PFE : Réalisation d'un Synthétiseur

Rapport intermédiaire

UNTEREINER Antoine

Polytech Lille

Encadrants :

Boe Alexandre

Vantroys Thomas

POLYTECH®

INTRODUCTION

Afin de compléter ma formation d'ingénieur en option IMA-SC j'ai décidé de me lancer dans la réalisation d'un synthétiseur. En effet, ce PFE s'inscrit dans une volonté de poursuite de mon projet professionnel. Voulant travailler dans l'industrie de la musique, il me permettra d'avoir un premier contact avec les notions techniques qu'elle implique de maîtriser.

Fort heureusement, mon sujet à été accepté en me laissant une grande liberté. Le synthétiseur a pu alors évoluer assez librement lors de l'année. Il m'a fallu cependant réfléchir à toutes les étapes, afin de passer des premières idées sur papier au produit final. Cela n'a pas tout le temps été aisé, comme nous le verrons.

Le projet mêle électronique analogique et numérique, leur proportion pourra évoluer selon les idées ou les difficultés rencontrées en cours de route. Mon premier choix de microcontrôleur se porte sur la famille **Atmega** qui, par sa simplification de codage, permet de réaliser de la DSP assez efficacement.

Un travail très important de recherche à été réalisé en amont afin d'assurer une base de connaissances suffisante et nécessaire au bon déroulement du projet.

I/ Décomposition du projet

Un projet complexe et complet comme celui-ci nécessite d'être décomposé en tâches à effectuer. C'était donc ma première mission, m'ayant permis de prévoir un agenda et d'être efficace. Ci dessous sont exposées les différentes parties que j'ai pu découper.

1. Définition des fonctionnalités de l'instrument

2. Recherches bibliographiques

3. Réalisation du VCO

4. Codage de la DSP numérique (ADSR)

5. Réalisation d'un filtre

6. Réalisation du VCA

7. Réalisation de différents effets intégrés

8. Gestion du MIDI

9. Ajout de fonctionnalités (en fonction du temps restant)

10. Réalisation du boîtier et mise en place du circuit

En gras: Tâche effectuées.
En italique: Tâches incomplètes.

II/ Définition du cahier des charges

Lorsque j'ai commencé à réfléchir à quoi mon synthétiseur allait ressembler, je dois avouer que j'étais quelque peu perdu dans la multitude de possibilités. Les idées venaient par centaines les unes au dessus des autres, toutes plus motivantes les unes que les autres, mais souvent bien incompatibles.

Il me fallait trouver une méthodologie de gestion de projet et découper mon objectif en sous-catégories. D'une autre part il me fallait des gardes fous afin de ne pas m'emballer et partir sur des idées interminables. J'ai décidé de contacter mon tuteur de stage à Montréal qui travaille dans l'industrie des synthés modulaires. Après plusieurs heures de discussion, voici les principales questions que je me suis posées et auxquelles je me suis appliqué à répondre.

a) Desktop Synth VS Keyboard

A quoi va ressembler le synthétiseur ? Il a plusieurs types de synthétiseurs et parmi eux les Keyboards et les Desktop synths. Alors que le premier incorpore les touches à son boîtier, l'autre et une version plus petite et compact. C'est vers cela que j'ai décidé de me tourner.

Fig 1. Le légendaire Juno 106 (en haut) et sa version desktop (en dessous)

► Quels sont les avantages ?

1. **Le prix:** Dans le commerce, les synthétiseurs Desktop sont généralement moins cher. Ici, la conception étant entièrement réalisée par mes soins, cela me permet d'oublier la gestion des touches et d'éviter leur achat.
2. **La taille** : Mon but, au delà du projet scolaire, est de garder le synthétiseur et de pouvoir l'utiliser pour mes projet musicaux personnels. Un synthétiseur ainsi réalisé permet de gagner de la place lorsque qu'il est installé dans une configuration d'instruments.
3. **Facilement séquençable** : Un séquenceur est un outil capable d'enregistrer et exécuter une séquence de commandes permettant de piloter des instruments de musique électronique. Il ne produit aucun son par lui-même, mais sert à automatiser l'exécution d'une séquence musicale.

► Qu'est ce que cela implique ?

Le synthétiseur comporte un ou plusieurs VCO qui vont générer les notes. Cependant, sans clavier il faut ajouter au synthétiseur Desktop un moyen de contrôle des notes. Ceci se fera grâce à l'ajout d'un port **MIDI IN**. Cela implique un code de gestion des messages midi et de conversion de ces derniers en tension pour la commande du/des VCO.

b) Analogique ou Digital ? Mono/Polyphonique ?

Lors de l'apparition des premiers synthétiseurs, ces derniers se ressemblaient beaucoup. Tous les sons étaient générés analogiquement, c'est à dire qu'ils reposaient tous sur un signal électrique analogique. Les circuits étaient complexes et en résultaient principalement des synthétiseurs monophoniques (ne pouvant jouer qu'une note à la fois).

Avec l'arrivée du digital la polyphonie s'est grandement développée. Les synthétiseurs digitaux ont permis une approche simplifiée de la polyphonie (Réduction de la complexité et du coût). En effet, un synthétiseur analogique doit, pour être polyphonique, ajouter chaque voix individuellement à la chaîne du signal et dans l'ordre pour créer le son de l'accord joué.

Dans la mesure où je voulais réaliser un synthétiseur analogique (par envie d'étendre mes connaissance en électronique analogique et par amour du son analogique), mon choix s'est naturellement porté vers la monophonie.
Je précise que l'aspect analogique du synthétiseur que j'entreprends de réaliser concerne la génération du son (VCO) et d'autres blocs tels que le VCA ou le filtre par exemple. Une partie digitale sera en effet présente pour la gestion de différents éléments (ADSR, MIDI IN).

c) ***Quelles seront les fonctionnalités ?***

Une fois le type de synthétiseur défini il m'a fallu réfléchir aux fonctionnalités qu'il apportera. En effet jusqu'ici, si l'on suppose avoir un VCO et un VCA, on a simplement le son d'un oscillateur que l'on contrôle de manière externe via un port MIDI.
Que peut-on faire pour modifier ce signal et offrir à l'utilisateur un minimum d'interaction ? Les idées et possibilités sont infinies. C'est pour cela que la réponse à cette question risquait de changer tout au long de l'année. Mes premiers objectifs étaient de pouvoir:

- Coder une enveloppe ADSR sur le microcontrôleur
- Concevoir un filtre analogique
- Ajouter des effets analogiques (Delay, Reverb, Chorus)
- Réaliser un LFO assignable à plusieurs paramètres (Fréquence de coupure du filtre, paramètres d'effets etc..)
- Rendre le synthétiseur semi-modulaire.

d) Décomposition en bloc fonctionnels

Une fois les bases du projet posées, il m'a fallu découper le synthétiseur en blocs fonctionnels. Cela me permettait de travailler sur chacun d'eux séparément, tout en réfléchissant à comment les rassembler en terme de niveaux de signal et de contrôle. Le microcontrôleur sera alors le cerveau sous-jacent qui contrôlera l'ensemble :

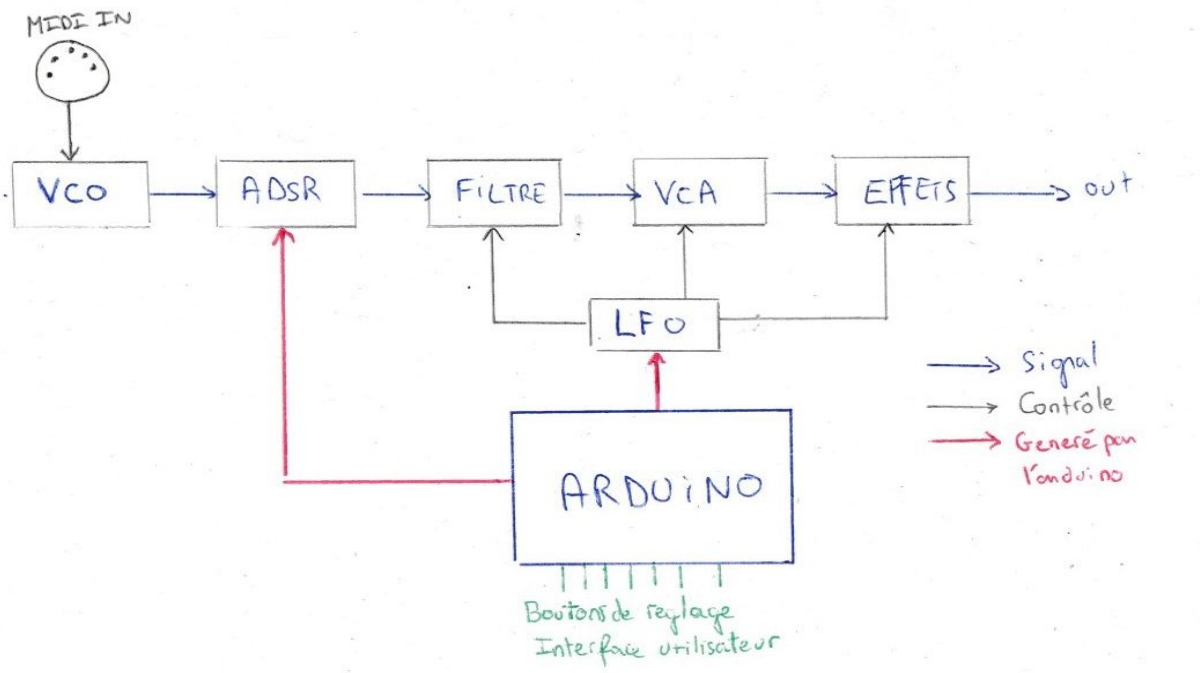


Fig 2. Blocs fonctionnels du synthétiseur.

.

III/ Gestion du Midi et génération du CV pour le VCO

a) Qu'est-ce que le CV ?

Le CV (Control Voltage) est une méthode analogue permettant de contrôler les synthétiseurs. Il trouve son origine dans les premiers synthétiseurs modulaires qui, à l'aide de câbles manipulés par l'utilisateur, faisaient circuler un voltage à travers plusieurs composants (VCO, filtre, effets..). Sur la plupart des modules on retrouvait alors une prise "CV" permettant de moduler un paramètre, comme la fréquence de coupure du filtre par exemple.
Dans notre cas, il va permettre de jouer la note voulue. En effet, comme nous l'avons expliqué plus haut, le VCO à besoin d'une tension afin d'être commandé. Nous communiquerons avec le synthétiseur via MIDI. Le micro-contrôleur se chargera alors d'effectuer la conversion MIDI->CV à l'aide d'un DAC. Il y a deux implémentations majeures du CV :

Implementation / Note	A1	A2	A3	B3	C4	D4	E4	A4	A5
Volts/octave (V)	1.000	2.000	3.000	3.167	3.250	3.417	3.583	4.000	5.000
Hertz/volt (V)	1.000	2.000	4.000	4.491	4.745	5.345	6.000	8.000	16.000

Fig 3. Les standards du CV.

- **Le Volt/Octave** : Comme son nom l'indique, 1V équivaut à une octave. Ce standard a été popularisé par Bob Moog dans les années 60 et est utilisé dans de nombreux appareils.
- **Le Hz/Volt** : Dans cette configuration, augmenter d'une octave revient à doubler la tension. Ce mode est majoritairement utilisé par les compagnies **Korg** ***et*** *Yamaha'*.

b) Le langage MIDI

Le langage MIDI (abréviation de Musical Instrument Digital Interface) est un langage inventé dans les années 80. C'est un protocole de communication dédié à la musique permettant l'interaction entre les instruments électroniques, et les différents contrôleurs, séquenceurs.
Les messages MIDI sont généralement composés de 2 octets (mais peuvent aller jusqu'à 4). On les distingue en deux catégories majeures définies par leur premier bit.

- Si le premier bit est de poids **fort**, il s'agit d'un *status byte*. Eux-mêmes se décomposent en nibble (demi-octets). Le premier nibble indique la commande. Dans notre cas, nous nous concentrerons les octets **Note On** et **Note Off** qui, comme leur nom l'indique, indiquent lorsqu'une note est jouée ou arrêtée. Le second indique le canal.

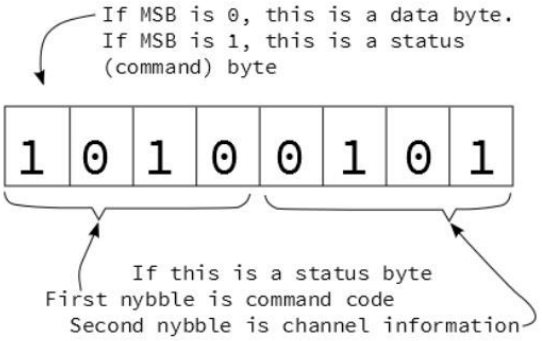


Fig 4. Les messages MIDI.

- Si le premier bit est de poids **faible**, il s'agira alors d'un *data byte* qui apportera des informations complémentaires à l'octet de statut. Les octets **Note On** et **Note Off** sont accompagnés de deux octets de données. Le premier indique la note jouée, le deuxième la vélocité (force avec laquelle la touche à été pressée).

Donc, lorsque l'utilisateur joue un LA440 (A4 en anglais) cela produira le message: **0x90(NoteOn) 0x69(A4) 0x64(Velocity)** Le langage midi comporte un grand nombre d'octet de statuts permettant toute sorte de choses (contrôle de séquence, changement de preset etc..) mais nous n'aurons besoin que de ces deux pour le moment.

c) ***MIDI INPUT : Circuit de réception des données***

Toutes les informations sur le MIDI peuvent être facilement trouvées sur le site de la *MIDI manufacturers association*[1]. En cherchant sur le site, j'ai pu établir sur logiciel ce schéma de réception MIDI:

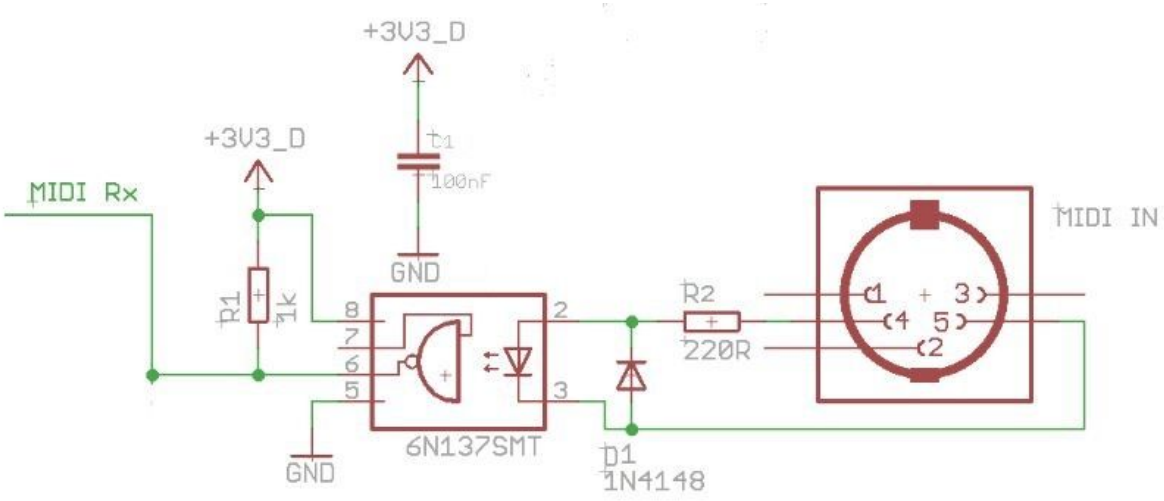


Fig 5. MIDI IN.

Ce circuit, assez simple, utilise un optocoupleur. Un optocoupleur permet la transmission de donnée sans connexion électrique. Le signal en entrée fait clignoter une DEL et la lumière produite est captée par un phototransistor qui la convertit à nouveau en signal électrique.

Les pins 4 et 5 sont reliées respectivement à l'anode et la cathode de la LED. Lorsque aucune information est transmise, les pins 4 et 5 sont au même voltage et la DEL n'est pas allumée. Donc l'UART reçoit une tension en Pull-up et il en résulte un signal logique à 1. Et inversement lorsqu'une donnée est transmise.

[1] https://www.midi.org/

C'est l'idée brillante des concepteurs du MIDI. En effet, cela permet au différents fabricants de faire communiquer leurs synthétiseurs entre eux, sans prendre en compte leur standard de tension. En plus de cela, cela permet d'éviter les pertes importantes de tensions dans les longs câbles, car ils utilisent des boucles de courant.

Une fois le circuit mis en place j'ai pu tester grâce à un analyseur logique que les données étaient effectivement reçues. Pour cela j'ai connecté le port midi à mon ordinateur via un boîtier spécialisé et j'ai envoyé des données via un logiciel nommé MidiOx. N'ayant pas apporté de clé USB lors du test je n'ai pas de capture d'écran mais cela ressemblait à ceci (exemple des messages Note_On et Note_Off) :

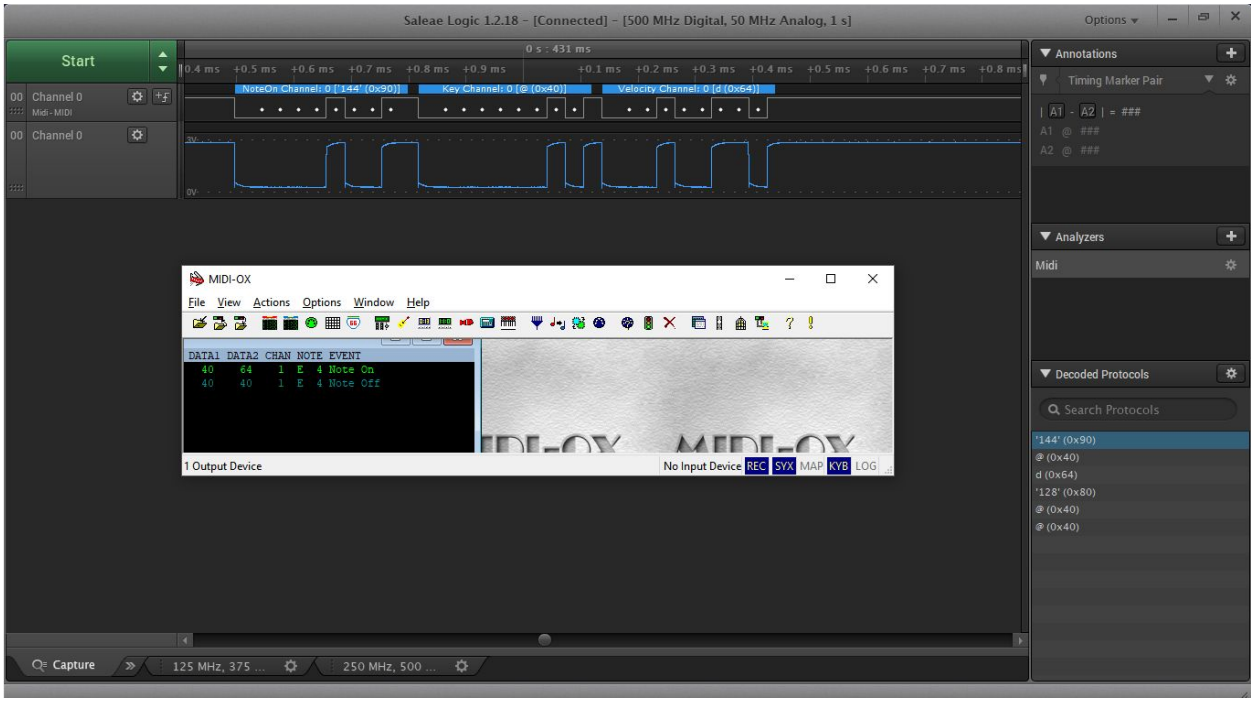


*Fig 6. Messages **Note_On** et **Note_Off**.*

Ces messages vont donc être transmis à l'Arduino afin d'être traités. Ils sont transmis via le port Rx avec un baudrate peu conventionnel et propre au midi valant **31250**. A partir de là, les données doivent être analysées. Pour cela je voulais d'abord ré-implémenter la machine à état finis que j'avais créée lors de mon stage de 4ème année. Cependant, cette machine à état finis fait partie d'un système bien plus large, et donc lourde pour cette application, et est codée pour les noms de registres et les paramètres d'un autre système (Système ARM).

Remarque : Il faudra ajouter un switch entre la réception et le port Rx. En effet sans cela l'opto-coupleur interférera avec le port Rx même quand il n'y a pas de messages et empêcherait l'upload de nouveaux programmes sur l'arduino.

Afin de nous simplifier le travail la base de librairies arduino propose une librairie Midi développée par *Forty Seven Effects*[2]. En regardant la documentation de cette librairie on se rend compte qu'elle permet l'usage de callbacks. Un callback est une fonction que l'on écrit et qui va appeler la librairie uniquement lorsqu'un message arrive. Cela évite de faire tourner le programme en continu et d'utiliser tout le CPU. Pour les utiliser c'est simple, lors de l'initialisation (**void setup()**) on active le callback voulu. Ainsi, **MIDI.setHandleNoteOn(NoteOnHandler)** appellera la fonction NotOnHandler lorsque qu'une note sera jouée.

Nous pourrons donc traiter indépendamment les différents messages (si on veut faire évoluer le programme). Avant cela nous devons régler le problème de la sortie. L'arduino seul n'est pas capable de sortir directement des voltages stables.
A la place il utilise des pulsations de périodes variées (PWM).

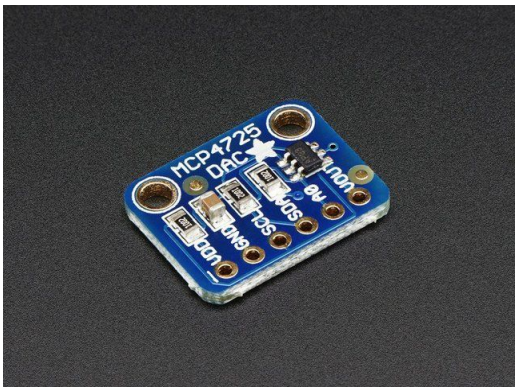


Fig 7. DAC Adafruit MPC4725.

[2] https://github.com/FortySevenEffects/arduino_midi_library

Il nous faut donc un convertisseur digital vers analogique (DAC). Il y a plusieurs manières de réaliser un DAC, comme une échelle R-2R par exemple, ou un filtre RC. Cependant, pour contrôler un VCO nous avons besoin d'un DAC assez précis dans la mesure où un écart entre deux semi-tons est environ égal à 0.083V. J'ai donc décidé d'utiliser un DAC dédié, le **MPC4725** d'Adafruit qui a une librairie dédiée pour les modules arduino.

Nous allons maintenant décrire les différentes parties du programme :

► Variables:

- ➢ **MIDI_CHANNEL** : Canal d'écoute des messages midi.
- ➢ **Voltage** : Voltage en mV correspondant à la note jouée.
- ➢ **dacValue** : Valeur transmise au DAC.
- ➢ **VLinCoeff** : Variable permettant un tuning lors de la mise en pratique.
- ➢ **Vshift** : Permet d'augmenter ou diminuer d'octave.
- ➢ **LastNote** : Stockage de la note jouée pour vérification dans la fonction Note_Off

► Setup():

- ➢ **MIDI_CREATE_DEFAULT_INSTANCE** : Créé et lie l'interface MIDI au port Série du matériel.
- ➢ **TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001** : Augmente la fréquence de la PWM du timer 1 (Pin D9 et D10) en réglant son diviseur à 1. On obtient alors une fréquence de 31372.55 Hz, ce qui permet de réduire les ondulations de tension en sortie.
- ➢ **MIDI.setHandleNoteOn/Off(Note_On/Off_Handle)** : Initialisation des callbacks.
- ➢ **MIDI.begin(MIDI_CHANNEL)** et **dac.begin(0x60)** : Initialisation de la connexion MIDI et DAC.

La fonction **MIDI.read(MIDI_CHANNEL)** sera placée dans la boucle pour lire les messages en continu.

► La fonction Note_On_Handle(byte channel, byte note, byte velocity):

- ➢ Tout d'abord la fonction sauvegarde la note dans la variable **LastNote**
- ➢ On calcule ensuite le Voltage à l'aide de la formule:

Voltage = 1000*((note*VoctLinCoeff)+ VoctShift)

- ➢ Le Voltage à été multiplié par 1000 car les valeurs décimales sont tronquées par la fonction constrain(). Or, nous appelons cette fonction pour le calcul de la valeur du DAC:

dacValue = constrain[3](map(Voltage, 0, 5000, 0, 4095), 0, 4095)

- ➢ Finalement on applique au dac la valeur souhaitée avec la fonction **dac.setVoltage(dacValue, false).**

Remarque: Pour la fonction Note_Off_Handle teste si la note reçue est la note jouée auparavant. Si c'est le cas, elle met à 0 la valeur envoyée au DAC.

[3] La fonction Map ré-étalonne un nombre d'une fourchette de valeur vers une autre fourchette. Cette fonction ne contraint pas les valeurs à rester dans les limites indiquées, d'où l'utilité de la fonction constrain.

IV/ Conception du VCO

a) *1er Circuit : Miss10*[4]

Après avoir passé beaucoup de temps à lire des documentations techniques et des articles sur les différentes marques/modèles de synthétiseurs j'avais décidé dans un premier temps d'essayer de reproduire le VCO du Korg MS-10[5]. J'ai finalement choisi de changer de modèle. En effet, mon ancien tuteur de stage était pris et n'a pu eu le temps de m'aider suffisamment pour que j'ai une compréhension complète du circuit. De plus certains composants nécessaires à la réalisation de ce VCO sont obsolètes et donc difficiles et onéreux à trouver. J'ai donc décidé de me tourner vers une version plus moderne. Je vais tout de même rendre compte ici de mon analyse du circuit dans la mesure où elle m'a permis de comprendre un certain nombre d'éléments.

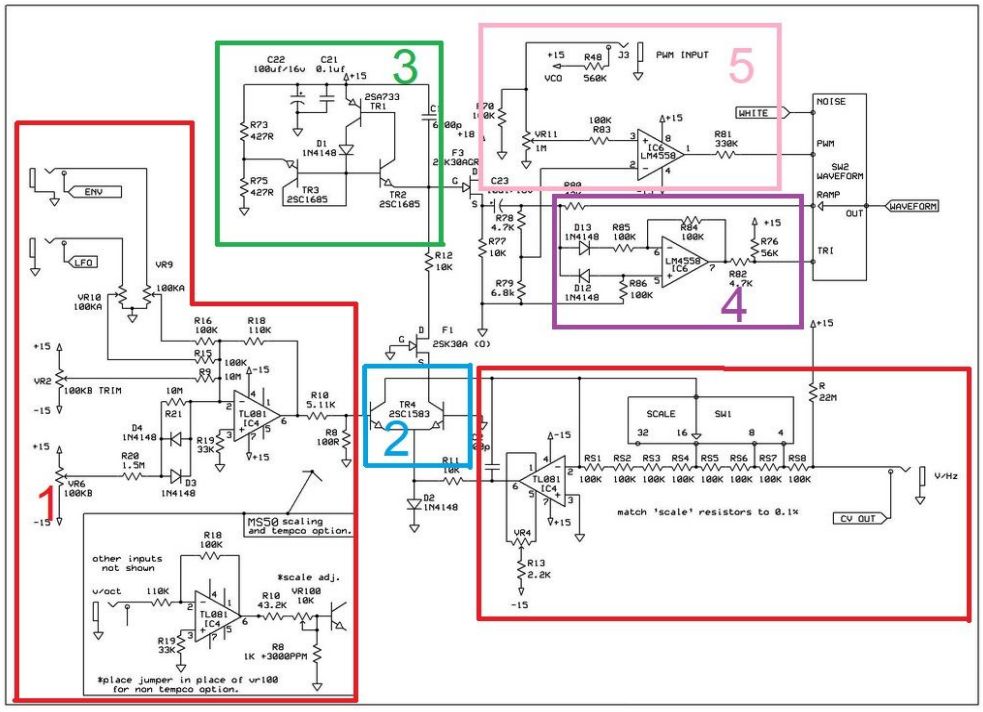


Fig 8. Le VCO et sa Décomposition

[4] Projet trouvé sur https://www.muffwiggler.com/forum/index.php
[5] Manuel de référence : http://synthmanuals.com/manuals/korg/ms-10/service_manual/

On peut découper ce circuit en plusieurs parties fonctionnelles. Il faut savoir avant tout que le cœur même de cet oscillateur se base sur un générateur de signal en dent de scie. Ce signal est après modifié afin de créer les autres formes de signaux.

► Partie 1 : Le sommateur de CV (Control Voltage) exponentiel.

L'Amplificateur opérationnel IC4 (un TL081) permet de sommer les voltages correspondants à l'enveloppe, au LFO (Low Frequency Oscillator) afin de contrôler avec une réponse exponentielle la fréquence. Alors qu'un oscillateur classique ajoute un autre nœud pour le CV (Conversion depuis le midi comme vu dans la partie précédente), les oscillateurs à la base des synthétiseurs MS-XX de Korg gèrent cela sur un autre nœud de TR4, le couple de transistors. Je ne suis pas sûr de l'utilité de ceci mais je crois en conclure que comme ces synthétiseurs fonctionnent en V/Hz et non en V/oct, cela permet d'avoir une réponse linéaire plutôt qu'exponentielle. Le TL081 à droite est donc l'entrée V/Hz associée à un réseau R2R et un sélecteur rotatif qui permet de contrôler la "scale", autrement dit l'octave.

► Partie 2 : La source Voltage->Courant.

La combinaison des deux TL081 directement connectés à la paire de transistors TR4 permet de créer un source de courant qui permet de donner au cœur du VCO la fréquence à laquelle il doit se charger. En d'autres mots: Plus le voltage est élevé, plus il y a de courant à travers la paire TR4, donc un plus grand taux de charge pour l'intégrateur et donc une fréquence plus élevée.

► Partie 3 : Le cœur de l'oscillateur.

TR1, TR2 et TR3 forment le cœur de l'oscillateur. Comme je l'ai dit je n'ai pas compris les détails précis du fonctionnement. Mais il que la capacité de 6200 pF, avec les composants autour, forme un intégrateur qui se charge à un voltage donné. Quand il atteint un certain seuil, qui sera le point le plus haut du signal rampe, un transistor est activé et la capacité se décharge et le cycle est répété. Ainsi, de manière périodique, la capacité subit une série de charges et de décharges qui forment le signal en dent de scie. La fréquence dépendra alors des éléments de la partie 1.

F3 me semble être un simple buffer/Amplificateur pour leur cœur du VCO. A la sortie de la capacité C23, qui est une capacité de découplage pour probablement centré la rampe sur 0V, on trouvera le signal en dent de scie.

► Partie 4 et 5 : Les transformations du signal

Comme je l'ai dit plus haut, l'oscillateur se base sur ce signal rampe pour créer les deux autres signaux. En effet, dans la partie 4, le signal est injecté dans IC6 à travers deux diodes. Selon moi, ce circuit découpe le signal rampe en 2 moitié : celle qui augmente et n'est pas inversée et une miroir qui est inversé. Il y aura plus de détails la dessus plus tard.

Dans la partie 5, on a IC6 qui agit comme un simple comparateur. En comparant le signal rampe à une certaine valeur (donnée par l'entrée PWM) on obtient le signal carré.

b) 2ème Circuit

i) Coeur du VCO

► Fonctionnement:

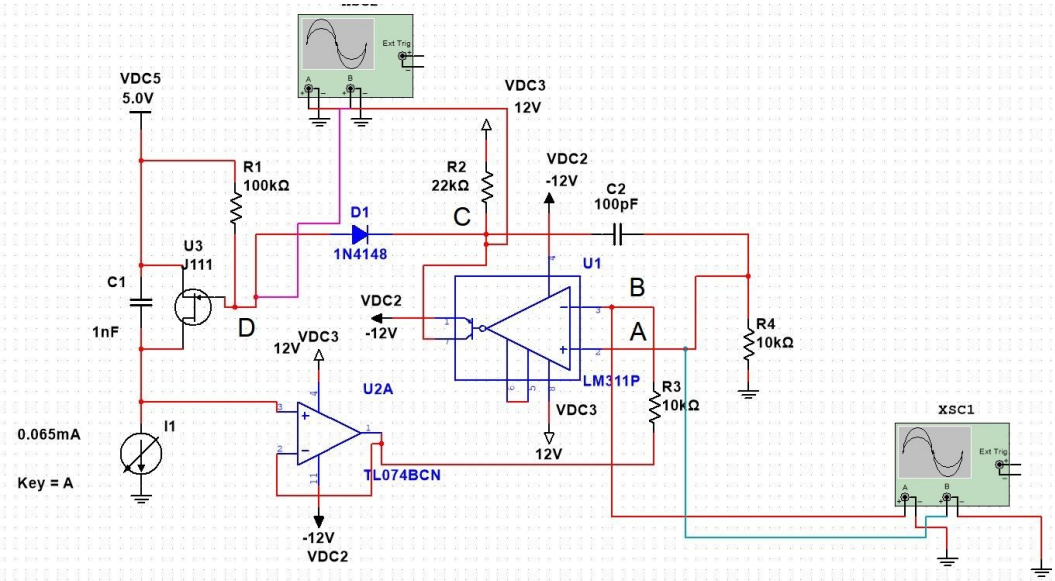


Fig 9. Coeur de l'oscillateur.

L'idée sous-jacente à cet oscillateur est simple : Considérons la capacité C1 déchargée. L'amplificateur opérationnel U2 sert de buffer pour la tension aux bornes de C1; la tension au point B est donc de 5V. La source de courant force un courant à passer à travers C1 qui se charge alors, faisant diminuer la tension en B de manière linéaire.
Le composant U1 est un comparateur, comparant alors la tension en B avec celle de l'autre borne, qui est égale à 0V. Quand A descend en dessous de 0, le comparateur active brièvement U3. U3 est un transistor JFet, qui lorsqu'il est activé permet à la capacité de se décharger, jusqu'à que la tension en a est à nouveau égale à 5V. Ainsi, ce principe se répète de manière cyclique et crée le signal rampe.

► Simulation et problèmes:

J'ai donc simulé ce circuit. Lorsque j'ai lancé la simulation avec un oscilloscope au point B, je n'avais rien. J'ai alors perdu une journée entière à débugger le circuit. Après quelques temps et de nombreux essai je me suis rendu compte que Multisim définit par défaut au lancement de la simulation ses propres conditions initiales basées sur un calcul que je n'ai pas vraiment compris.
J'ai donc changé les conditions initiales pour que la tension en B soit bien de 5V au départ. J'ai donc constaté la diminution linéaire de la tension. Cependant lorsqu'elle passait en dessous de 0V elle se bloquait à -500mV. Après divers essais et des visualisations à différents points du circuit, j'en ai conclu que le transistor JFet ne fonctionnait pas.

Après quelques heures de tests et de recherches j'ai trouvé la source du problème. C'est à deux doigts d'abandonner que j'ai remarqué que le transistor était le seul élément qui, schématiquement, était affiché en vert. J'ai donc cherché ce que cela signifiait sur des forums et c'est à ce moment que je me suis rendu compte que le composant était placé en **PCB LAYOUT ONLY** ce qui signifie qu'il est placé pour avoir l'empreinte lors du passage en pcb mais ne comporte aucun modèle de simulation.

A l'aide d'un tutoriel[6] fourni par *National Instruments* j'ai pu créer le composant. Pour le modèle de simulation j'ai du chercher ce qu'on appelle le modèle **Spice**[7].

J'ai donc rechargé le schéma, relancé la simulation et tout fonctionnait correctement :

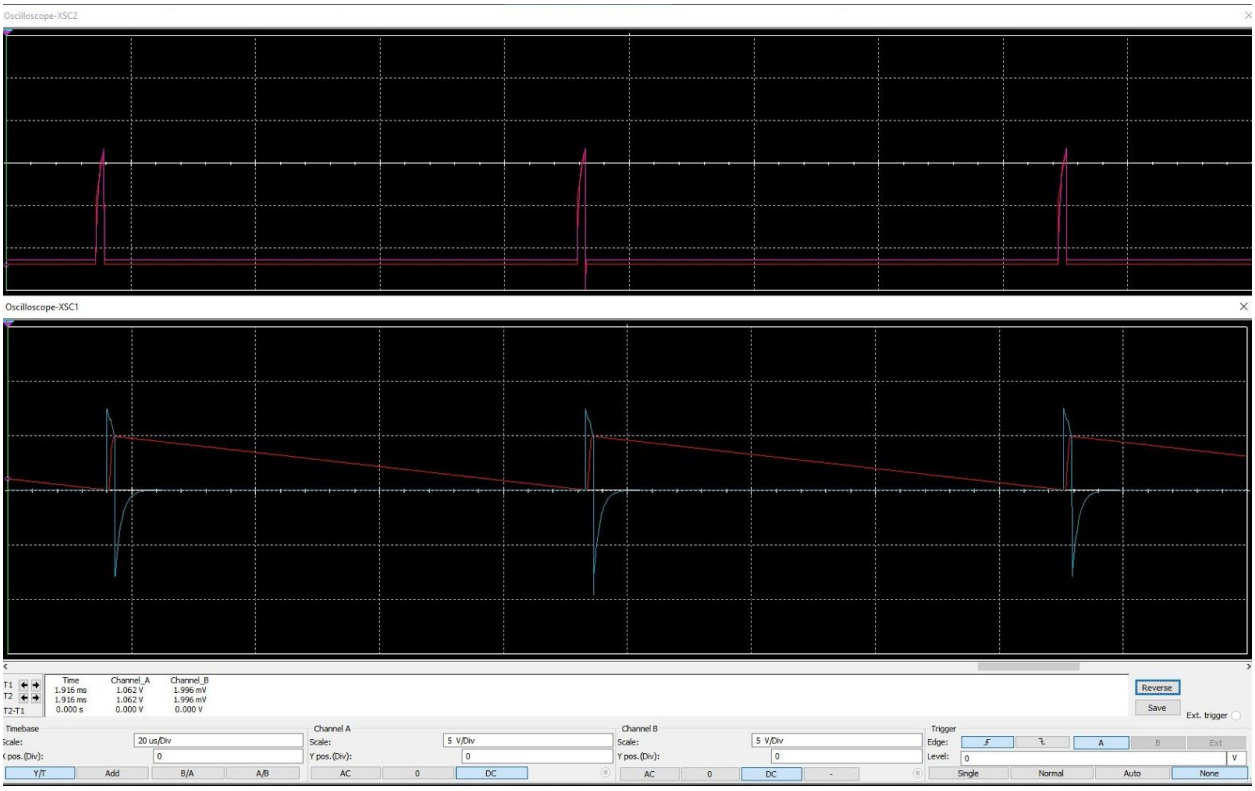


Fig 10. Simulation du coeur.

Dans un premier temps on a une tension positive au point B, et la tension au point A est égale à 0V. La sortie du comparateur est donc basse et la tension au point C vaut -12V. Cette tension se propage à travers la diode et le transistor n'est donc pas activé.

Ensuite, lorsque la valeur de tension au point B est négative, la sortie du comparateur devient haute. La tension au point C vaut donc +12V et grâce à la diode et la résistance R1 elle vaut +5V au point D. Le transistor devient alors passant et la capacité C1 se décharge, jusqu'à que la tension au point B revienne à 5V. Et ainsi de suite.

[6] https://forums.ni.com/t5/National-Instruments-Circuit/Component-Creation-101/ba-p/3486929
[7] http://web.rfoe.net:8000/ziliaoxiazai/philips/models/spicespar/data/j111.html

ii) La source de courant

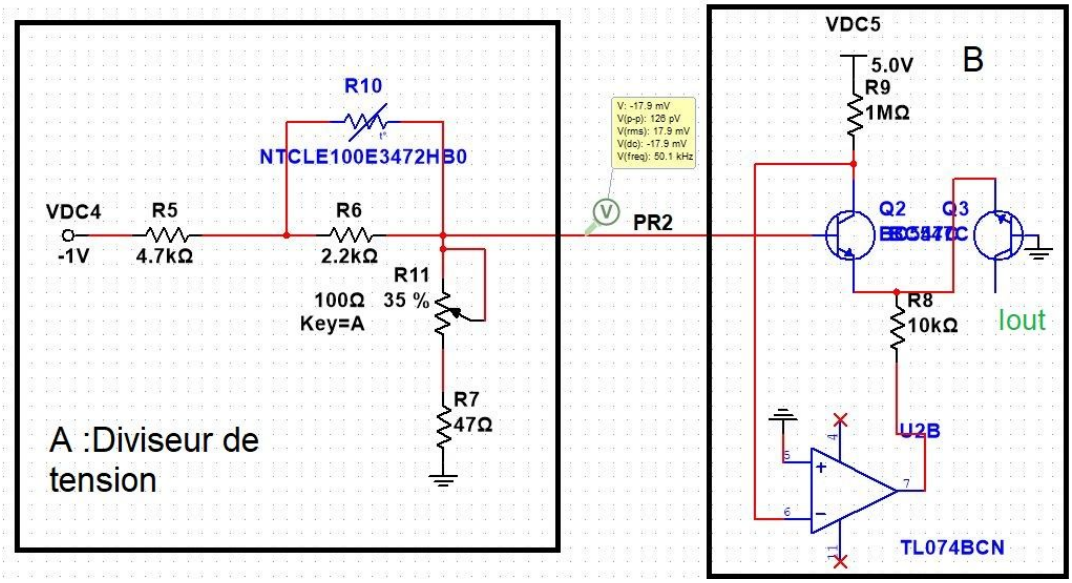


Fig 11. Source de courant.

Une fois que le cœur du VCO était en place, il m'a fallu travailler sur la source de courant qui permet d'avoir un courant tiré proportionnel au CV appliqué, pour avoir pas extension un lien de proportionnalité avec la fréquence. Afin d'avoir la propriété 1V/Octave il faut que le courant ait une relation exponentielle avec le CV d'entrée[8].

Si nous prenons un transistor classique, son courant à l'émetteur s'exprime par la formule :

$$IE = IS(e^{\frac{VBE}{VT}} - 1) \approx ISe^{\frac{VBE}{VT}}$$

L'approximation peut se faire car Ie >> Is. Le courant de collecteur Ic, courant que nous utiliserons, est quasi-égal au courant de l'émetteur Ie. Le problème cependant que l'on peut observer dans cette formule est la dépendance forte à la température (facteurs **VT** et **Is** liés à la température). Afin de contrer ce phénomène on utilise deux transistors en miroir.

[8] Pour plus de détails : https://www.schmitzbits.de/expo_tutorial/index.html
https://www.allaboutcircuits.com/projects/diy-synth-series-vco/

Si l'on part du principe que Vb1 = Vb2 = 0V, comme les émetteurs des deux transistors sont connectés, ils ont leur tension VBE et leur courant d'émetteur égaux. L'amplificateur opérationnel sert de convertisseur tension->courant et force le courant de référence Iref défini par R1 à travers Q2. On a un courant de 5µA avec une résistance de 1 MOhms. Le fait d'avoir configuré les transistors en miroir permet d'avoir le même courant à travers Q3 et on récupère alors le courant indépendamment de la température.
On veut maintenant changer le courant de sortie de ce sous-circuit B à l'aide d'une tension. Ceci s'effectue lorsque Vb1 et Vb2 ne sont pas égaux. Le courant que l'on récupère en sortie s'exprime par la formule $Ic = I_r e f e^{\frac{Vb2-Vb1}{VT}}$

Le CV alimente Vb1 et Vb2 est connecté à la masse, valant alors 0V. Lorsque l'on calcule l'inverse de la fonction on peut voir que lorsque Vb1 diminue de 17.8 mV, le courant Ic double. Nous avons un circuit à -17.8mV/octave. Ainsi, pour atteindre les 1V/octave il nous faut, à l'aide du sous-circuit A, un diviseur de tension et un inverseur (non présent dans le schéma, voir schéma global).

Il reste cependant la dépendance en température de VT qui s'exprime par $V_T = \frac{k_B T}{q}$.
Pour contrer ceci, on utilise une thermistance CTN (Coefficient de Température Négatif) dont la résistance diminue de façon uniforme quand la température. Plus de détails sur cette partie sur le site de René Schmitz.

Remarque sur la paire de transistors : Lorsque nous réalisons un amplificateur différentiel avec les deux transistors en configuration miroir, il faut que ceux ci soit assortis. Pour assurer la linéarité de l'amplificateur, il faut que les transistors aient la même caractéristique tension vers courant et approximativement le même Is. Des circuits de tests se trouvent en faisant quelques recherches[9].

[9] http://www.dragonflyalley.com/synth/images/TransistorMatching/ianFritz-transmat0011_144.pdf

iii) Génération du signal rampe

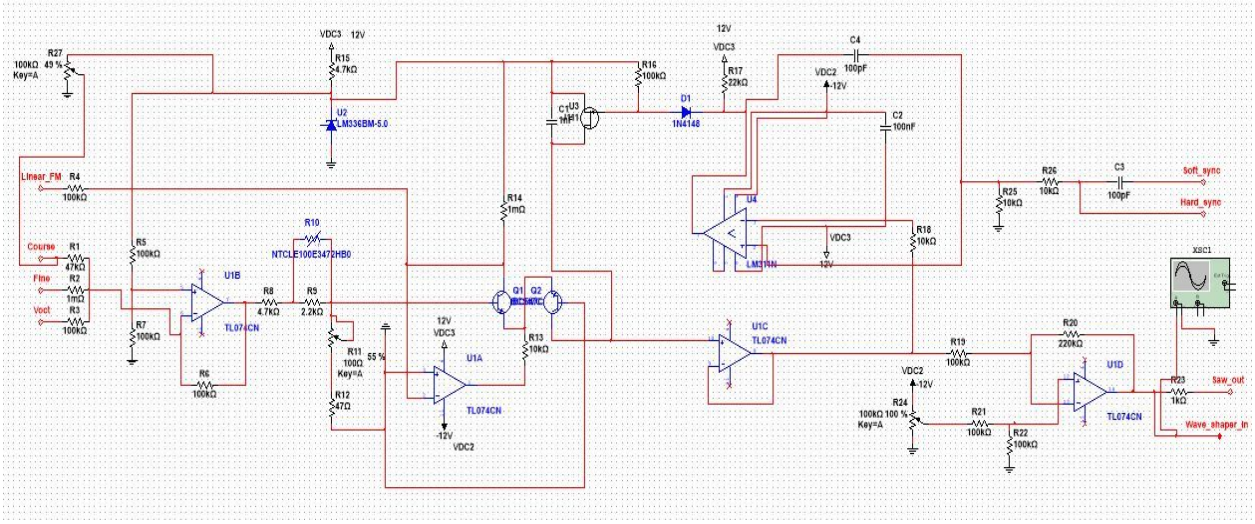


Fig 12. Génération du Signal rampe.

►<u>Tension de référence 5V :</u>

Il est essentiel que la fréquence du VCO ne change pas s'il y a du bruit dans l'alimentation. L'utilisation d'une Diode Zener LM336/5 permet de générer la tension de 5V stable. Cette tension est utilisée pour :

- ✓ Iref comme expliqué dans la partie **source de courant**
- ✓ L'amplitude du signal rampe comme vu dans la partie **coeur de l'oscillateur**
- ✓ Le sommateur de CV : Somme les entrées CV et inverse le signal pour donner à la thermistance un suivi -1V/octave. Pour avoir une plage de réglage convenable un offset négatif est nécessaire. On ajoute donc 5V à l'entrée positive du sommateur.

►Entrée FM, Soft et Hard Sync:

La FM, frequency modulation est une caractéristique très présente dans les modules VCO. L'entrée ajoutée change Iref. En effet l'amplificateur opérationnel ajoute la modulation de fréquence via la résistance R14.

L'option **sync** est très présente sur les synthétiseur. On y ajoute un second oscillateur. Lorsqu'un oscillateur fini son cycle, il réinitialise la période de l'autre, le forçant à opérer sur la même base de fréquence. Cela permet de créer un son riche entre les deux oscillateurs. L'oscillateur qui ré-initialise le second s'appelle le **maître** et l'autre **l'esclave**. Il y a deux méthode de synchronisation : le **hard sync** et le **soft sync**.

- ✓ **Hard Sync:** Ici la hauteur de l'oscillateur esclave peut être changée ou non. A chaque fois que le cycle de l'oscillateur maître est fini, celui de l'esclave recommence, peut importe sa position. Si l'esclave opère à une fréquence inférieur au maître, il sera forcé de se ré-initialiser avant de finir un cycle. Dans le cas contraire, il se réinitialisera au milieu du second ou troisième cycle.

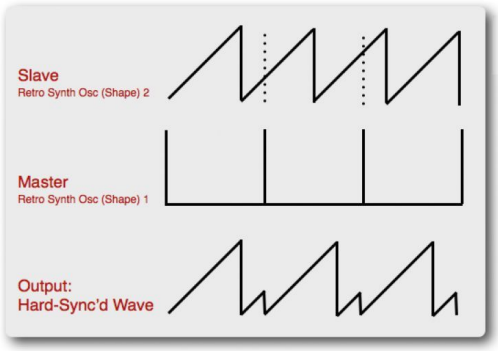


Fig 13. Exemple du Hard Sync.

- ✓ **Soft Sync:** Tandis que dans la synchronisation *dure* l'esclave est forcé de se ré-initialiser peu importe de la position ou la direction de l'onde, créant parfois des formes asymétriques, la synchronisation *douce* se base sur les harmoniques des signaux.

iv) Modelage du signal

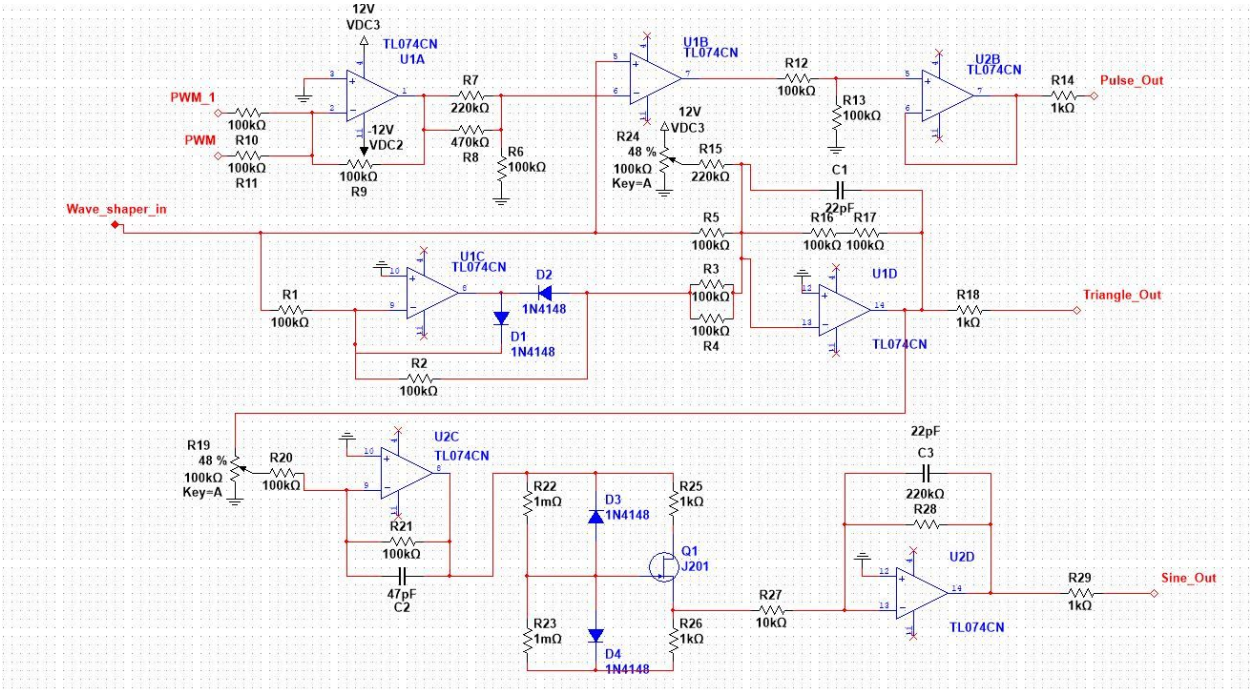


Fig 14. Circuit de modelage du signal.

Une fois le signal rampe généré, il nous faut une autre partie de circuit pour transformer ce signal et générer d'autres formes (Sinusoïde, Carré, Triangle):

► <u>Le signal Carré:</u>

Afin de créer un signal carré avec une modulation du rapport cyclique, il suffit d'un simple circuit comparateur. Le signal en dent de scie est comparé avec une entrée d'un certain voltage. Ceci est effectué grâce à l'amplificateur opérationnel U1B. R6, R7 et R8 forment un pont diviseur de tension pour ajuster l'amplitude du signal à environ +/- 5V, ce qui correspond au signal rampe que nous avons. L'amplificateur opérationnel U2B sert de buffer.

► Le signal Triangle:

Le signal triangle est créé à partir du signal rampe par un **redressement à double alternance**. L'amplificateur U1C prend la partie positive du signal et l'inverse. La partie négative est "remplacée" par 0V. Ce signal la est ensuite ajouté deux fois au signal rampe original, ce qui crée un signal triangle. A l'aide d'un offset introduit par le potentiomètre R24, ce signal pourra être centré sur 0. L'amplificateur opérationnel U1D va alors doubler le gain pour avoir le signal entre +/- 5V.

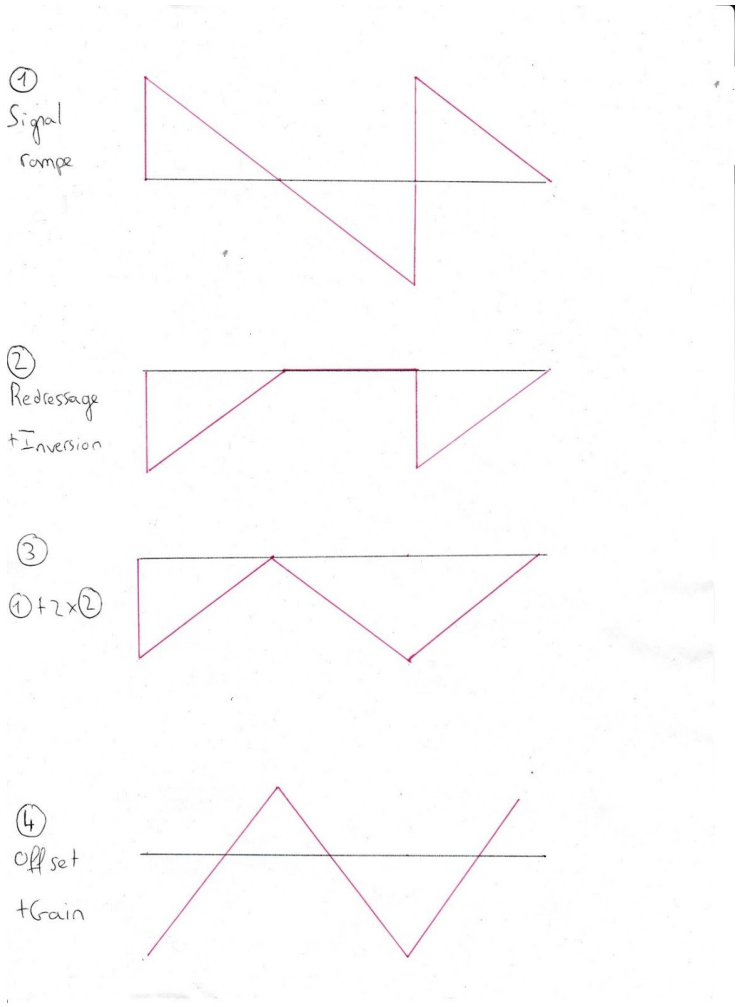


Fig 15. Signal Triangle.

► Le signal Sinusoïdal:

Le signal sinusoïdal est, quant à lui, créé à partir du signal triangle. Je n'ai pas compris le fonctionnement de cette partie du circuit en détail. Ce que j'ai pu comprendre c'est que selon la polarité de l'entrée, les diodes D3 et D4 limitent la tension à la gate de Q1. La saturation de ce transistor JFET donne la conversion en sinusoïde. Les différents amplificateurs opérationnels servent à amplifier le signal.

J'ai choisi ce design car il permettait d'obtenir un taux de distorsion harmonique inférieur à 1% et se retrouvait dans de nombreux synthétiseurs classiques de l'époque[10].

v) Simulation et calcul du taux de distorsion harmonique

► THD, qu'est ce que c'est ? Le taux de distorsion harmonique représente la variation d'un signal comparé à une référence. Il est gage de la qualité d'un signal. Il se calcule à l'aide de la formule suivante : $THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Q_h}{Q_1}\right)^2}$

avec :

► Qh : valeur efficace de l'harmonique au rang h du courant / de la tension

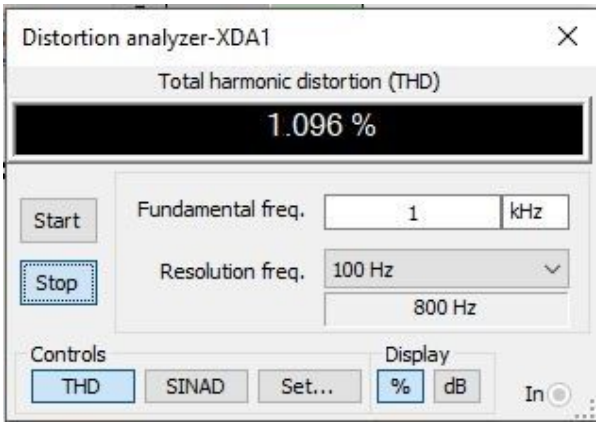
► Q1 : composante principale

► h : rang harmonique

► H : rang harmonique maximal, en principe illimité

[10] Pour plus d'informations : http://www.timstinchcombe.co.uk/index.php?pge=trisin
https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/electronics-lab-12sg

Multisim a un module de calcul du taux de distorsion harmonique intégré. Cela m'a permis de vérifier la qualité du signal sans trop de calculs compliqués :



Le taux harmonic pour une sinusoïde à 1kHz est de 1.096%, très proche de 0. Le signal sinusoïdal généré par la transformation de la dent de scie est donc de très bonne qualité.

vi) PCB

Une fois le circuit complet mis en place, et les différents test réalisés, il était temps de construire le pcb. Comme l'intégralité de mes tests étaient réalisés sur **Multisim** j'ai décidé d'utiliser le software associé développé par National Instrument : **UltiBoard**.

J'ai dû préalablement choisir un **package** pour chacun de mes composants. J'ai donc cherché les composants utilisés un par un, afin d'avoir les **footprints** correspondants. Un circuit de cette taille était très compliqué à mettre en œuvre. N'ayant pas fait de PCB depuis le module de CCE de 3A, je n'avais plus les réflexes et était perdu. Après avoir demandé conseil à Mr. Flammen, j'ai pu commencer un peu plus sereinement. Tout d'abord j'essayais de mettre tout en place en reliant les masses, alors que celles-ci sont fondues dans le plan de masse à la toute fin. Ensuite j'ai utilisé mon schémas en parallèle pour suivre le placement des composants.

L'élaboration du PCB a pris plusieurs jours de mon programme. Plusieurs versions sont sorties de cela, avec à chaque fois des changements mineurs à appliquer (piste avec un angle aigus, orphelins etc..). Une fois que tout était correctement en place j'ai pu lancer en production la carte.

Remarque: J'avais oublié de mettre des capacités de découplage autour de chaque amplificateur opérationnel. Multisim permet de les rajouter et de mettre à jour le PCB sans perdre les placements effectués auparavant'.

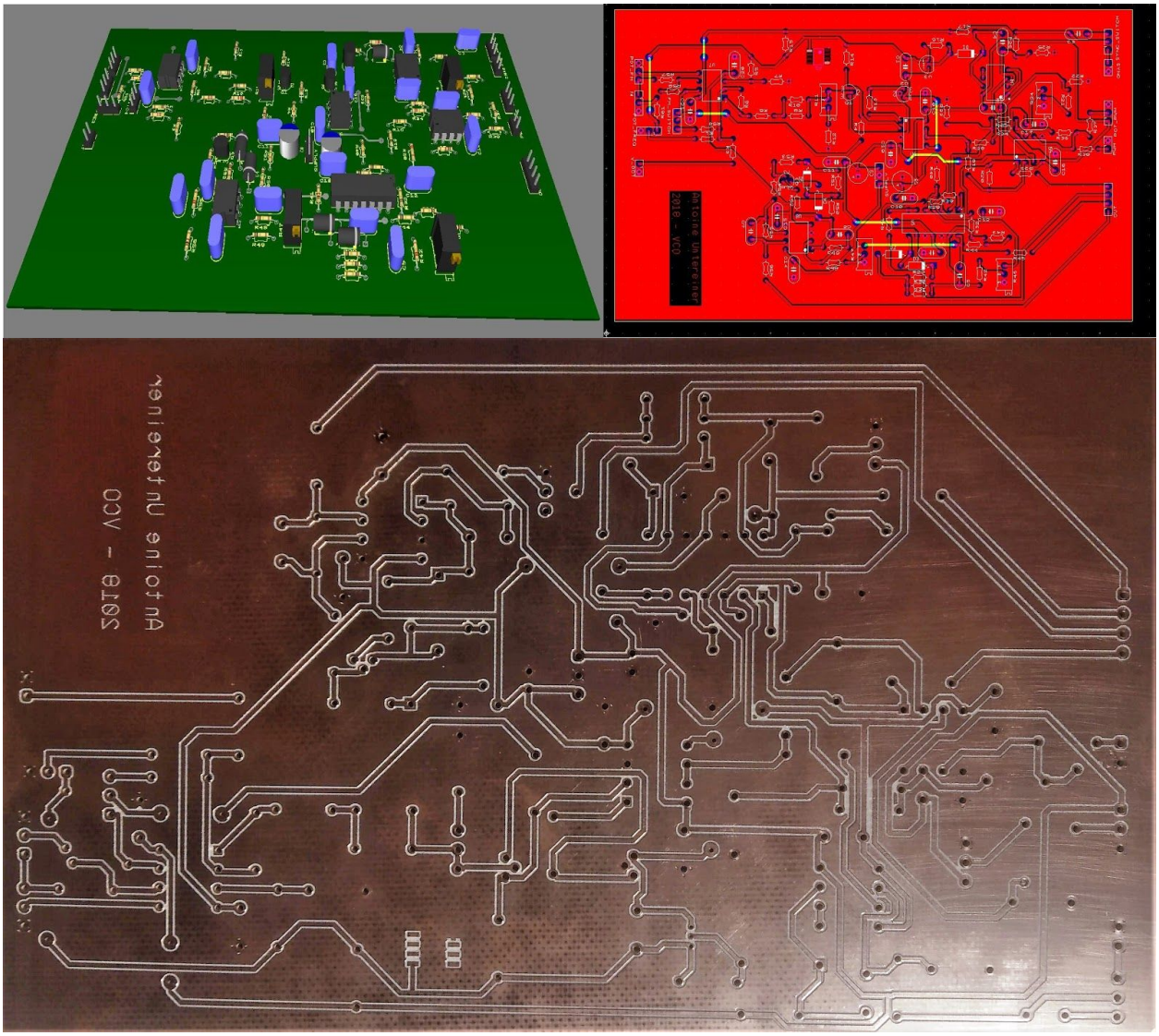


Fig 16. Elaboration du PCB.

c) ***Réalisation***

Il est préférable de l'annoncer directement: le VCO ne fonctionne pas. En effet, après avoir passé plusieurs jours sur le debuggage du circuit, je n'ai toujours pas trouvé la source du problème. Ceci est une grande déception, car bien que j'étais conscient de la différence simulation/pratique, les résultats étaient complètements différents. Je vais rendre compte ici des méthodes de troubleshooting mises en place.

i) Appairage des transistors

► Qu'est ce que c'est ?

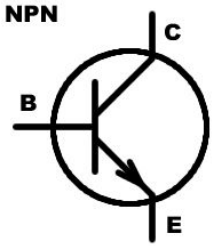


Fig 17. Transistor NPN

Si l'on prend un transistor NPN (comme le BC547 utilisé dans les différents montages), nous avons l'équation suivante:

$$IE = IS(e^{\frac{VBE}{VT}} - 1)$$

où IS est le courant de saturation, VBE est la tension base émetteur. Le courant passant dans le transistor dépend alors du courant IS. Ce paramètre diffère d'un transistor à l'autre selon la manière dont il a été manufacturé, et selon la température. Lors de la réalisation d'amplificateurs différentiels, il est nécessaire d'avoir un paramètre IS quasi-égal entre les transistors.

► Circuit de test : Grâce à un circuit[11] de test trouvé en ligne, j'ai pu tester un ensemble de transistors afin de trouver une paire qui convenait. Le but est de mesurer une tension la plus proche de 0V possible.

[11] Transistor Matcing - Ian Fritz:
http://www.dragonflyalley.com/synth/images/TransistorMatching/ianFritz-transmat0011_144.pdf

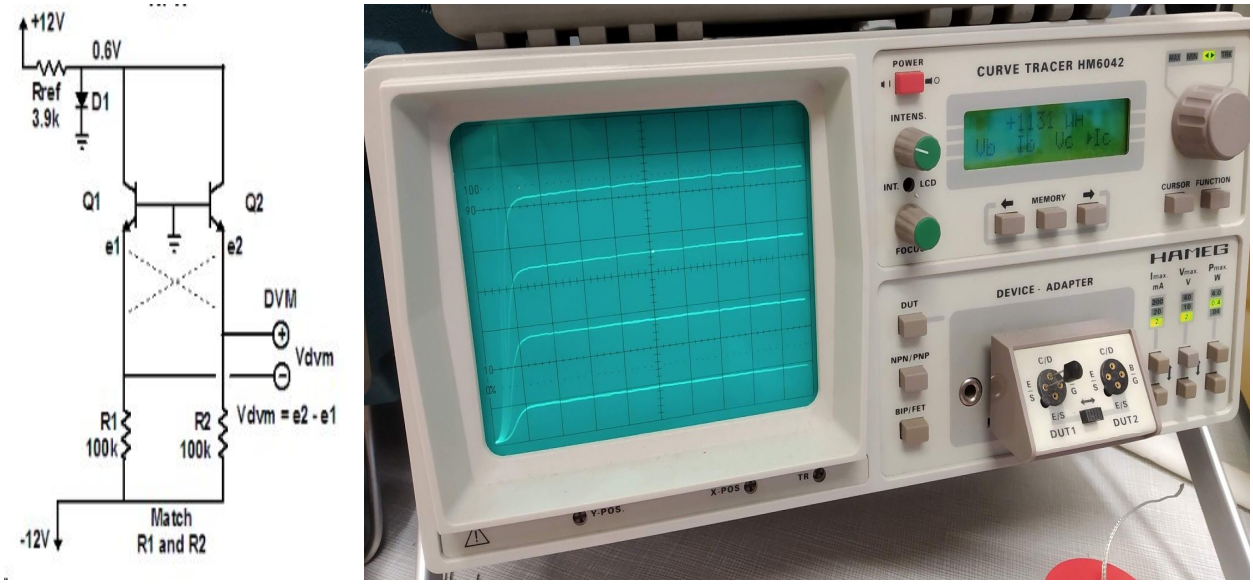


Fig 18. Les deux méthodes d'appairage

J'ai pu confirmer l'appairage à l'aide d'une machine disponible à l'atelier électronique. Celle-ci permet de tracer les courbes caractéristiques du transistor. Les valeurs de Ib étant fixes, et étant donné que $Ib = \beta IC$, si on trouve des valeurs de IC similaires, les transistors ont le même β et son appairés.

ii) Routine de soudure et de test

Afin d'assurer une qualité de soudure et de transmission des signaux plusieurs mesures ont été mises en place:

- PCB nettoyé et badigeonné de flux afin de créer une couche protectrice et faciliter la soudure.
- Test après chaque soudure de court-circuits et de liaison effective.
- Allumage du circuit sans les amplificateurs, test des points d'alimentation.
- Ajout des amplis un par un, tout en vérifiant le courant consommé pour repérer un éventuel court-circuit.

Erreurs détectées :

► Tout d'abord je me suis rendu compte que mes capacités de découplage au niveau de l'alimentation étaient montées à l'envers. En effet le courant consommé atteignait la limite fixée mais de manière progressive, symbolique d'une capacité.

► Mauvais dimensionnement de la résistance pour la référence de tension de 5V, le courant consommé était trop important face à celui disponible. Pour calculer la résistance nécessaire j'ai soudé un potentiomètre en parallèle et lorsque la tension 5V est apparue j'ai relevé la valeur.

► Le signal en dent de scie était effectivement bien présent en sortie mais un signal parasite venait créer une oscillation sur le début de la courbe. J'ai donc observé une à une les entrées/sorties des amplificateurs opérationnels. Après plusieurs heures de recherche il semblerait que c'est l'entrée *Sync* qui perturberait le signal. J'ai donc coupé la piste correspondante, et le problème était quasiment réglé.

Cependant, le problème subsistant est le fait que la fréquence ne semble pas changer (ni avec le potentiomètre, ni avec l'entrée CV). Pourtant, le montage sommateur et diviseur de tension fonctionne. Je n'ai malheureusement pas réussi à résoudre le problème.

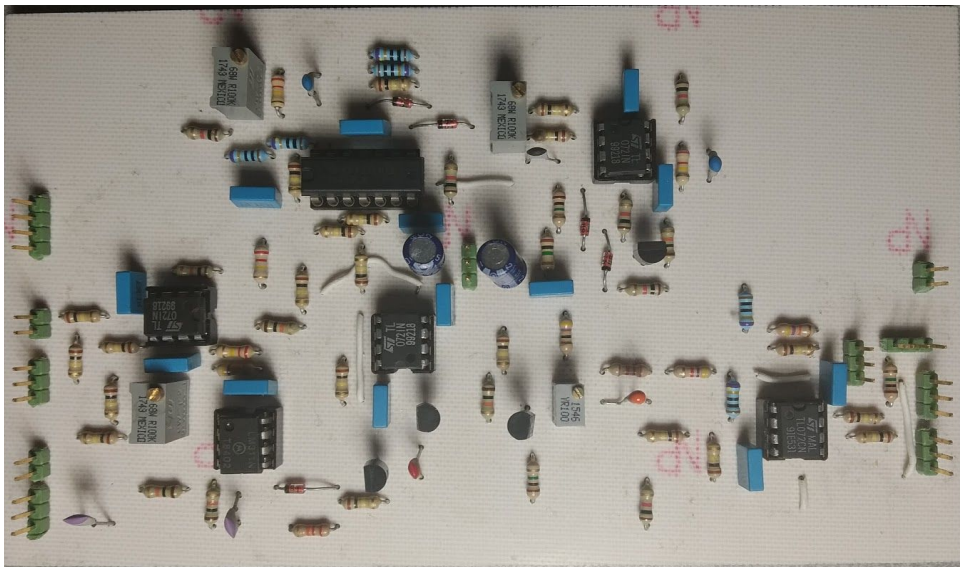


Fig 19. Le VCO

V/ Solution de secours : Le VCO numérique

Bien qu'attristé par l'échec que fut ce VCO, j'ai décidé de réaliser un VCO numérique sur Arduino. N'étant plus qu'à quelques jours de la soutenance, j'ai utilisé une librairie nommée *Volume3*[12]. Celle-ci permet de reprendre la fonctionnalité **tone** native à l'arduino et ajoute une gestion du volume.

a) ***Gestion de la fréquence***

Principe même du VCO, la fréquence se doit d'être variable et d'être contrôlée par un signal externe. J'ai donc repris le circuit MIDI IN que j'avais mis en place. J'ai alors établi un tableau de fréquences correspondantes à chaque note. Pour ceci j'ai utilisé la formule suivante :

$$f_n = f_0 * (a)^n$$

où :

f_0 est la fréquence d'une note de référence. D'usage, on utilise le LA4, soit f_0 = 440 Hz.

n est le nombre de demi tons qui séparent la note n de la note de référence. D'une note plus aigüe résultera un n positif, d'une note plus grave un n négatif.

f_n est la fréquence voulue.

$a = (2)^{1/12}$ est le nombre qui, mis à la puissance 12, vaut deux, symbolisant ainsi une octave supérieure, avec une fréquence doublée.

Lors de la réception d'un signal MIDI, il suffira de faire correspondre à la note reçue un indice du tableau pour jouer la note voulue.

[12] https://github.com/connornishijima/arduino-volume3

b) Réception du MIDI

Pour recevoir le MIDI, l'arduino passe par son port Série. La librairie évoquée plus haut comportait certains bug, j'ai donc décidé d'écrire le code moi-même:

► Variables :

- **unsigned char count :** les messages MIDI se composent de trois octets. Cette variable permet de récupérer les données tout en sachant quel octet est traité
- **unsigned char m[2] :** ce tableau contient donc le message MIDI, 3 octets étant respectivement la commande, la note, la vélocité (dans le cadre d'une note jouée).

► Boucle:

La boucle attend les messages. Lorsqu'elle en reçoit un, elle l'examine octet par octet. Si c'est un octet supérieur à 127 c'est un octet de **commande** sinon, c'est un octet de **donnée.** Les données sont donc vérifiées (0x90 pour une commande **NoteOn**, 0x80 pour une commande **NoteOff**) et les fonctions sont appelées.

► Fonctions:

- **void noteOn(byte ch, byte n, byte n) :** Cette fonction regarde dans un premier temps si la vélocité est nulle, auquel cas la commande revient à un arrêt de note. Sinon on envoie le signal gate nécessaire au déclenchement de l'ADSR (voir plus tard), on change la fréquence et on ajuste le volume. En effet, l'avantage de cette librairie est que la vélocité (codée entre 0 et 127) peut être utilisée pour gérer le volume. Ainsi, comme sur un vrai piano, plus la note est enfoncée fortement, plus le volume sera élevé.

- **void noteOff(byte ch, byte n, byte n) :** Ici on enlève seulement la gate de l'ADSR, entraînant la fermeture du VCA et la coupure du son.

VI/ DSP : ADSR

► Qu'est ce que c'est ? Le terme « ADSR » est l'acronyme pour **Attack / Decay / Sustain / Release**. Évoluants ensemble, ces 4 paramètres permettent de définir un son donné (note de piano, cri d'un loup etc..). Ils définissent la construction d'un son, que celui-ci soit artificiel ou naturel, percussif ou persistant.

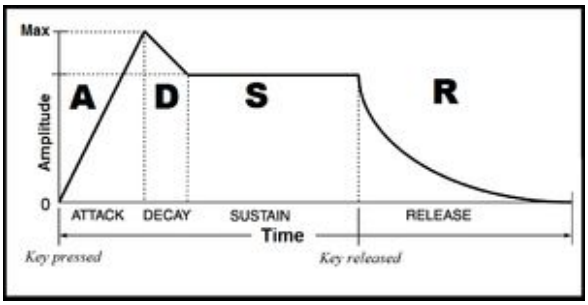


Fig 20. ADSR

- **Attack :** Temps que met le son pour obtenir son amplitude maximale (puissance de crête) au moment où la touche de l'instrument est enfoncée. La tension, nulle au départ, est déclenchée par le trigger et croît rapidement pour atteindre son maximum.
- **Decay :** Temps de la chute du volume sonore entre le niveau de crête (l'attack) et le maintien (sustain).
- **Sustain :** Niveau sonore conservé tant que la touche de l'instrument est enfoncée.
- **Release :** Temps que met le son à s'éteindre après le relâchement de la touche.

a) Codage de l'ADSR

Comme annoncé au début du projet, cette enveloppe sera générée à l'aide d'un arduino. Ce que j'ai évoqué précédemment, c'est que le déclenchement de l'enveloppe se fait lorsqu'une touche est appuyée. Pour savoir cela, c'est le VCO numérique qui va envoyer un signal appelé "'Gate"' lorsqu'une note est jouée, correspondant à un simple état haut.

Lorsque ce signal est reçu, on peut lancer la génération de l'ADSR en 4 phases:

► Attack:

```
if(note_play==false){
  decay = false;
  d=4096;
  t=t1;
  note_play=true;
}
```

On regarde dans un premier temps si une note n'est pas jouée. Si ce n'est pas le cas, on lance une phase d'attaque vers le maximum du DAC (4096) avec une constante de temps t1 et on signale qu'une note est jouée.

Decay ◄

Si l'on n'est pas déjà dans la phase de Decay, que l'enveloppe est déjà assez haute (sensibilité à régler) et que l'on se dirige vers le maximum, on peut entamer la descente vers le niveau de sustain.

```
if((decay==false)&&(env>4000)&&(d==4096)){
  decay = true;
  d=sustain_Level;
  t=t2;
}
```

► Sustain: Il n'y a rien à faire ici, une fois la valeur de sustain atteinte, tant que la note est maintenue, on reste dans la boucle et le niveau est maintenu.

► Release:

```
if(note_play==true){
  d=0.1;
  t=t3;
  note_play=false;
}
```

Si l'on est en train de jouer une note et qu'on est sorti de la boucle, alors on entame la phase de redescente vers 0 avec la constante de temps t3.

► L'enveloppe: Cette dernière est calculée grâce à l'équation différentielle[13] suivante :

$$y(k) = (1 - alpha) * x(k) + alpha * y(k-1)$$

Et les constantes de temps sont modifiées selon les 4 potentiomètres d'entrée.

[13] https://dsp.stackexchange.com/questions/2555/help-with-equations-for-exponential-adsr-envelope

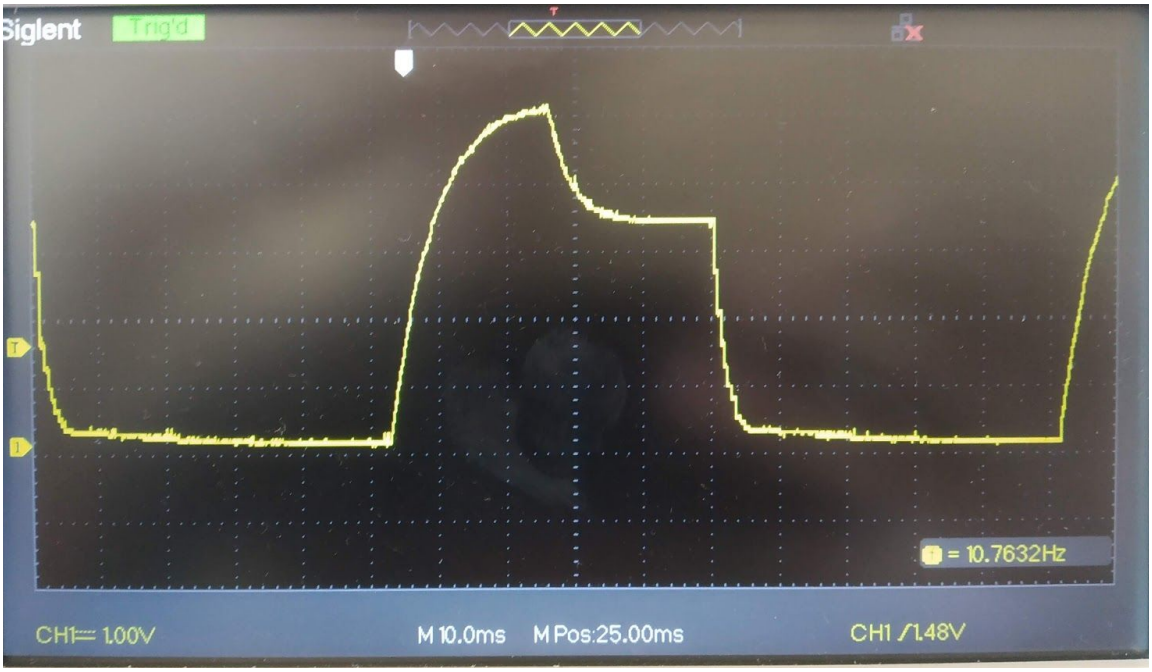


Fig 21. Enveloppe générée

Mais alors que faire de cette enveloppe générée ? C'est la que la caractéristique commandable de l'amplificateur intervient. La tension de sortie de l'ADSR est appliquée à l'entrée de commande du VCA. L'entrée qui reçoit le signal est raccordée à la sortie du module de filtrage (le VCF) dont le niveau peut être constant ou variable. Quand la tension de commande est nulle, aucun son ne peut sortir du VCA. Par contre, quand la tension du générateur d'enveloppe agit, le VCA transmet le signal avec une amplitude proportionnelle à la valeur du signal délivrée par le générateur d'enveloppe.

VII/ Le VCA

Le VCA que j'ai décidé d'utiliser se base sur un amplificateur différentiel[14] :

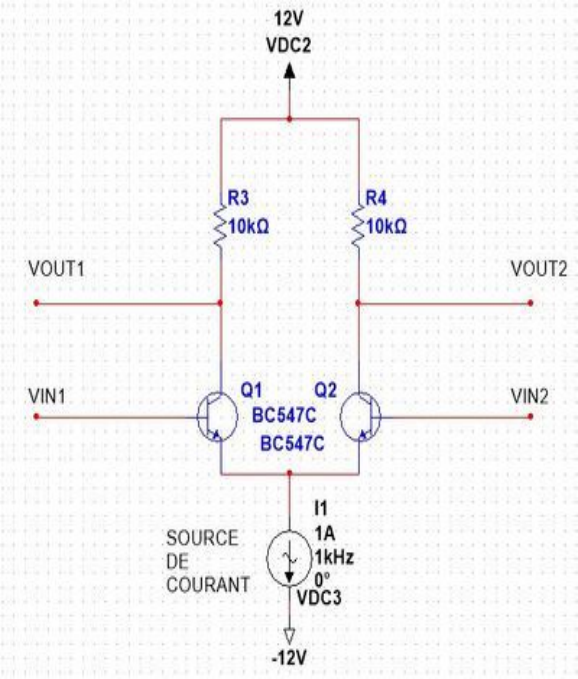


Fig 22. Amplificateur différentiel

L'amplificateur se base sur deux transistors identiques ayants leur émetteurs connectés ensemble, et leur collecteurs connectés à la source de tension positive via deux résistances identiques. Sur le principe de l'amplificateur différentiel on aura alors $Vin = Vin2 - Vin1$ et $Vout = Vout2 - Vout1$.

Supposons dans un premier temps que **Vin=0V**. On a donc Vin1 = Vin2, le circuit est symétrique et donc la moitié du courant passe à travers Q1, l'autre à travers Q2. Le courant à travers des deux résistances et donc Vout est nul.

Si on augmente Vin2, Q1 est légèrement plus passant et donc le courant y circule plus facilement. Ainsi, il y a plus de courant à travers R1, donc Vout1 diminue et Vout2 augmente. La sortie est négative et l'amplificateur est **inverseur**.

En se référant à l'article d' *Analog Devices* on trouve que pour un petit signal : $V_{out} = \frac{IR}{2VT}$

I est le courant à travers la source de courant. Le gain augmente proportionnellement à I. Ainsi, tout comme pour le VCO, nous pouvons établir un circuit de conversion Tension<->Courant afin de commander en tension le gain.

[14] Explication détaillée https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/chapter-12

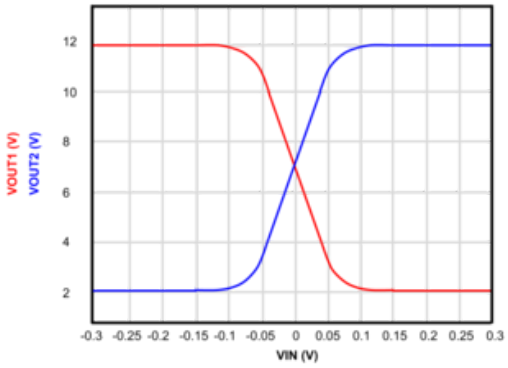


Fig 23. Simulation du VCA

La simulation ci-contre montre les tensions de sortie en fonction de VIn. La symétrie du circuit est bien reflétée et la zone linéaire est d'un peu moins de 10 millivolts comme attendu, et le gain est d'environ 200.

L'équation est valide lorsque Vin est bien inférieur à 2VT. Pour des valeurs de tension plus élevées, l'amplificateur sature. Pour rester dans le régime linéaire, le signal d'entrée est divisé par un facteur 220 (valeur basée sur l'amplification d'un signal +/- 5V) sans distorsion.

Les sorties Vout1 et Vout2 passent à travers un amplificateur opérationnel qui permet d'avoir la sortie Vout, et ayant un gain permettant de restaurer le signal à son niveau original.

Afin de contrôler le gain, une simple résistance (R10) sert de source de courant. Le courant est établie par la tension imposée à entremetteur de Q3. Le trimmer R18 permet de régler afin que le son soit complètement éteint lorsque le gain est à 0. Pour un meilleur résultat, il faut que les transistors Q1 et Q2 soient appairés.

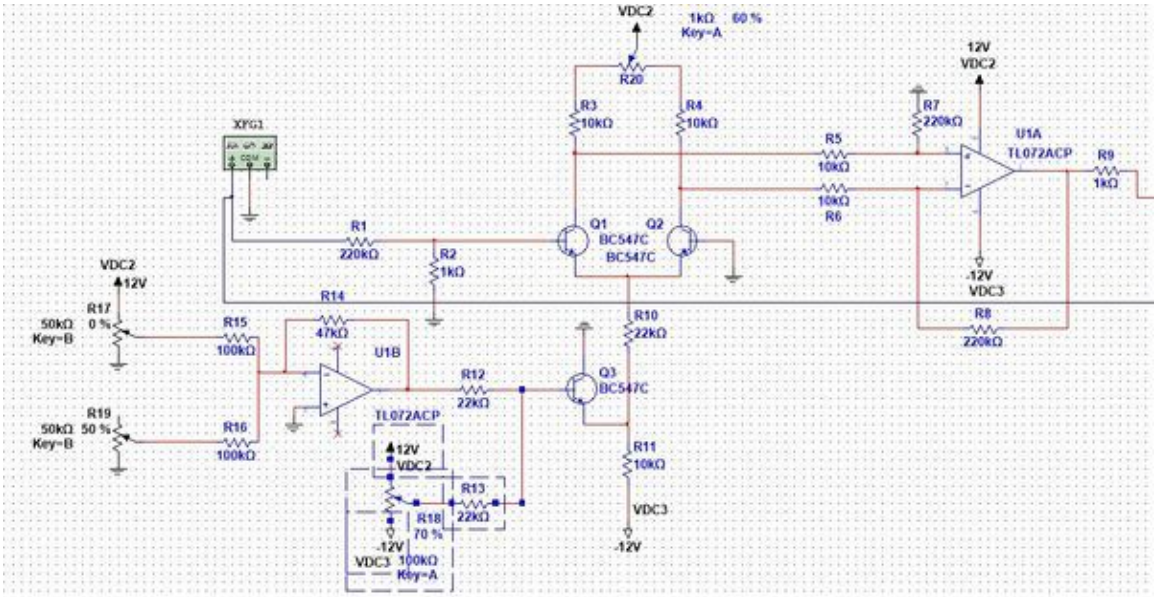


Fig 24. Schéma du VCA

VII/ Le VCF

a) *Topologie de Sallen-Key*

Abandonner l'idée de faire le VCO du MS-10 m'avait un peu fait mal au cœur, étant donné que c'est un synthétiseur très cher à mes yeux. J'ai donc décidé de laisser une place à son grand frère, le MS-20, et d'emprunter son fameux VCF qui a un son très caractéristique.

Ce VCF (**Voltage Controlled Oscillator**) se base sur une topologie de Sallen-Key. Les filtres ainsi réalisés sont des filtres actifs construits à partir de réseaux RC, comportant seulement des résistors et des condensateurs. Cela permet entre autre de les faire fonctionner à basse fréquence, dans le domaine audio en l'occurrence.

Le filtre du MS-20 est un filtre passe-bas du second ordre. Voici le schéma d'un filtre passe-bas dans la topologie Sallen-Key:

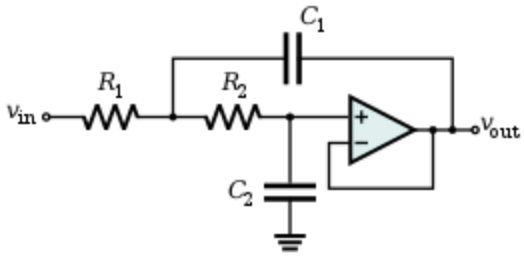


Fig 25. Filtre Passe Bas - Sallen Key

On a donc un amplificateur de tension de gain K, d'impédance d'entrée infinie et d'impédance de sortie nulle. On utilise un montage suiveur afin de conserver un gain K=1. En appliquant loi de Kirchhoff à la borne + de l'amplificateur opérationnel on obtient la fonction de transfert suivante :

$$H(w) = \frac{K}{1 + mj\frac{w}{w_c} + j\frac{w}{w_c^2}}$$

Avec :

- $w_c = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2}}$
- $m = 2\sqrt{C_1 C_2} + \sqrt{\frac{C_1}{C_2}(1-K)}$
- $R = R_1 = R_2$

Comme on peut le remarquer, la fréquence de coupure dépend de R et c'est sur cela qu'on va jouer pour la rendre variable.

b) ***Korg 35 et OTA***

Dans les premiers filtres des Korg MS10 et MS20, Korg avait développé une puce nommée la **Korg35**. Jouant sur deux transistors en saturation inverse, il pouvaient ainsi créer des résistances variables contrôlées par courant. Dans les modèles plus récent, le filtre est en réalité basé sur des amplificateurs opérationnels à transconductance.

► OTA: Operational Transconductance Amplifier :

Un OTA (amplificateur à transconductance) fournit un courant de sortie Io proportionnel à la tension différentielle d'entrée: $I_o = gm\,(V^+ - V^-)$

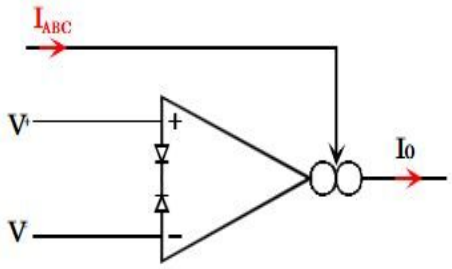


Fig 26. OTA

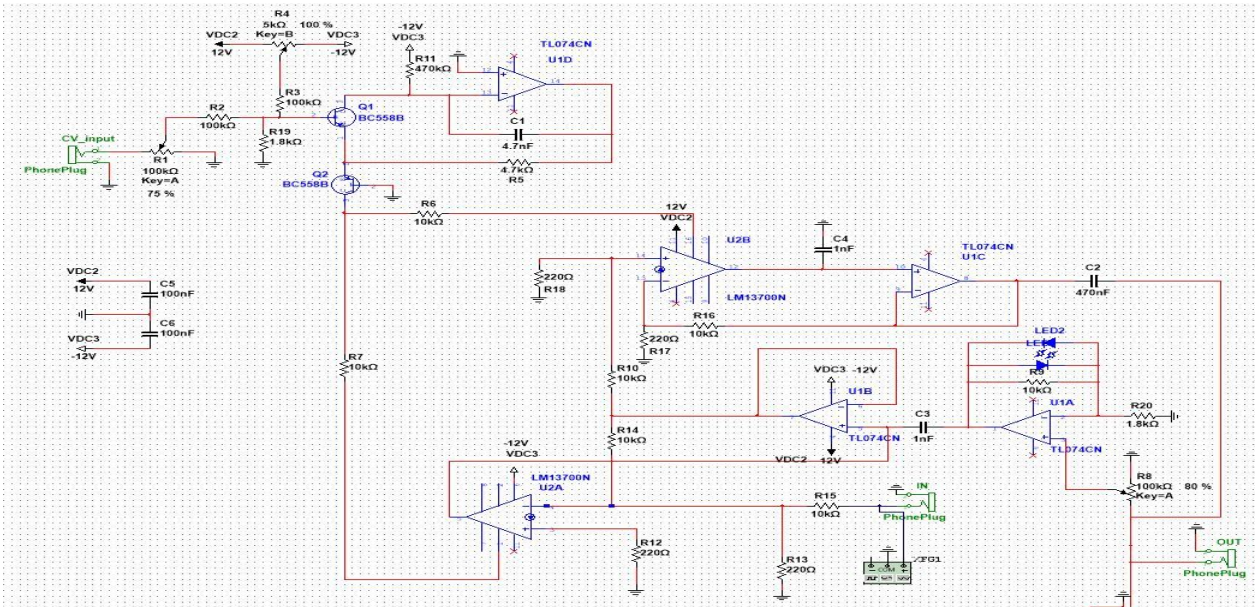


Fig 27. VCF

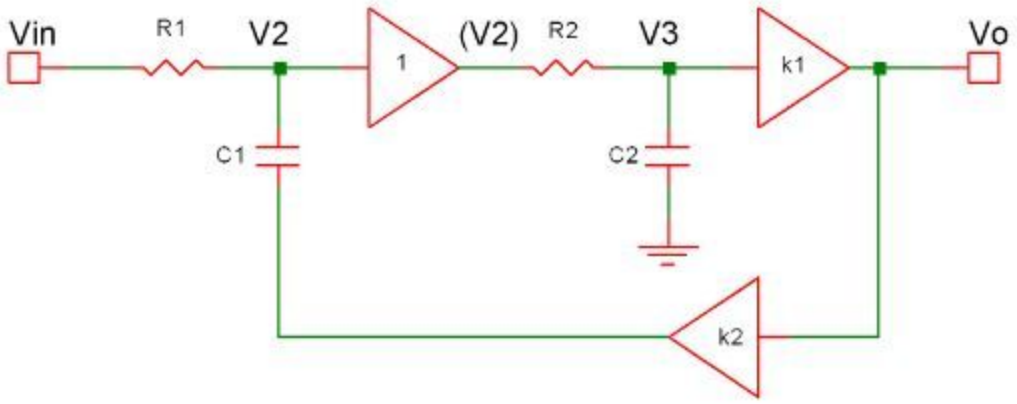


Fig 27b. Deux topologies Sallen-Keys chaînées

Les filtres de Korg sont en réalité deux filtres de Sallen-Key en série. Si l'on met le circuit ci-dessus en parallèle avec cette topologie, on peut voir que :

- Les résistances variables sont réalisées par les deux OTA **U2A** et **U2B**.
- Le gain **k1** est le gain unitaire réalisé par l'amplificateur opérationnel en configuration buffer à la sortie de **U2B**.
- Le gain **k2** dépend de la configuration de **U1A** dont une des entrée est reliée au potentiomètre **Resonance**.

Une suite de calculs mathématiques et de propriétés physiques permettent de trouver la fonction de transfert:

$$\frac{v_o}{V_{in}} = \frac{-K1}{\frac{s^2}{\omega_c{}^2} + (2 - k_1 k_2) * \frac{s}{w_c} + 1}$$

La suite des calculs concernant ce filtre est très compliquée et m'a demandé de me replonger dans des cours d'école préparatoire assez avancés. Je ne rendrai pas compte de ma lecture ici. Il existe cependant des articles très bien détaillés.[15]

Les simulations réalisées et concluantes j'ai lancé la carte en production.

[15] http://www.timstinchcombe.co.uk/synth/MS20_study.pdf

VIII/ Boîtier et sertissage des câbles

Dans un soucis de praticité et d'efficacité, j'ai décidé de sertir des connecteurs moi même. Bien que cela m'a pris une après-midi entière, cela a facilité la suite. En effet, les modules étant un à un séparés, les points d'accès sous forme de connecteurs permettent de les interchanger. Si, à l'avenir, je souhaite ajouter une fonctionnalité il me suffira de retirer la carte obsolète. Cela va de soi pour une carte devant être examinée car défectueuse.

Pour cela j'ai eu la chance d'avoir accès à du matériel au service électronique:

► Torsadage des câbles : Pour cela, j'ai utilisé deux ou trois (selon le connecteur souhaité) câbles noués, tendus et accrochés d'un côté à une perçeuse. Lorsque la perceuse est en marche, les fils vont se torsader et la longueur va réduire. Lorsque l'espacement entre deux spires est de 1.5cm, les câbles sont prêts et il faut les relâcher doucement jusqu'à qu'ils restent en place.

► Découpe et sertissage des connecteurs: Une fois les câbles prêts, il m'a fallu découper les connecteurs un à un, dénuder chaque fils coupés à une longueur choisie, les sertir à l'aide d'une pince spéciale et mettre les câbles dans les connecteurs.

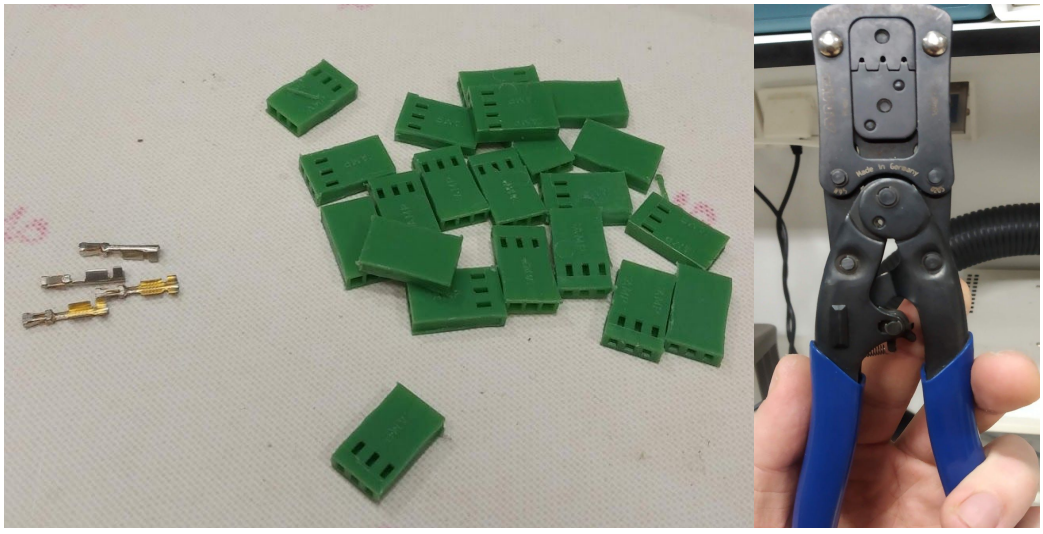


Fig 28. Connecteurs et pince pour sertissage

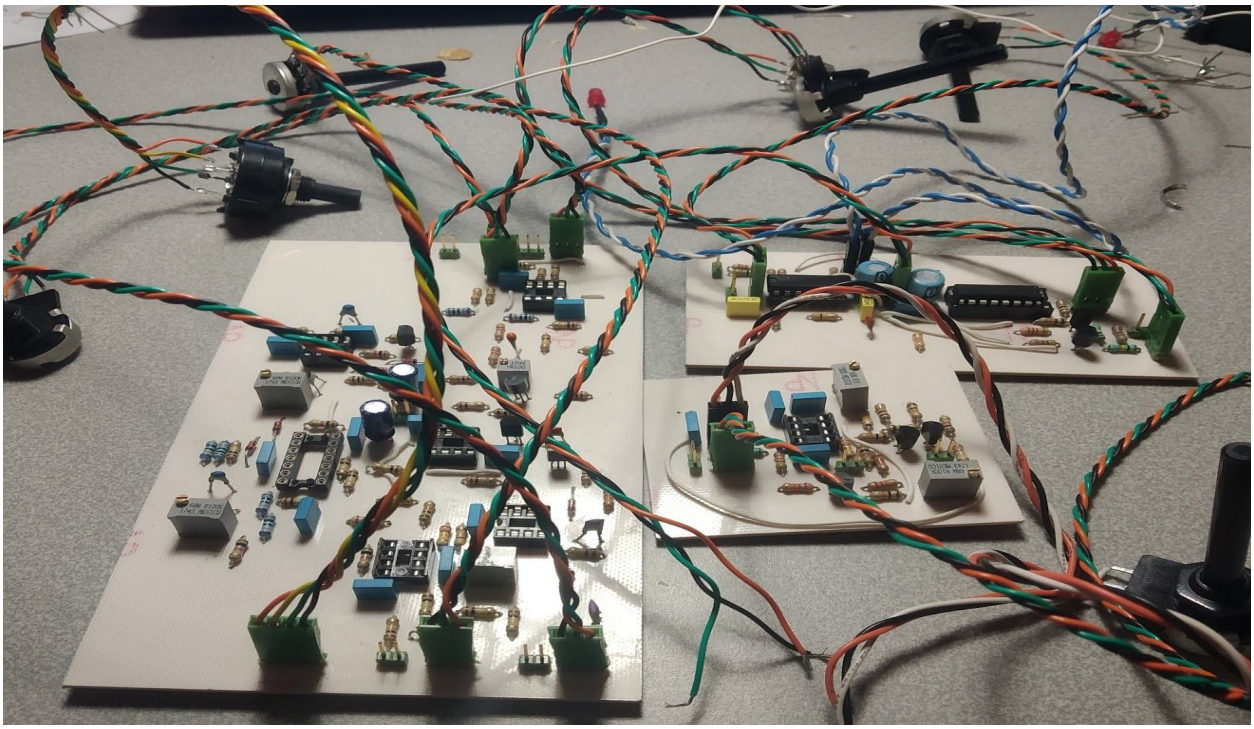


Fig 29. Les trois modules VCO, VCF et VCA

Quant au boîtier, j'ai utilisé un vieux boîtier donné par Monsieur Flammen. L'idée était d'avoir un produit à l'aspect fini, tout du moins fermé, le jour de la présentation. Je suis actuellement en train de travailler sur le design pour donner un aspect plus professionnel au produit.

Fig 29b. Le boitier

CONCLUSION

Bien que le résultat final n'est pas celui escompté, cette expérience était très enrichissante. En plus de me conforter dans mon projet professionnel, ce projet m'a permis de découvrir et de comprendre des notion essentielles à la conception d'un synthétiseur.
Au delà de ça, cela m'a aussi permis d'approcher une gestion de projet en autonomie. Mon erreur principale aura été de sous-estimer la quantité de travail, de viser trop grand et de ne pas prendre en compte les aléas pouvant être des freins à l'avancement (surtout dans la partie pratique).

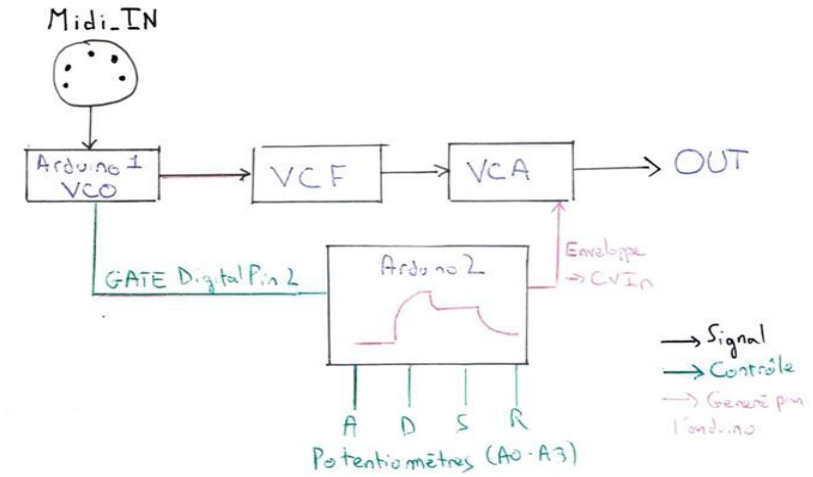


Fig 30. Forme actuelle du synthétiseur

Beaucoup de choix effectués sont discutables et certains paramètres n'ont pas été pris en compte, impactant ainsi le résultat final. Par exemple, pour le VCO, une CEM aurait due être effectuée lors de la conception de la carte, pour éviter toute interférence. De plus, une séparation de l'étage de génération de la rampe et de autres signaux aurait permis un débogage plus rapide.

De ces erreurs est né un apprentissage. Il est certain qu'à l'avenir, je n'aborderai plus un tel projet de la même manière. Mais je n'en démords pas: je compte en effet continuer de travailler sur le synthétiseur jusqu'à qu'il soit dans sa forme finale.