2017

Étude et réalisation – Semestre 4

ACCORDEUR DE GUITARE

IUT De Nantes

BIZON Alexis; METAYER Simon

PEI

Étude et réalisation – Semestre 4

Accordeur de Guitare

Table des matières :

Table des Illustrations :

0. Introduction

Les 6 cordes d'une guitare sont généralement accordées comme suit : Mi La Ré Sol Si Mi. Le respect des écarts de notes entre les cordes (en demi-tons : 5 / 5 / 5 / 4 / 5) est impératif pour jouer seul. Le respect des notes absolues est impératif pour jouer à plusieurs.

0.1 Objectif

L'objectif de ce projet est de réaliser un accordeur pour guitare électrique à base de microcontrôleur. Ce projet est proposé et encadré par P.Graziotin.

0.2 Cahier des charges

- Affichage de la note jouée et de sa fréquence (afficheur / PC)
- Indications de la consigne de réglage de la corde (LED : corde trop grave / accordée / trop aigüe)

0.3 Travail à réaliser

- Étude de la gamme de fréquences à considérer
- Bloc diagramme fonctionnel
- Choix du microcontrôleur (pas d'Arduino à priori)
- Réalisation sur platine de prototypage (Guitare simulée par un générateur BF)
- Analyse du signal généré par les micros de la guitare
- Réalisation finale de l'accordeur sur platine de prototypage
- Éventuellement, réalisation du circuit imprimé
- Rédaction de la documentation associée au développement du projet
- Présentation du projet

1. Accordeur de constante

1.1 Problématique

La première problématique est de réaliser un accordeur de signal non physique sur microcontrôleur, capable :
- De traiter une fréquence constante donnée lors de la compilation
- D'associer toutes les fréquences possibles à la note la plus proche et son octave associée
- D'indiquer à l'utilisateur la note la plus proche de la fréquence donnée et son octave
- D'indiquer à l'utilisateur à l'aide de 3 LED si celui-ci doit augmenter ou réduire la fréquence pour tomber pile sur la note.

1.2 Solutions

1.2.1 Calculs de notes…

Posons le décor :

Tout son musical possède une fréquence fondamentale et des harmoniques, l'emplacement du fondamental définit la note indépendamment de son amplitude. La plage de fréquence audible théorique pour un être humain adulte est de 20 Hz à 20 000 Hz, mais en réalité les tests d'audiométrie classiques négligent ces extrémités de la bande de fréquence, se limitant à une auscultation de la bande comprise entre 125 et 8 000 Hz. Deux notes dont les fréquences fondamentales ont un rapport qui est une puissance de deux donnent deux sons très similaires et portent donc le même nom. Cette observation permet de regrouper toutes les notes qui ont cette propriété dans la même catégorie de hauteur (do, ré, mi…).

Dans la musique occidentale, les catégories de hauteurs sont au nombre de douze. Sept d'entre elles sont considérées comme les principales et ont pour noms : do, ré, mi, fa, sol, la et si. L'intervalle compris entre deux hauteurs dont la fréquence de l'une vaut le double (ou la moitié) de l'autre s'appelle une octave. Pour distinguer deux notes de même nom dans deux octaves différentes, on numérote les octaves et donne ce numéro aux notes correspondantes : par exemple, le LA3 ; le 3 indique l'octave et le LA, la hauteur, celui-ci correspond à 440 Hz. Cette fréquence de référence est donnée par un diapason. Nous utiliserons régulièrement cette notation dans ce rapport.

Dans la gamme tempérée (comprenez les 8 premières octaves), la formule permettant de mesurer la fréquence d'une note par rapport à une note de départ est : $F_n = F_0 \times 2^{n/12}$ Avec n le nombre de demi-tons au-dessus de la note de départ F_0.

Exemple avec $F_0 = 440$ Hz *et* $n = 2$ *on obtient* $F_n = 440 \times 2^{2/12} = 493.88$ Hz *ce qui correspond bien à deux cases après le LA3 (*440 Hz*) soit un SI3.*

Ce calcul nous permet donc de compléter le tableau ci-dessous :

Note/octave	0	1	2	3	4	5	6	7
do ou *si*♯	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00	4186,01
do♯ ou *ré*♭	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46	4434,92
ré	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32	4698,64
ré♯ ou *mi*♭	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02	4978,03
mi ou *fa*♭	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02	5274,04
fa ou *mi*♯	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83	5587,65
fa♯ ou *sol*♭	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96	5919,91
sol	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96	6271,93
sol♯ ou *la*♭	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44	6644,88
la	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00
la♯ ou *si*♭	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31	7458,62
si ou *do*♭	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07	7902,13

FIGURE 1: TABLEAU DES 8 PREMIERES OCTAVES

NB : Le calcul fonctionne avec un n négatif pour remonter les colonnes et peut également sauter les colonnes

Exemple : Avec $F_0 = 440$ Hz *et* $n = -12$ *on obtient* $F_n = 440 \times 2^{-12/12} = 220$ Hz *on obtient bien la note 12 cases avant soit un LA2.*

Ce calcul nous permet donc de trouver toutes les notes à partir du seul LA3 440 Hz, ce qui évite la multiplicité des constantes dans notre code.
De plus, ces équations nous permettent de récupérer la note la plus proche associée à une fréquence :

On part de : $F_n = F_0 \times 2^{n/12}$ Et on exprime n en fonction de F_0 et F_n soit : $n = \frac{\log((\frac{F_n}{F_0})^{12})}{\log 2}$

Exemple : On cherche à accorder une fréquence de 99 Hz soit presque un SOL1 qui normalement vaut 98 Hz, on applique donc la formule :

$n = \frac{\log((\frac{F_n}{F_0})^{12})}{\log 2} = \frac{\log((\frac{99}{440})^{12})}{\log 2} = -25.82$ *Il suffit ensuite d'arrondir à l'unité la valeur trouvée pour déduire le rang relatif au LA3. On obtient donc -26, en regardant le tableau de notes calculées précédemment on compte -26 cases avant le LA3 et on obtient bien un SOL1 98 Hz.*

Ce calcul nous permet donc de déduire quelle est la note la plus proche de la fréquence envoyée avec un rang relatif au LA3 fondamental.

1.2.2 Choix du microcontrôleur

Nous choisissons d'utiliser un SAMD21J18A monté sur une carte Xplained-pro pour plusieurs raisons :

- La puissance de calcul ; en effet celui-ci tourne à 48 MHz contre les 16 MHz d'une Arduino classique ce qui risque d'être nécessaire pour les calculs de FFT ou DFT que nous étudierons ultérieurement.
- La présence d'un module OLED à l'IUT permettant un affichage sur écran avec 4 lignes, et également la présence de 3 LED, que nous utiliserons pour l'affichage trop bas/bien/trop haut, des accordeurs classiques.
- Notre connaissance de l'appareil, car nous utilisons celui-ci depuis plusieurs projets déjà ce qui permet une réutilisation des bibliothèques de bases.

1.2.3 Portabilité du projet

Nous avons choisi, pour intégrer un nouvel outil professionnel et gérer plus efficacement notre code d'utiliser GitHub. GitHub est un service web d'hébergement et de gestion de développement de logiciels, utilisant le logiciel de gestion de versions Git. Le site assure également un contrôle d'accès et des fonctionnalités destinées à la collaboration comme le suivi des bugs, les demandes de fonctionnalités, la gestion de tâches et un wiki pour chaque projet.

Tout le projet sera donc par la suite référencé directement par des liens comme celui-ci : PROJET menant directement sur GitHub à l'endroit où est hébergé notre code. La plupart des références mèneront directement à la ligne de code concerné.

1.3 Code

Nous commençons par déclarer ICI toutes les notes avec la méthode de calcul décrite ci-dessus basée sur le LA3 à 440 Hz. La définition est très calculatoire, mais permet de ne disposer que d'une SEULE constante dans tout le système de note.
Nous ajoutons également des définitions conditionnelles ICI qui renvoient la fréquence associée à une note et à son degré, donc si on écrit SOL(5) quelque part dans le code celui-ci nous renvoie la fréquence calculée soit précisément : 1567.98 Hz

Maintenant que les définitions basiques sont posées, nous allons gérer l'affichage. Les fonctions associées seront codées dans un fichier display.c. Ce fichier dispose de 4 fonctions d'affichage brut sur le LCD, displayTitle, displayNote, displayFrequence et displayDegre, chaque paramètre est affiché sur sa propre ligne. Il dispose également d'une fonction diplayLedIndicator, qui allume les LED du module OLED en fonction de la correspondance de la note ciblée avec la fréquence envoyée.

Nous réalisons par la suite la fonction noteSolver qui contient simplement le calcul $n = \frac{\log((\frac{Fn}{F0})^{12})}{\log 2}$ Expliqué précédemment, et permet de trouver la note la plus proche à la fréquence choisie parmi DO, RE…
S'en suit la réalisation de la fonction degreSolver qui à partir du même calcul renvoie le degré/octave associé à la fréquence choisie. Ces deux fonctions Solver nous permettent de « résoudre » la fréquence et de calculer la note et le degré/octave

Exemple : avec la fréquence arbitraire 49 Hz, on obtient un SOL en utilisant noteSolver, et un 0 en utilisant degreSolver, ce qui nous permet par la suite d'afficher SOL0. N. B. On aurait obtenu la même chose avec 48 Hz, car notre Solver « comprend » quelle est la note la plus proche d'après le tableau en : Figure 1.

Pour finir, nous réalisons la fonction accorder qui déduit à partir de la fréquence envoyée, et des fréquences connues du tableau (Figure 1), si la fréquence est trop haute, trop basse, ou correcte. Nous introduisons aussi une erreur relative en %. En effet, pour l'instant nous imposons la fréquence au système en tant que constante (ici 49 Hz), mais par la suite, celle-ci sera mesurée et forcément imprécise, or notre système ne définira jamais la note comme accordée si celui-ci vise 49 Hz pile. (On pourrait se retrouver avec des situations ou l'instrument joue 49,0001 Hz et l'accordeur considère celle-ci fausse). On peut donc par exemple considérer que de 48,9 à 49,1 la note est correctement accordée, et aucune oreille humaine ne saurait faire la différence.

Pour cette version d'accordeur de « constante », la fréquence est définie dans le main avant la compilation, le projet ne dispose pas de système d'acquisition de fréquence pour le moment.

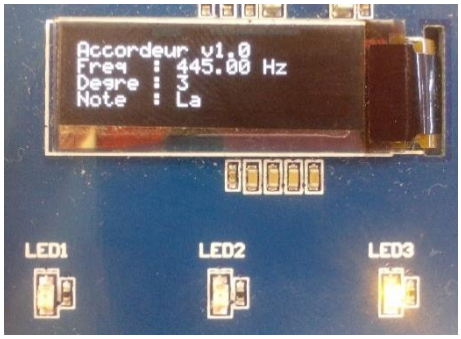
Le main qui utilise les fonctions décrites précédemment avec ici 49 Hz de fréquence :

```
/*
* Accordeur de Guitare
* Authors : METAYER Simon & BIZON Alexis
* Created Date : 23/01/17
* Version : 1.0
*/

#include "define.h" // inclusion des fichiers contenant toute les fonctions

int main(void)//fonction principale du programme
{
	float freq = 49;//contient la fréquence mesurée de la note
	char note = 0;//contient la note calculée à partir de la fréquence, voir les différentes valeurs dans define_notes.h
	char degre = 0;//contient le degré, ou l'octave de la note calculée à partir de la fréquence
	float relativeError = 1.0;//spécifie l'erreur relative autorisée en % entre la fréquence mesurée et la fréquence réelle correspondant à la note
	setup();//Fonction d'initialisation
	displayTitle();//affiche le titre du projet en haut de l'écran OLED
	while(1)
	{
		note = noteSolver(freq);//permet de déterminer la note correspondant à la fréquence mesurée
		degre = degreSolver(freq);//permet de déterminer le degré ou l'octave correspondant à la fréquence mesurée
		char acc = accorder(note, degre, freq, calculAbsError(relativeError, freq));//Permet de déterminer si la note est accordée, trop basse ou trop haute
		diplayLedIndicator(acc); // Allume les LED en fonciton de l'indicateur : trop bas / ok / trop haut
		displayFrequence(freq);//On affiche la fréquence sur l'afficheur OLED
		displayNote(note);//On affiche la note sur l'afficheur OLED
		displayDegre(degre);//On affiche le degré sur l'afficheur OLED
	}
	return 0;//Le programme renvoi 0x0000 si l'exécution c'est correctement terminée
}
```

1.4 Tests

Premier test : Avec la fréquence 49 Hz

Le calcul théorique donne : $F_n = 440 \times 2^{-38/12} = 49{,}999\ Hz$ et correspond bien à un SOL0. (Voir Figure 1).
La note est donc correctement accordée c'est la LED2 du milieu qui s'allume



Second test : Avec la fréquence à 445 Hz

Le calcul théorique donne : $F_n = 440 \times 2^{0/12} = 440\ Hz$ et correspond bien à un LA3. (Voir Figure 1).
Seulement la fréquence ici est 5 Hz trop haut, c'est donc la LED3 de droite qui s'allume pour indiquer que la note doit être descendue. La LED3 s'éteindra vers 443 Hz.

Troisième test : Avec la fréquence à 4870 Hz

Le calcul théorique donne : $F_n = 440 \times 2^{42/12} = 4978{,}03\ Hz$ et correspond bien à un MIb7. (Voir Figure 1).
Seulement la fréquence est 8,3 Hz trop basse, c'est donc la LED1 de gauche qui s'allume pour indiquer de remonter la fréquence.

FIGURE 2: TESTS N°1

1.5 Conclusion

Nous avons donc réalisé un accordeur de base dans sa partie fonctionnelle et IHM. De plus nous avons réalisé tous les calculs mathématiques permettant une interprétation « musicale » (octaves, notes etc…) des grandeurs et une traduction suivant les normes de la musique (Ex : LA3, SI2…).

Toute la partie Accordeur à proprement parlé est donc finalisée (sous réserve d'améliorations). Nous allons pouvoir passer à la partie acquisition d'un signal et traitement de celui-ci en procédant par étapes.

2. Accordeur de signal carré

Pour procéder par étapes dans l'acquisition et le traitement du signal, nous allons d'abord faire l'acquisition d'un signal carré et tenter de l'accorder correctement.

2.1 Problématiques

- Acquisition du signal carré.
- Traitement du signal carré pour extraire la fréquence
- Accorder le signal carré.

2.2 Solutions

2.2.1 Acquisition

Utiliser un signal carré présente un avantage majeur. Celui-ci n'a pas forcément besoin d'être traité en ADC (Analogic to Digital Converter). Il suffit simplement de le passer dans une entrée du microcontrôleur contenant un traitement EIC (External Interrupt Controller) et ainsi chaque front montant (ou descendant ; au choix) génèrera une interruption système. Nous précisons ici que le signal carré sera évidemment absolu, et sera donc compris entre 0v et +3.3 v pour le bien de notre microcontrôleur samd21, qui n'accepte pas les tensions négatives dans cette configuration. (Nous arrangerons cette anomalie par la suite pour les signaux positifs ET négatifs).

2.2.2 Fréquencemètre

Pour mesurer la fréquence, on lance un timer lors de l'interruption générée par le 1er front, qui comptera (en ticks) le temps qui passe, puis on arrête le timer au front suivant. Ainsi on connait le temps passé (en ticks) entre deux fronts montants.
Pour connaitre le « vrai temps » passé entre deux interruptions, il suffit de savoir quel est le « vrai temps » en secondes passé entre deux ticks (soit la période du timer) et de le multiplier au nombre de ticks : $t = Nb_{ticks} \times Période_{timer}$
De ce fait nous pourrons par un simple $F = \frac{1}{t}$ obtenir la fréquence du signal carré.
Et on recommence l'opération à chaque front.

2.3 Code

Nous commençons par réaliser la fonction initFreq qui initialise dans l'ordre :

- La pin PB15 en entrée, car celle-ci dispose d'un EIC, nous allons donc l'utiliser pour récupérer notre signal physique.
- Nous configurons donc cette pin en EIC, en mode « RISING » (détection de fronts montants) et nous définissons celle-ci comme étant une source d'interruption. Donc, par la suite, à chaque front montant de notre signal carré, c'est la fonction EIC_Handler qui sera appelée et exécutée.
- Nous définissons également ici un Timer (TC3) en incrémentation sur une horloge de 1 MHz avec un diviseur par 8 soit $\frac{1}{8}MHz = 125kHz$ donc une période (temps en secondes entre deux ticks) de $t = \frac{1}{f} = \frac{1}{125\,000} = 8us$

Dans la fonction EIC_Handler nous effectuons les étapes décrites précédemment avec un système d'if else pour inverser l'état a chaque passage d'un front ;
FRONT 1 => lance le timer
FRONT 2 => arrête le timer
FRONT 3 => lance le timer etc…
Soit un code qui devient :
FRONT X => si le timer tourne on l'arrête, s'il ne tourne pas on le lance.

Et pour finir calcul la fréquence ICI, soit à chaque arrêt du timer, avec le calcul décrit précédemment : $F = \frac{1}{Nb_{ticks} \times Période_{timer}}$
Ou ici la période du timer TC3 vaut 8us.
Exemple : On détecte un front, le timer se lance, il se passe 100ticks et hop, second front, on arrête le compteur, on calcule la fréquence : $F = \frac{1}{Nb_{ticks} \times Période_{timer}} = \frac{1}{100*0,000\,000\,8} = 12500$ *Hz soit une fréquence du signal carré de 12.5KHz*

La dernière fonction sert juste pour transférer la fréquence vers l'utilisateur. En effet si le signal à une fréquence élevée nous allons faire tous ces calculs très rapidement et l'utilisateur n'en a pas forcément besoin. Nous plaçons donc la fonction très simple getFreq qui lorsqu'elle est appelée vient lire la dernière fréquence calculée.

On vient donc se servir de cette fonction dans le main pour récupérer la fréquence.
Celui-ci devient donc (un seul changement) ;

```
/*
* Accordeur de Guitare
* Authors : METAYER Simon & BIZON Alexis
* Created Date : 23/01/17
* Version : 1.0
*/
#include "define.h"
int main(void)//fonction principale du programme
{
	float freq = 0;//contient la fréquence mesurée de la note
	char note = 0;//contient la note calculée à partir de la fréquence, voir les différentes valeurs dans define_notes.h
	char degre = 0;//contient le degré, ou l'octave de la note calculée à partir de la fréquence
	float relativeError = 1.0;//spécifie l'erreur relative autorisée en % entre la fréquence mesurée et la fréquence réelle correspondant à la note
	setup();//Fonction d'initialisation
	displayTitle();//affiche le titre du projet en haut de l'écran OLED
	while(1)
	{

==========➔	freq=getFreq();//Récupère la fréquence mesurée par le fréquencemètre
			note = noteSolver(freq);//permet de déterminer la note correspondant à la fréquence mesurée
			degre = degreSolver(freq);//permet de déterminer le degré ou l'octave correspondant à la fréquence mesurée
			char acc = accorder(note, degre, freq, calculAbsError(relativeError, freq,0));//Permet de déterminer si la note est accordée, trop basse ou trop haute
			diplayLedIndicator(acc); // Allume les LED en fonciton de l'indicateur : trop bas / ok / trop haut
			displayFrequence(freq);//On affiche la fréquence sur l'afficheur OLED
			displayNote(note);//On affiche la note sur l'afficheur OLED
			displayDegre(degre);//On affiche le degré sur l'afficheur OLED
	}

	return 0;//Le programme renvoi 0x0000 si l'exécution c'est correctement terminée
}
```

A partir de là on revient sur le même fonctionnement que précédemment et tout reste inchangé ; on vient lire la fréquence, analyser les notes et faire un retour à l'utilisateur sur l'accordage etc…
Les tests sont réalisés avec un GBF et sont très concluants.

2.4 Tests / réflexion / conclusion

Nous sommes donc désormais capables d'accorder un signal carré et avons certifier le fonctionnement de notre algorithme d'accordage d'instrument. A cet instant deux solutions s'offrent à nous.

- Option 1 : nous poursuivons de la sorte et tentons de traiter le signal de guitare de manière analogique pour qu'il ressemble à un signal carré. En effet pourquoi pas, il suffit de passer le signal audio dans un filtre passe-bas pour retirer le bruit HF et ensuite de passer le signal dans un ampli AOP qui multiplie par 10000 et le tour est joué. Le « sinus » sera transformé en signal carré et il suffit d'utiliser le code précédent. Cette solution parait simple et efficace.

Mais en réalité, ne fonctionne pas pour toutes les notes. En effet nous avons fait quelques recherches et il apparait que pour beaucoup d'instruments, la décomposition harmonique du son présente de très forts harmoniques, voire même plus forts que le fondamental. Nous avons nous-mêmes fait le test ci-contre avec un mi grave. Donc, la période du signal temporel peut être déformée par ces harmoniques et donc l'option 1 n'est plus viable. Il faut donc envisager une seconde option.

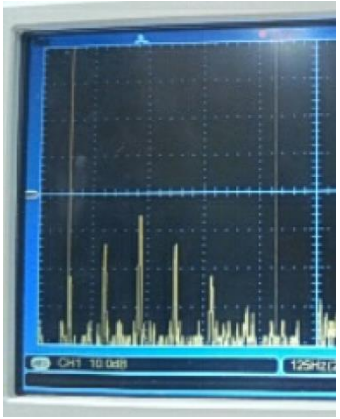


FIGURE 3 HARMONIQUES MI GRAVE

- Option 2 : récupérer le signal temporel tel quel, faire une FFT et détecter le fondamental.

Cette solution est beaucoup plus complexe à mettre en œuvre, mais parait à nos yeux la seule qui a de chances de fonctionner correctement. C'est donc dans cette voie que nous allons poursuivre.

3. Réalisation carte acquisition

Pour la suite de notre projet, nous allons réaliser une carte d'extension pour la carte Xplained-pro afin de réaliser toutes les fonctions manquantes pour notre système d'accordeur.

3.1 Problématiques

- Acquisition du signal sonore par microphone (pour guitares sèches et autres instruments)
- Acquisition du signal sonore par jack (pour guitares électriques)
- Filtrage analogique du signal sonore
- Alimentation portable de tout le système et création des tensions nécessaires (-4.5, +4.5, +3.3v)
- Ajout de RAM externe pour contenir de plus gros tableaux de FFT/DFT.

3.2 Solutions

3.2.1 Bloc Acquisition

Pour l'acquisition du signal sonore nous choisissons deux voies, une simple pour accorder une guitare électrique, soit une jack femelle 2.5 (représenté ci-contre par une jack mâle) et une seconde pour étendre la gamme d'instruments que notre accordeur est capable de gérer nous choisissons d'intégrer un microphone à notre carte. Nous avons donc récupéré un Électret, et branché comme indiqué dans la documentation. Nous avons apporté quelques modifications personnelles eu montage. Nous avons passé la taille du condensateur de 47 µF à 1 µF pour être sûr d'éliminer complètement la composante continue du microphone. Nous avons également ajouté une résistance de pull-down R7 pour charger le condensateur plus efficacement. Et pour finir un Switch de sélection (jumper) permettant le choix entre l'acquisition par micro et celle par jack. Schéma ci-contre.

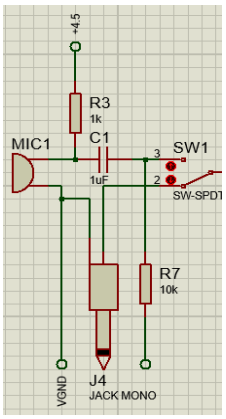


FIGURE 4 : SCHEMA MICRO + JACK

3.2.2 Bloc Filtrage

A la suite du switch et avant d'envoyer le signal dans la carte Xplained-pro nous choisissons de le traiter analogiquement. Ici nous répondons à plusieurs problématiques à la suite, de gauche à droite sur le schéma ci-dessous :

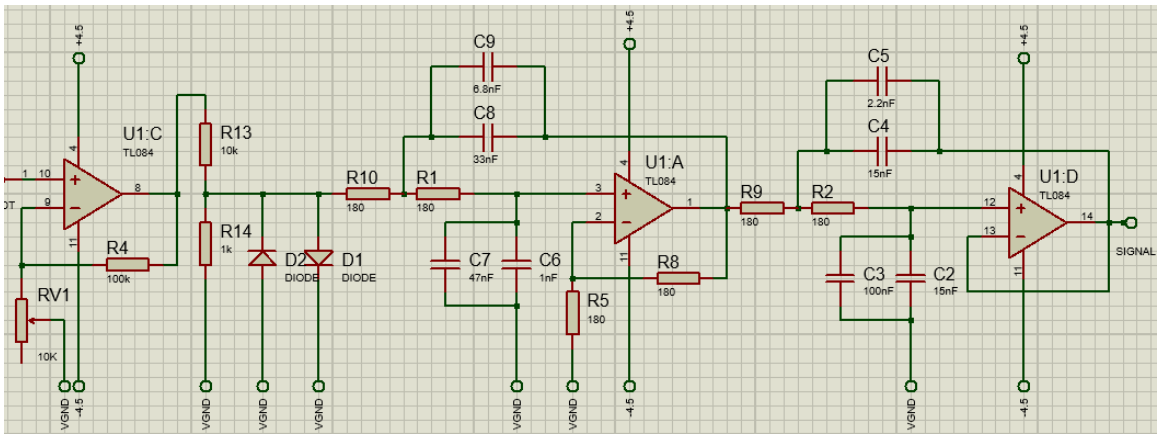


FIGURE 5 : SCHEMA FILTRAGE

Tout d'abord nous amplifions le signal par 100 avec un montage AOP simple (U1C), et nous le divisions ensuite par 10 avec un pont diviseur de tension. Ces deux fonctions de suite permettent simplement de multiplier par $\frac{100}{10} = 10$, mais en écrêtant le signal aux tensions d'alimentations de l'AOP divisés par 10 soit $\pm\frac{4.5}{10} = \pm 450\,mV$. En effet l'ADC présent sur la carte Xplained-pro n'accepte que des tensions de $\pm 0.5v$. Nous avons tout de même ajouté à la suite un écrêteur à diodes qui lui, découpe aux tensions de seuils de $\pm\ 0.6v$ en sécurité supplémentaire. La suite du montage avec U1A et U1D est simplement un filtre passe-bas Butterworth d'ordre 4 de fréquence de coupure 20kHz calculé avec une méthode de matrice de coefficients ;

On calcule d'abord la valeur d'un pseudo condensateur référence avec la formule : $C0 = \frac{\pi}{2*R*fc}$

Donc $C0 = \frac{\pi}{2*180*20000} = 0.000000436\,F$

A partir de là on calcule les vraies valeurs des condensateurs en multipliant C0 par des coefficients :
Ces calculs sont issus de ce site.

-C9+C8=C0*1.0824=40nF
-C7+C6=C0*0,9239=50 nF
-C5+C4=C0*2,6130=17 nF
-C2+C3= C0*0,3827=110 nF

On obtient les valeurs précédentes approximées.

3.2.3 Bloc Alimentation

Ici nous répondons aux problématiques d'alimentations.

Nous avons besoin pour notre montagne de 4 AOP, nous choisissons donc d'utiliser un TL084. Nous avons vu précédemment que nous aurons besoin d'une alimentation symétrique en +4.5 et -4.5. La carte Xplained-pro quant à elle fonctionne en +3.3. Voici le schéma que nous proposons répondant à cette problématique :

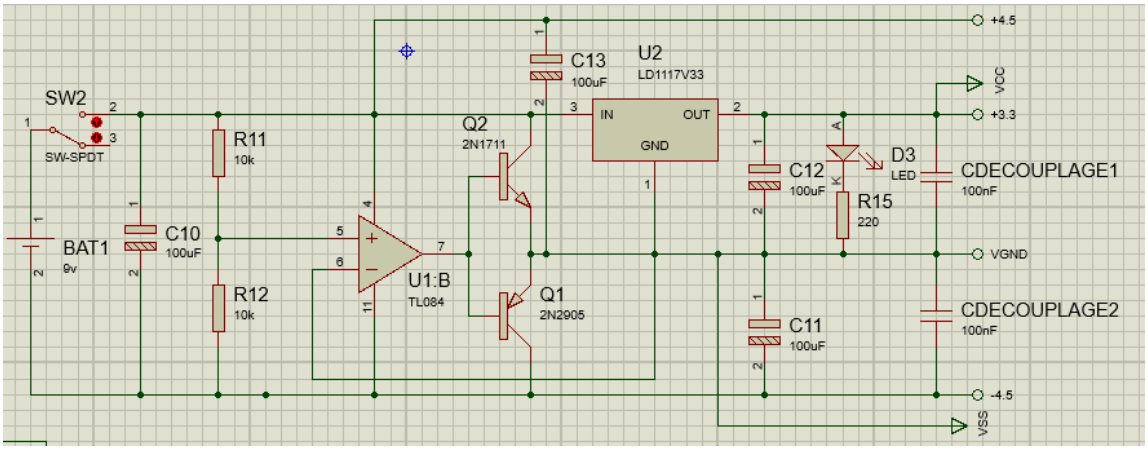


FIGURE 6: SCHEMA ALIMENTATION

Nous choisissons d'utiliser une pile 9v, car après symétrisation nous obtiendrons $\frac{9}{2} = 4.5v$. L'AOP U1B sert à créer une masse virtuelle (VGND) et à symétriser l'alimentation en $\pm 4.5V$ nous ajoutons également un régulateur LD1117v33 qui est un régulateur 3.3v que nous branchons sur le +4.5 v pour limiter la chute de tension dans le régulateur. Nous disposons maintenant de toutes les tensions nécessaires, le +3.3v en sortie du régulateur, le +4.5v entre VGND et +4.5 et le -4.5v entre le VGND et le -4.5. Pour ce qui est des gestions de courants nous ajoutons un étage d'amplification entre l'AOP et le régulateur avec deux transistors PNP et NPN : Q2 (2n1711) et Q1 (2n2905). Nous ajoutons 4 condensateurs de découplages polarisés (C10,11,12,13) et 2 condensateurs de découplages de 100 nF, qui sont en fait les découplages du TL084. Pour finir nous ajoutons une LED témoin d'alimentation avec sa résistance de limitation de courant de 220Ω.

3.2.4 Bloc RAM

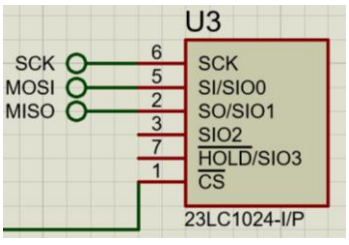


FIGURE 7 : SCHEMA RAM EXTERNE

Dans l'optique d'effectuer des calculs de FFT/DFT performants nous avons choisi d'ajouter une RAM externe à notre PCB

Le module Xplained-pro contient un ATSAMD21J18 qui est un ARM Cortex-M0+ avec 32KBytes de RAM, qui tourne à 48 MHz, avec 64 pins. La RAM interne contient donc 32 000*8=256 000 cases disponibles pour stocker le tableau du signal acquis par l'ADC. Seulement notre tableau est en int16_t, donc il n'y a finalement que $\frac{256\,000}{16} = 16\,000$ Valeurs stockables pour l'ADC. Et encore cette valeur est plus petite, car il faut soustraire toutes les petites variables nécessaires au fonctionnement du programme. Pour faire fonctionner notre programme correctement et atteindre la précision nécessaire de 1 Hz nous devrions stocker 44 000 valeurs 16 bits environ.

Nous avons donc choisi d'ajouter un module RAM réf : 23LC1024 qui ajoute 1024Kbits de RAM à notre Accordeur, soit un espace de $\frac{(32*8+1024)*10^3}{16} = 80\,000$ valeurs 16 bits stockables. Ce qui devrait être largement suffisant pour stocker les 44 000 valeurs 16bits + toutes les petites variables annexes.

3.3 Carte

3.3.1 Schéma global

Nous ajoutons les connecteurs vers la carte Xplained-pro et nous obtenons donc le schéma global suivant :

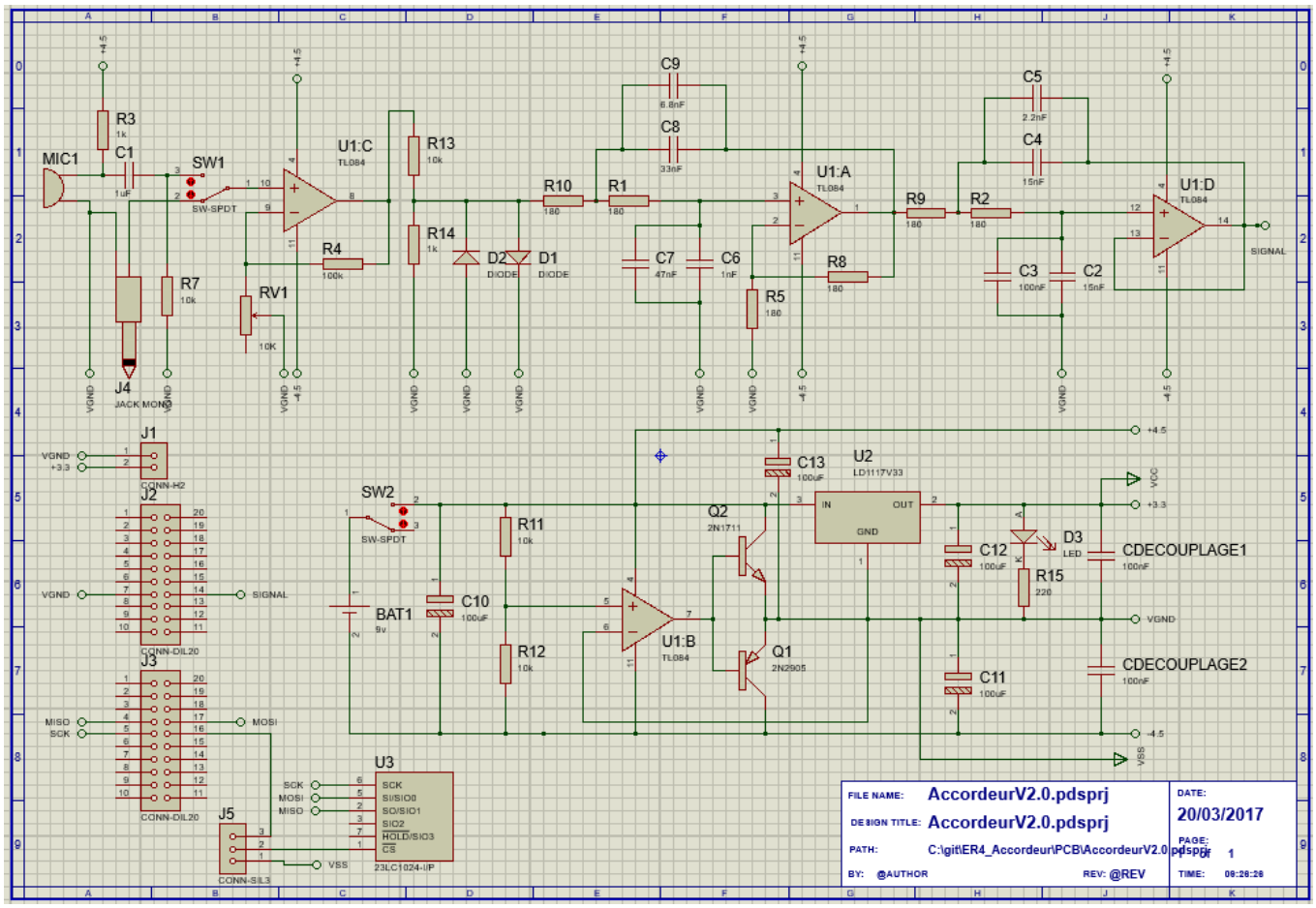
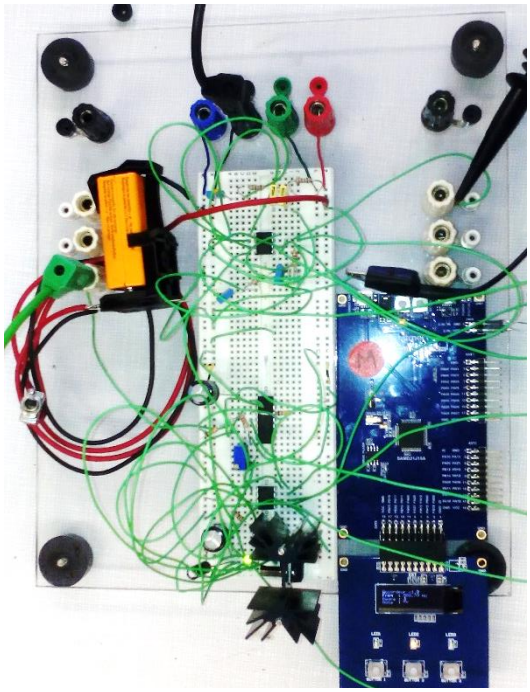


FIGURE 8 : SCHEMA GLOBAL

3.3.2 Tests sur platine de prototypage



Sur cette image on peut voir la phase de tests du schéma ci-dessus sur platine de prototypage. Sur la droite on peut observer la carte Xplained-pro qui est allumée, car alimentée par la pile et donc par le biais de l'alimentation différentielle et par la suite du régulateur. Cette image atteste donc du bon fonctionnement du module d'auto-alimentation de notre accordeur de guitare.

Sur cette plaque lab nous avons également réalisé de nombreux tests d'acquisition par microphone afin d'avoir le bon écrêtage du signal sonore.

Il est évident de constater qu'il est grand temps de passer à la réalisation d'un PCB !

FIGURE 9 : PLATINE PROTOTYPAGE

3.3.3 Réalisation de la carte

Nous passons donc maintenant à la réalisation de la carte. Nous choisissons de réaliser un PCB de la même taille que la carte Xplained-pro (sans l'OLED) pour des raisons esthétiques. Nous obtenons la vue 3D ci-contre après routage et placement des composants avec la suite Proteus (qui n'est pas gratuite, mais que nous utilisons quand même par question d'habitude)

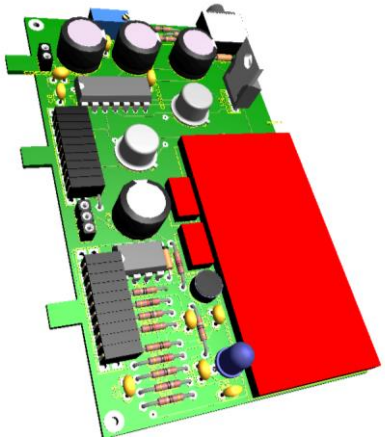


FIGURE 10 : VUE 3D

Le routage nous a posé beaucoup de petits problèmes du fait de nombreux composants inconnus des bases de données classiques. Nous avons dû réaliser des empreintes sur mesure pour de nombreux composants, tels que la pile 9v ou encore le jack femelle. Nous avons dû également anticiper la présence de radiateurs sur le PCB au niveau des deux transistors et du régulateur.

Pour finir, nous obtenons ce rendu :

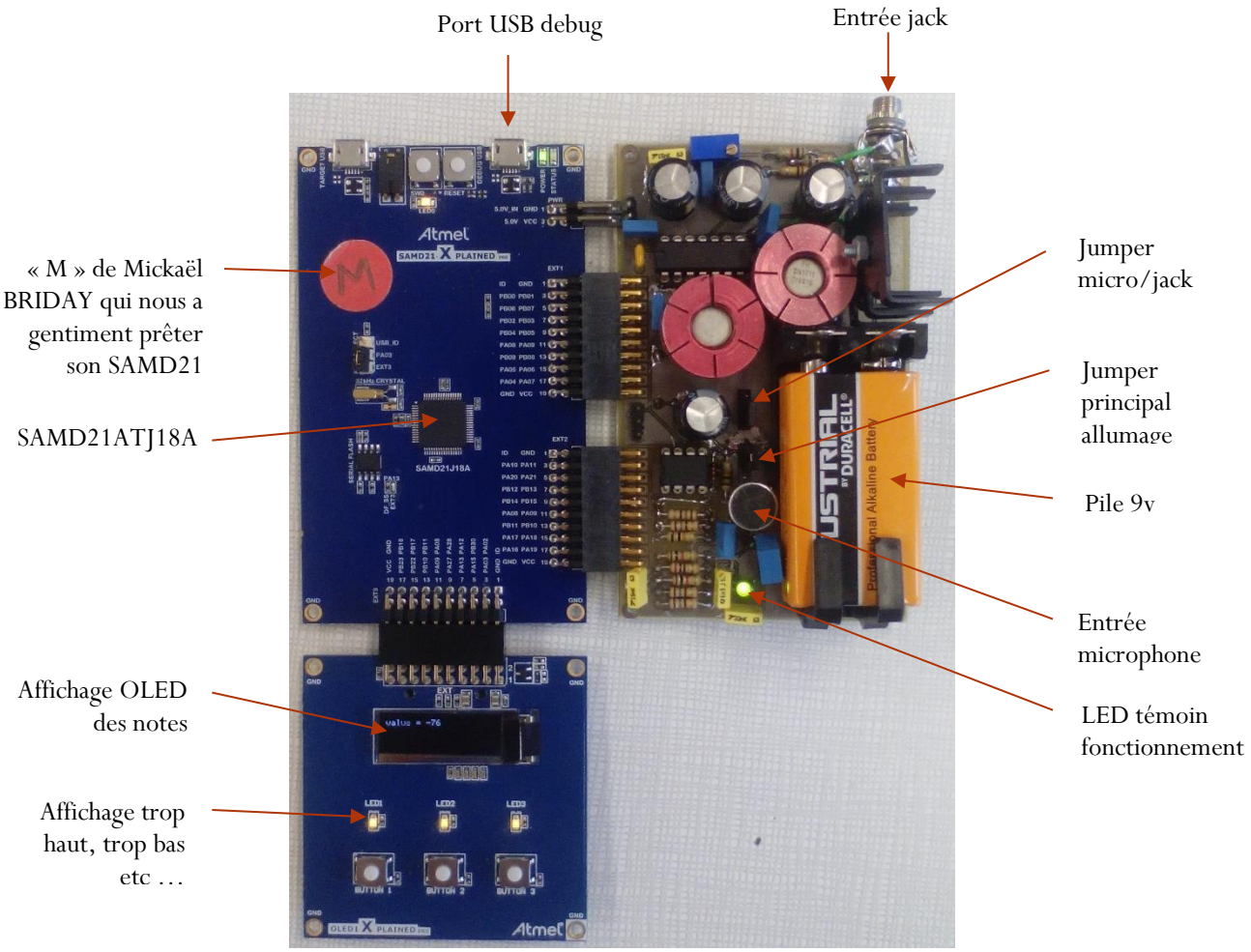


FIGURE 11 : PCB FINAL

3.4 Tests

3.4.1 Tests de l'alimentation

Nous avons effectué plusieurs tests pour l'alimentation et celle-ci apparait très stable. Nous avons bien 3.3v pour alimenter le SAMD21, la masse virtuelle fonctionne parfaitement et notre écreteur (je rappelle réalisé par les tensions d'alimentations des AOP) fonctionne également, notre signal sonore sature à 400 mV pour éviter les tensions max de l'ADC différentiel à $\pm\ 0.5v$.

3.4.2 Tests RAM

Nous n'avons malheureusement pas eu le temps de tester le module RAM, le driver est réalisé et incorporé au projet, mais pas testé par manque de temps et donc pour l'instant simplement présent dans le code en tant que commentaire.

3.4.3 Tests Acquisition + Filtrage

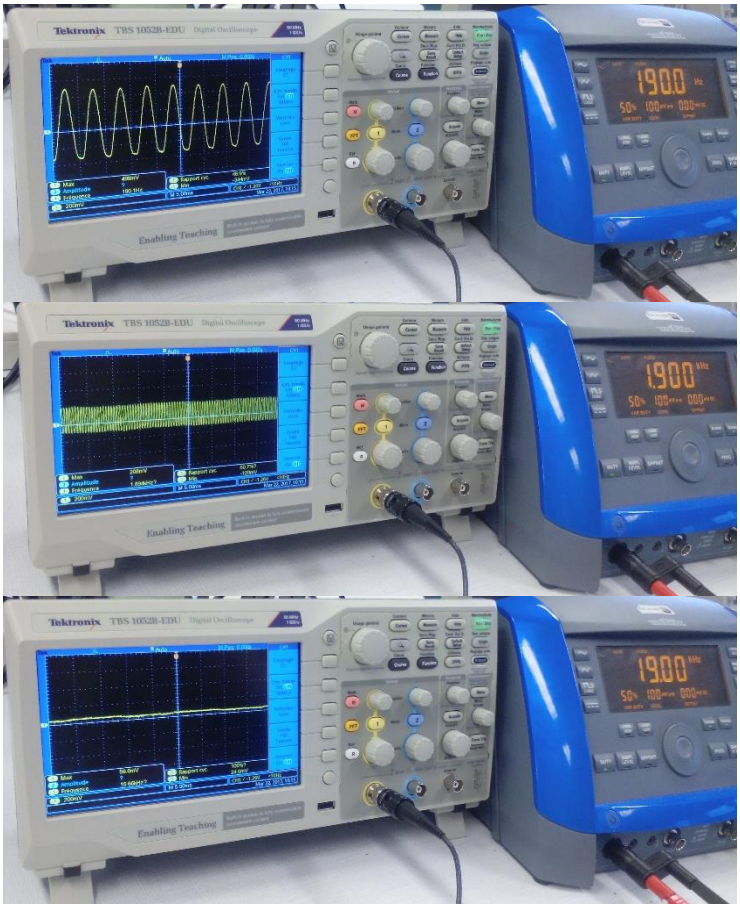


FIGURE 12 : BATTERIE DE TESTS BUTTERWORTH

Ici, on réalise plusieurs tests concernant le filtre Butterworth de fréquence de coupure 20 kHz.
On réalise une batterie de 3 tests avec les fréquences, 190 Hz, 1.9Khz et 19Khz.

On se rend compte qu'à 1.9KHz notre signal est fortement atténué et qu'à 20Khz il a complètement disparu, il semblerait donc que notre fréquence de coupure soit plus aux alentours de 10 kHz que 20 kHz. Cependant par manque de temps notre filtre restera en l'état. Nous avons dû faire une erreur de calcul au niveau des condensateurs ou au moment de placer les composants.

En revanche, il apparait que pour une application d'accordeur de guitare, et seulement de guitare, une fréquence de coupure à 10Khz n'est pas gênante, puisque notre guitare n'ira pas beaucoup plus haut que 1KHz environ.

Nous avons également effectué plusieurs tests avec le microphone et celui-ci fonctionne après l'ajout d'une résistance de pull down (présente sur le schéma précédent), en effet sans la résistance de 10 k, l'AOP à suivre ne tirait pas assez de courant pour polariser le microphone.

3.5 Conclusion

En conclusion notre PCB fonctionne bien pour l'application actuelle, il faudrait revoir le filtre légèrement, et supprimer certains radiateurs, en effet, nous n'avons pas eu le temps de réaliser les calculs thermiques, mais il semble que le régulateur ne chauffe pas du tout. Cela n'est pas très étonnant, car celui-ci est branché sur le 4.5 V il n'a donc que $4.5 - 3.3 = 1.2v$ de chute de tension à ces bornes. Nous n'avons également pas eu le temps de tester la RAM, malgré que le driver soit réalisé. Nous avons cependant trouvé un « bidouillage » dans le soft pour se limiter à la RAM disponible en interne du SAMD21 (à voir par la suite) et fonctionner avec un tableau d'ADC de seulement 4096 au lieu de 44000.

4. Accordeur de signal réel

Nous allons maintenant utiliser notre PCB complet et tenter de coder une solution d'accordage complète.
Tout le code principal référencé par la suite est compris dans le même fichier et est présent dans fft.c.

4.1 Problématiques

C'est ici que nous avons eu le plus de problèmes, et où nous avons dû apporter le plus de solutions. Le traitement du signal à suivre étant complexe nous allons tout de même tenter de l'expliquer par étapes ;

- Acquisition ADC du signal différentiel
- FFT ou DFT ?
- Mise sous interruptions (TC4 & TC3)
- Traitement du signal temporel
- Traitement du signal fréquentiel
- Détection de la fréquence fondamentale
- Problème de RAM ?

4.2 Solutions

4.2.1 Acquisition ADC différentielle

Pour simplifier l'acquisition du signal, nous choisissons de créer un ADC différentiel, donc capable de récupérer des signaux positifs et négatifs. La mise en œuvre de cet ADC n'est pas complexe en soit, car il est pré intégré au SAMD21, seulement celui-ci n'est que rarement mis en œuvre, il existe donc peu de documentation à son sujet et nous avons dû passer plusieurs heures à étudier les registres de configuration de cet ADC.

On initialise donc l'ADC ici avec son timer associé dont nous détaillerons le calcul par la suite. Et pour nous en servir, il nous suffira d'utiliser une syntaxe du type ;

```
uint32_t tab[3] = {0,SAMD21_ADC_MUX_AIN2,SAMD21_ADC_MUX_AIN3}; //Tableau de configuration
ADC_TAB[i]=read_adc(tab) ; // Acquisition
```

En incrémentant i autant de fois que la taille de ADC_TAB.

4.2.2 Point de vue global ; blocs fonctionnels

Ici on détaille le fonctionnement global de notre système. Il est fortement recommandé de lire l'ensemble de la page qui suit celle-ci pour appréhender le fonctionnement global du système. La page suivante permettant le détail du bloc ici indiqué en rouge et les différents calculs nécessaires au fonctionnement du programme.

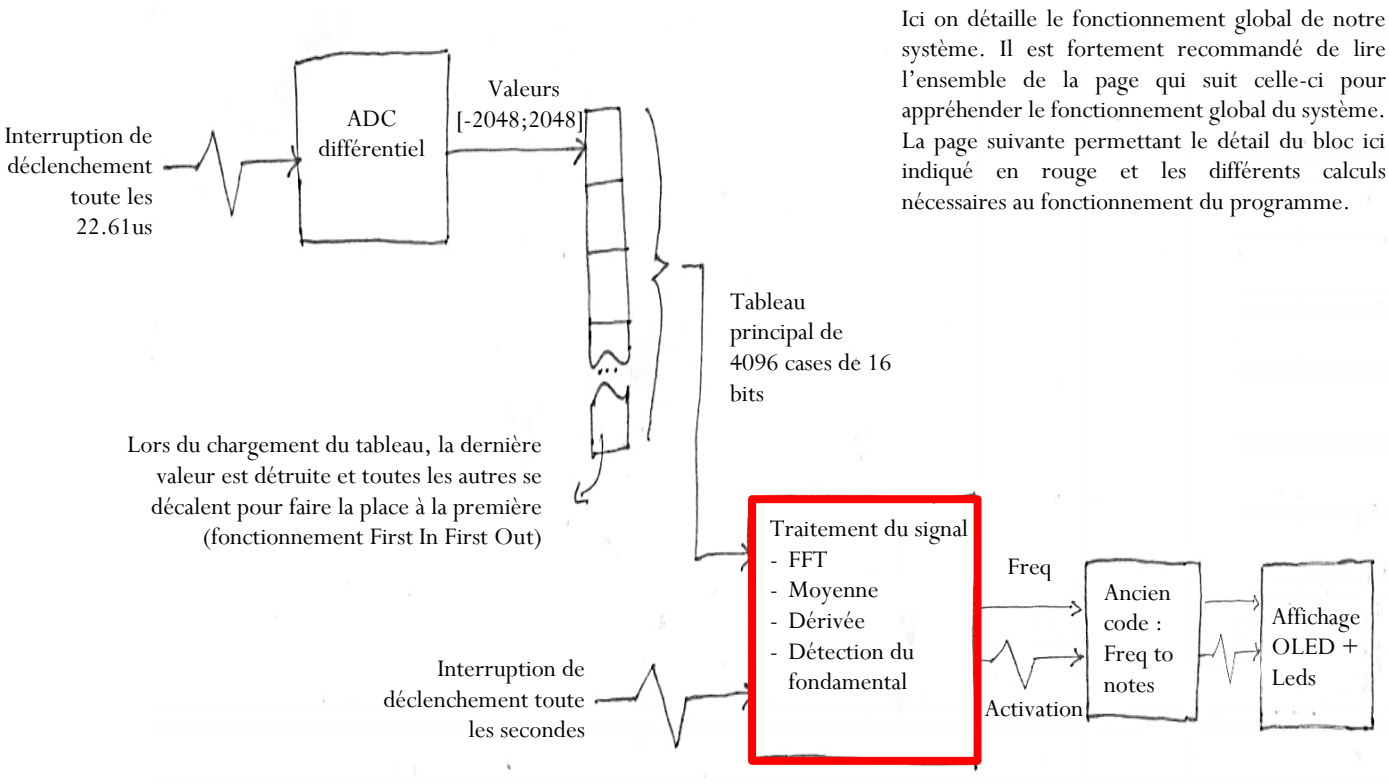
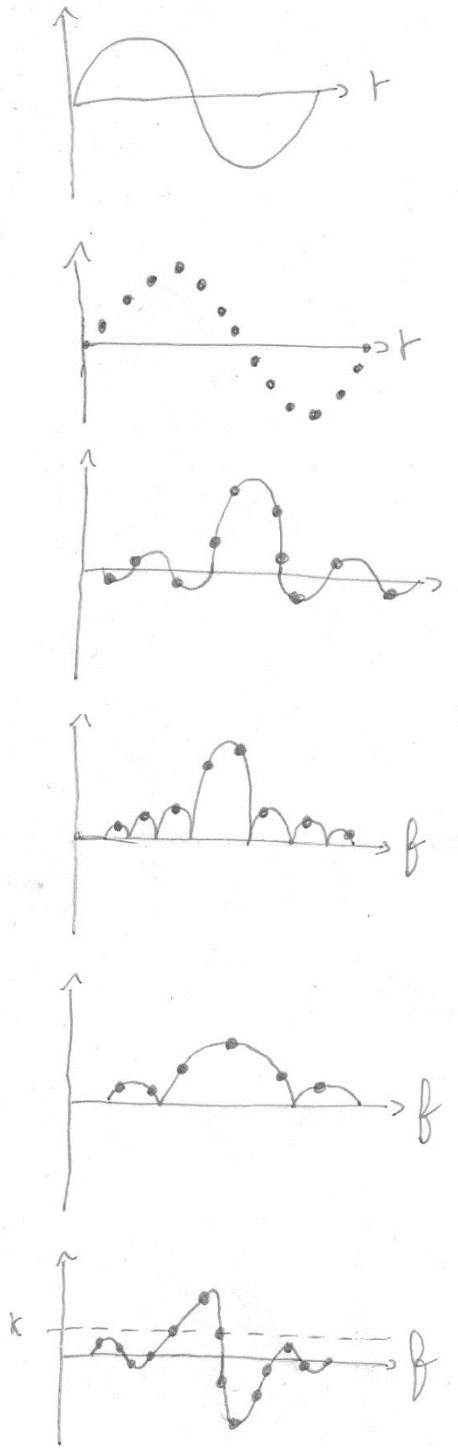


FIGURE 13 : SCHEMA BLOC GENERAL

4.2.3 Point de vue mathématique ; FFT + Détecteur de fondamental :



Signal temporel réel
Ex : guitare, voix, GBF…

ADC à 22.61 us (TC3). On récupère les valeurs de l'ADC, et toute les 10 valeurs, on en fait la moyenne et on met la valeur moyenne dans le vrai tableau de réels. Ainsi on a un tableau de 4096 valeurs qui contient en fait l'image de 40960 valeurs en « décimation ».

Signal échantillonné
4096 points
(image des 40960)
dt = 21,61us

FFT (Algorithme linéaire réalisant la transformée de Fourier)

Après FFT (partie réelle)

$$df = \frac{1}{dt * Nb_{points}} = \frac{1}{4096 * 0.000022} = 10Hz$$

Calcul $\sqrt{a^2 + b^2}$ pour avoir l'amplitude des raies

Vue classique de l'amplitude des raies de la FFT
df = 10Hz

Moyenne glissante sur 5 échantillons (pour limiter les points à 0 et écraser les lobs)

FFT « écrasée »
df = 10Hz

Dérivée et détection du fondamental

Raies après dérivation, on détecte quand on passe au-dessus de k, et lorsque l'on redescend c'est qu'on a « vu » le fondamental.

FIGURE 14 : ALLURES AUX ETAPES DU TRAITEMENT DU SIGNAL AUDIO

Au moment où on détecte le fondamental il suffit de repérer à quelle case (n) du tableau on est rendu et de de multiplier à l'échantillonnage df pour obtenir la fréquence du fondamental ! Seulement nous avons « bidouillé » au moment de l'acquisition ADC et chaque point à présent représentait 10 points avant, il faut donc diviser par 10 notre fréquence pour obtenir la fréquence réelle du fondamental. Soit :

$$f_F = \frac{n * d_f}{10}$$

Et on recommence toute les secondes tout le calcul (TC4)

4.3 Code

On commence par transposer tout le code du main dans une boucle timer (TC4_Handler) appelée toute les 1 seconde.
Ainsi le main devient donc :

```
/*
* Accordeur de Guitare
* Authors : METAYER Simon & BIZON Alexis
* Created Date : 23/01/17
* Version : 2.0
*/
#include "define.h"
#include "samd21Adc.h"
#include "samd21Gpio.h"
int main(void)//fonction principale du programme
{
	setup(); // Initialisation générale
	FFTInit(); // Initialisation de la FFT
	displayTitle(); //affiche le titre du projet en haut de l'écran OLED
	while(1)
	{
		// Vide
	}
	return 0; //Le programme renvoi 0x0000 si l'exécution c'est correctement terminée
}
```

Celui-ci se contente d'effectuer des initialisations puis de passer dans une boucle vide. Toutes les actions étant effectuées sur timers.

Nous revenons donc dans notre fichier fft.c ou est désormais présent tout le code principal. L'ancien code du main contenant les fonctions d'accordage est maintenant dans TC4_Handler une fonction appelée toutes les secondes par l'intermédiaire de l'overflow du timer TC4 initialisé ICI.

Nous ajoutons ensuite un second timer permettant d'effectuer l'acquisition périodique du signal temporel avec l'ADC différentiel. Ce sera donc TC3, que l'on initialise ICI pour appeler périodiquement la fonction TC3_Handler toutes les 22.61us. Cette fonction se chargera simplement d'effectuer l'acquisition et le moyennage par 10 pour « décimer » les valeurs et utiliser moins de RAM. Pour finir nous ajoutons la fonction de traitement du signal FFT_Detecteur_Fondamental avec le main dans la fonction périodique TC4_Handler. Ainsi le traitement du signal + l'accordage + l'affichage s'effectueront toutes les secondes.

La fonction FFT_Detecteur_Fondamental effectue les actions, précédemment décrites dans le schéma de traitement des données, de manière séquentielle :
- Algorithme FFT
- Calcul des raies en absolu
- Calcul moyennage glissant sur 5 échantillons
- Calcul dérivé et détection du fondamental

Puis la valeur en fréquence du fondamental est récupérée et envoyée dans le traitement de la note et l'accordage réalisé au début du projet.

4.4 FFT ou DFT ?

Le développement de ce code s'est avéré être très complexe et long et a nécessité l'aide de plusieurs professeurs, notamment Mr Youri et Mr Feuvrie qui ont dû nous aider à saisir les aspects complexes du traitement par FFT/DFT.

En effet nous avions commencé par la base en faisant des simulations de transformées de Fourier sur codeBlocks (donc des DFT pour Direct Fourier Transform), mais nous nous sommes vite rendu compte que notre microcontrôleur ne serait pas capable d'effectuer des calculs du type $S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s(n) \cdot e^{-2i\pi k \frac{n}{N}}$,car la présence d'exponentielles est synonyme de multiplications pour un microcontrôleur, et donc de lenteur de calcul. En effet, sur codeblocks, un simple calcul de DFT avec un tableau de 1000 points peut prendre plus de 10 secondes avec un PC disposant d'un corei5. Il a donc fallu utiliser une FFT. La FFT (Fast Fourier Transform) effectue le même job que la DFT, mais 100 fois plus vite en moyenne grâce à des opérations binaires très rapides et simples pour un microcontrôleur (décalages, etc..).

C'est un algorithme qui optimise grandement le calcul et qui est linéaire (peu de multiplications) ; si 100 calculs = 1seconde alors 200 calculs = 2 s) ce qui n'est pas du tout le cas avec la DFT qui se comporte plutôt comme ; si 100 calculs = 1s alors 200 calculs = 4 s et 300 calculs = 10 s… cependant la FFT est un algorithme très complexe qui demande une étude approfondie (qui prend beaucoup de temps) pour en comprendre le fonctionnement et doit malgré tout être utiliser comme une « boite noire ».

4.5 Tests & Conclusion

Nous avons donc finalisé le code et implémenté celui-ci dans notre PCB. Le code semble fonctionner correctement, mais pas pour toutes les fréquences. Nous n'avons malheureusement pas eu le temps d'effectuer de tests poussés de notre montage.

Nous avons simplement fait ces quelques étapes :

- On joue une note de guitare et on regarde la fréquence
- On désaccorde un peu la note et on regarde si la fréquence bouge de manière logique et si les LED s'allument correctement
- On éteint le PCB
- On le rallume et on recommence la procédure avec la même note pour voir si les fréquences sont similaires.
- On refait tout ça pour plusieurs notes.

Les observations sont les suivantes :

- Notre PCB physique fonctionne.
- Notre logiciel complet et les mathématiques associés fonctionnent
- L'accordeur ne marche pas pour toutes les notes. (Certaines sont détectées trop hautes).
- La vitesse d'affichage (toutes les secondes) est lente ce qui n'est pas très agréable pour l'utilisateur.
- Le micro n'est pas du tout fait pour capter des sons « lointains » il faut donc approcher sérieusement l'accordeur de l'instrument pour que cela fonctionne.
- Notre code ne fonctionne pas du tout (calcul de note très incohérent) pour une fréquence comprise entre 1998 et 2002 Hz environ.

Les conclusions :

- Il nous aurait fallu une séance d'ER supplémentaire pour effectuer des tests précis avec un GBF en prise directe sur la jack en testant une large gamme de fréquences.
- Notre code contient plusieurs valeurs de réglages qu'il nous faudrait affiner pour qu'il fonctionne correctement pour toutes les notes.
- Pour l'affichage, nous ne pouvons pas faire autrement, le microprocesseur fonctionne déjà à plein régime.
- Pour l'erreur des 2 kHz, nous suspectons une division par 0 dans le calcul de notes, mais nous n'avons pas eu le temps de trouver la solution à ce problème.
- Nous sommes contents et fiers que notre solution soit viable et fonctionnelle malgré la complexité du traitement numérique interne et la réalisation d'un PCB de traitement analogique exigeant.

5. Conclusion

Ce projet nous a permis de mettre en œuvre la plupart de nos connaissances acquises au cours des 2 années de DUT GEII.

En effet nous avons dû, pour mener à bien la réalisation de cet accordeur utiliser de l'électronique analogique, avec des filtres, de l'amplification de signal, de l'écrêtage, de la régulation de tension ou encore de l'amplification en courant pour l'alimentation avec une masse virtuelle.

Mais nous avons également dû mettre en œuvre des connaissances en électronique numérique avec la réalisation d'un code complexe de gestion d'affichage sur OLED doublé d'une architecture de code fonctionnant sur timers et interruptions, mais également des mathématiques de traitement du signal numérique, avec de la dérivation ou du traitement par transformée de Fourier.

Et pour finir, ce sont nos connaissances de gestion de projet et de réalisation globale dont nous avons dû nous servir pour coordonner et mener à bien un projet de la sorte.

C'est donc avec un projet presque abouti que nous finalisons ce compte rendu et par la même occasion ce projet qui clôture nos deux années d'études en GEII.