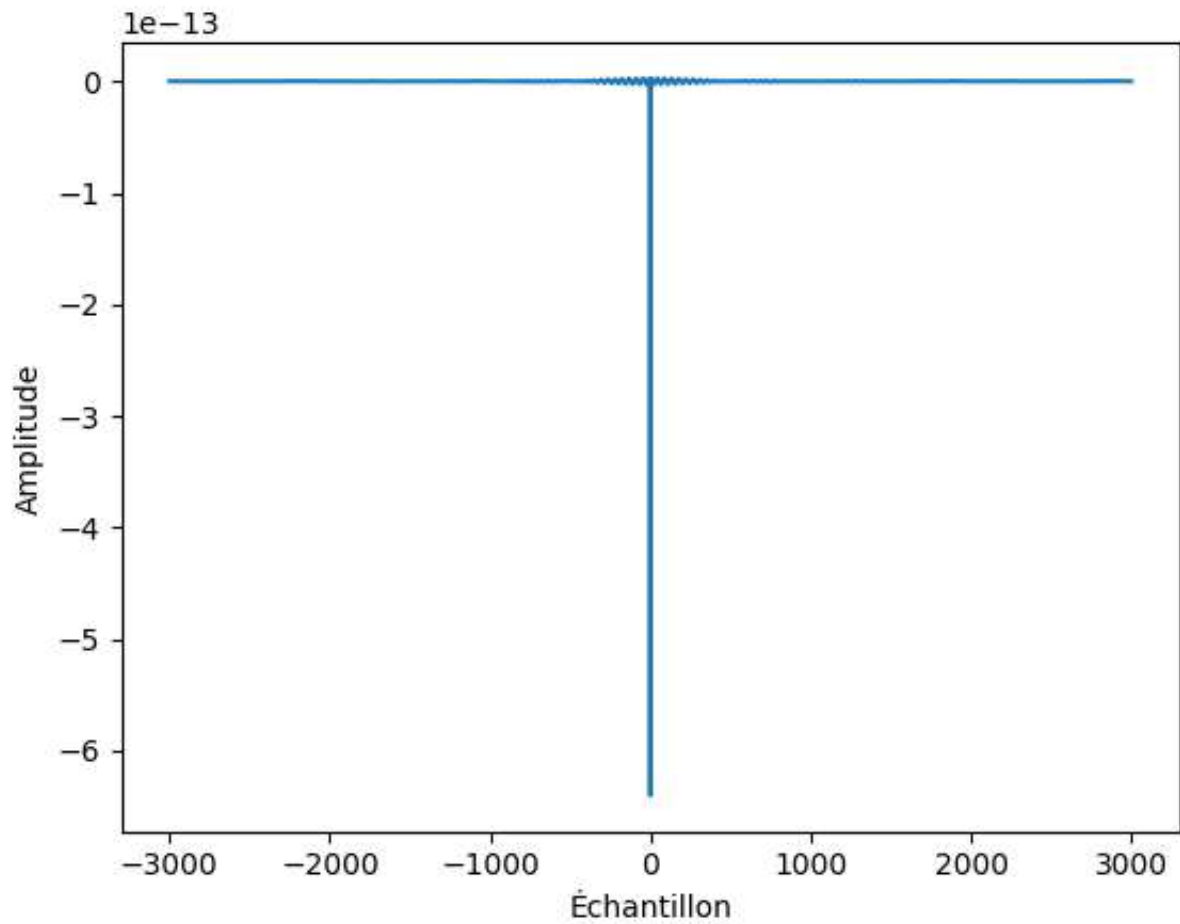
Figure 11 : figure de $h(n)$ centré de



5.3. Graphique de la réponse à une sinusoïde de 1000 Hz

La réponse montre bien que notre filtre retire entièrement le signal en ayant une sortie nulle.

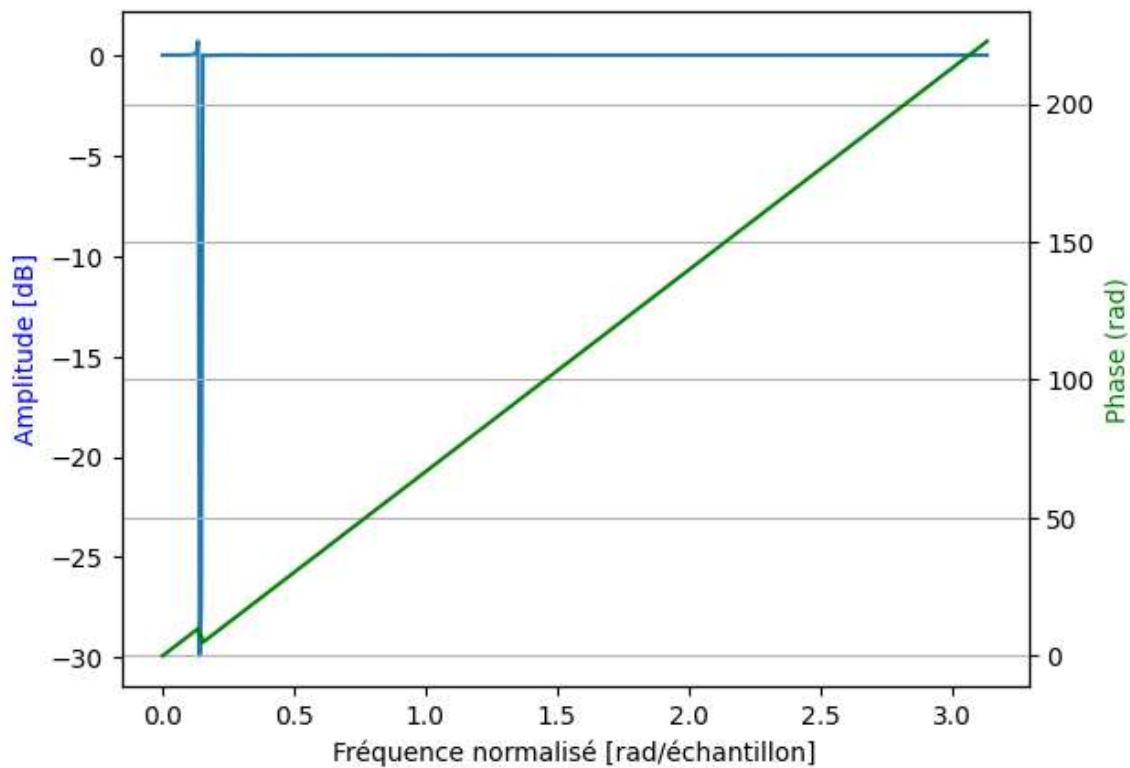
Figure 12 : résultante de la sinus à 1 kHz



5.4. Graphiques amplitude et phase de la réponse en fréquence

Dans la réponse en fréquence de notre filtre pour l'amplitude nous voyons la présence d'une coupe à 1000 Hz qui tombe à -30 dB et qui retourne directement à 0 dB par la suite. Pour ce qui est de la phase, puisque nous avons utilisé la méthode de la fenêtre la phase est supposé être une droite et c'est effectivement le comportement observé.

Figure 13 : réponse en fréquence du filtre coupe-bande



5.5. Graphiques des spectres d'amplitude des signaux basson avant et après filtrage

L'image de la figure 6 représente l'amplitude du basson avant toute modification ce qui nous permet d'obtenir une image de référence. Ensuite dans la figure 7 on voit les modifications présentes après le filtrage et donc le retrait du sinus à 1 kHz. De plus, nous avons appliqué ce filtre en cascade et une fenêtre Hamming pour obtenir un son réellement plus viable.

Figure 14 : spectre d'amplitude du basson original

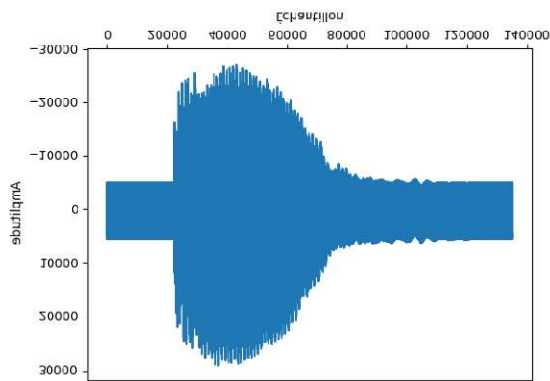


Figure 15 : spectre d'amplitude du basson après filtrage

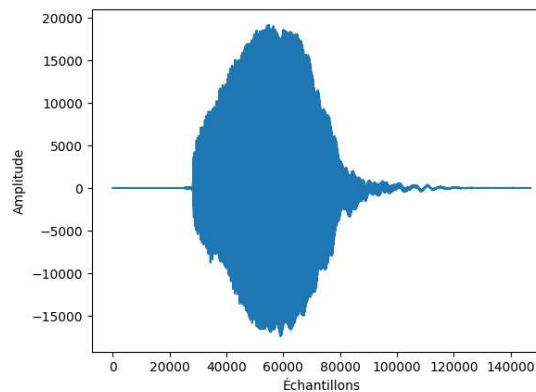
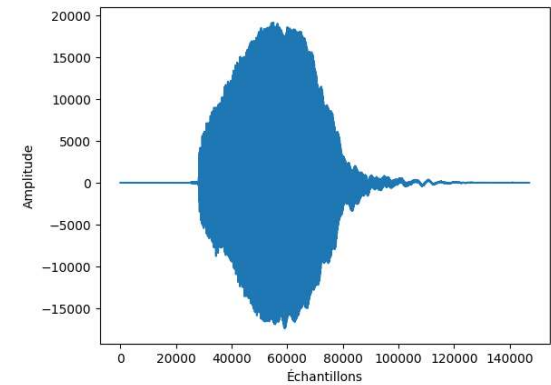


Figure 16 : spectre d'amplitude du basson après filtrage en cascade et fenêtre



6. Conclusion

En conclusion, nous avons pu recréer la symphonie de manière très concluante, après avoir extrait les harmoniques, fenêtré et filtré le LA#. Pour pouvoir générer les autres notes et joué la symphonie. Pour ce qui est du basson la création du filtre par la méthode de la fenêtre nous a permis de retirer de manière efficace le sinus aberrant et d'obtenir un son réellement de bonne qualité.