

Synthétiseur, module d'effet et préamplificateur à tube hybrides analogique-numérique (sujets REY1-6)

S. Rey.nal

26 septembre 2017

Table des matières

1	Contexte historique	1
2	Pourquoi une approche hybride analogique-numérique ?	3
3	Cahier des charges général du projet	3
4	Synthétiseur hybride analogique-numérique (REY1 à REY4)	4
4.1	Architecture générale de l'instrument	4
4.2	Oscillateurs (VCO)	4
4.3	Filtres (VCF)	4
4.4	Amplificateurs VCA	7
4.5	Générateurs d'enveloppe ADSR	8
4.6	LFO et matrice de modulation	8
4.7	Interface Homme-Machine, face avant	9
4.8	Interface MIDI & Arpeggiators	9
5	Module d'effet analogique (REY5)	9
6	Distorsion à tubes (partie du sujet REY6)	11
7	Gestion de projet et discipline à respecter pour bien travailler en équipe...	12
8	Pistes pour se mettre dans le bain dès aujourd'hui...	12

1 Contexte historique

L'histoire de la synthèse sonore "électrique" démarre d'une certaine façon avec les ondes martenots et les premiers piano électriques Rhodes après-guerre. Le cœur de ces dispositifs est constitué d'oscillateurs électriques à base de condensateurs, résistances et inductances. Le son est une oscillation de pression qui se propage de proche en proche dans l'air : muni d'un amplificateur et d'un haut-parleur, ces instruments étaient donc capables d'émettre un son, les synthétiseurs étaient nés.

Au cours des années 60 puis 70, la synthèse sonore évolue sous l'impulsion de grandes marques comme Moog ou Korg, et s'éloigne du modèle initial des piano électriques et des

orgues Hammond pour générer des sons nouveaux, artificiels, qui n'ont parfois qu'une lointaine parenté avec les instruments acoustiques de l'orchestre qu'ils étaient destinés à imiter. Plusieurs schémas de synthèse voient le jour au cours de cette période, mais c'est la synthèse soustractive qui emporte l'adhésion des musiciens et des fabricants : ici, un ou plusieurs oscillateurs produisent une forme d'onde riche en harmonique (carré, triangulaire, etc), et un filtre passe-bas est chargé de couper plus ou moins fortement la partie haute du spectre au cours du temps, imitant en cela le mécanisme d'atténuation des hautes fréquences à l'œuvre dans les instruments acoustiques. C'est ce schéma de synthèse que nous retrouvons dans les célèbres Minimoog Voyager, Korg MS20 ou Prophet 2000 dont les sonorités ont constitué l'empreinte sonore de centaines d'albums des 70's et 80's, de Pink Floyd à Kraftwerk ou Depeche Mode.

Au cours des années 80, d'autres schémas émergent, rendus possible par l'intégration poussée des fonctions analogiques (amplification, filtrage) sur un seul chip. Ainsi, la synthèse FM se distingue comme le nouveau paradigme permettant de générer des sons totalement nouveaux, en particulier les sons anharmoniques produits par les cloches, les carillons, xylophones, ... Le DX7 de Yamaha, avec sa synthèse FM à 6 oscillateurs et sa large polyphonie (il est possible de jouer des accords de près de 8 notes simultanément) est l'emblème de cette technique de synthèse, et ses sonorités sont indéniablement associées au "son eighties", de The Cure à Tears for Fears en passant par Michael Jackson, Prince ou Madonna.

Avec l'arrivée d'architectures numériques performantes dans les années 90, c'est la synthèse numérique qui remplace progressivement les technologies analogiques : un microprocesseur génère une forme d'onde plus ou moins complexe, lui applique un filtre dont la coupure dépend du temps, module son amplitude, etc., l'approche purement numérique autorisant des matrices de modulations très variées. C'est aussi au cours des 90's que les samplers prennent leur envol, grâce à l'augmentation de la capacité des mémoires. Ici, les formes d'onde correspondent à des échantillons stockés en mémoire et non à des formes d'ondes calculées en temps réel. On retrouve notamment cette approche dans la série S2000/S5000 et dans les MPC d'Akaï, largement utilisées dans le hip-hop des 90's/2000 chez des artistes comme Beastie Boys, Run DMC, Eminem, Missy Elliott ou Public Enemy.



2 Pourquoi une approche hybride analogique-numérique ?

Nous assistons désormais, et ce depuis le tournant des années 2010, à l'émergence d'une approche hybride mélangeant analogique et numérique, sous l'impulsion de marques prestigieuses comme Dave Smith Instruments à San Francisco, ou Arturia à Paris. L'électronique analogique retrouve en effet depuis quelques années un regain d'intérêt dans le domaine de la synthèse sonore, des racks d'effet et des consoles de mixage par sa capacité à "ré-humaniser" la chaîne de traitement sonore : l'idée est d'enrichir le rendu sonore en insérant des composants analogiques à des endroits judicieux dans la chaîne de traitement audio afin d'exploiter leurs non-linéarités, la grande variabilité de leurs caractéristiques, leur dépendance naturelle à la température, autant de propriétés qui restent lourdes et coûteuses à modéliser dans des systèmes purement numériques "temps réel".

L'intérêt de l'hybridation est également de maintenir un "signal path" (le chemin que parcourt le signal de la source jusqu'à la sortie jack du synthétiseur) qui soit essentiellement analogique, mais de contrôler ces composants via des micro-contrôleurs numériques. On peut espérer, avec cette approche, contourner le principal défaut des systèmes de synthèse purement analogiques : la nécessité de (re)calibrer régulièrement les composants (les fréquences des oscillateurs en particulier, qui influencent directement la justesse de l'instrument).

A titre d'exemple concret, un oscillateur basé sur le circuit [CEM3340](#) de la marque Curtis, produit une onde triangulaire dont la fréquence est contrôlée par la tension présente sur la broche 15. La justesse de l'instrument dépend donc de la capacité à produire une tension précise. Alors qu'une telle tension était générée par un diviseur de tension dans les machines des 80's, aujourd'hui elle peut être produite par un convertisseur numérique-analogique et un micro-contrôleur : elle est donc plus stable dans le temps, plus précise, et le calibrage tension-fréquence (e.g., la connaissance de la tension à générer sur la broche 15 pour produire la note "La4") peut être directement réalisé par le microcontrôleur.

La même approche vaut pour les racks d'effet et les préamplificateurs, dont les caractéristiques peuvent désormais être ajustées par microcontrôleur, tout en maintenant un signal path 100% analogique de bout en bout de la chaîne.

3 Cahier des charges général du projet

L'objectif est de concevoir un instrument sous forme de modules relativement indépendants (VCO, VCF, VCA, génération d'enveloppe [REY1-4], module d'effets en sortie [REY5], préamplificateur à tube [REY6]) que l'on intégrera et connectera lors de l'assemblage dans le boîtier final. Il s'agit donc plus exactement d'un synthétiseur semi-modulaire, donc les modules sont pré-connectés. L'intérêt est de permettre une conception en parallèle distribuée sur plusieurs binômes, mais aussi de s'autoriser à re-définir l'architecture en cours de route sans avoir besoin de redessiner schémas électroniques et PCB.

Le caractère hybride de la machine est due à la coexistence :

- d'un signal path analogique constitué exclusivement de modules à base de circuits intégrés (IC) analogiques
- d'un contrôle purement numérique de ces composants

Le contrôle numérique est réalisé par la collaboration :

- d'une carte embarquée de type Raspberry Pi 3 fonctionnant sous Linux Debian

- d’une interface graphique à écran tactile et éventuellement d’afficheurs à LED permettant d’améliorer l’expérience utilisateur
- d’encodeurs à quadrature situés sur la face avant
- d’un ensemble de convertisseurs numérique-analogique reliés à la carte RPi3 par un bus I2C, et permettant de piloter directement les tensions de commandes des IC’s analogiques (gain des VCA, fréquences des VCO et VCF, etc).

4 Synthétiseur hybride analogue-numérique (REY1 à REY4)

Cette partie concerne plus particulièrement les modules de synthèse sonore, de l’oscillateur au VCA et générateur d’enveloppe.

4.1 Architecture générale de l’instrument

Le synthétiseur dont nous nous inspirons ici est basé sur le schéma dit de ”synthèse soustractive”, c’est-à-dire que l’onde de base produite par un oscillateur est filtrée par un filtre (généralement passe-bas) dont la fréquence de coupure varie au cours du temps afin de reproduire l’atténuation des hautes fréquence au cours du temps dans la plupart des instruments acoustiques. Une fois filtrée, l’onde est ensuite modulée en amplitude afin, ici aussi, de reproduire la variation d’amplitude au cours du temps de la plupart des sons produits par des instruments acoustique (généralement, une phase d’attaque suivie d’une phase de décroissance relativement rapide, puis une phase de tenue pour les instruments à son entretenu, et enfin une phase de relaxation lorsque l’instrumentiste cesse de produire le son).

Le signal path traditionnel d’un tel instrument est illustré Figure 1. Une des premières tâches à envisager sera donc l’implémentation analogique de chaque module fondamental. Pour cela, la marque [Curtis](#) propose de nombreux circuits intégrés analogiques réalisant les fonctions des différents modules (VCO, VCA, VCF). Un bon résumé des différents circuits existant ou ayant existé sur le marché des instruments analogiques est proposé [ici](#).

4.2 Oscillateurs (VCO)

Ce sont des oscillateurs générant des formes d’onde plus ou moins complexes, et donc la fréquence est commandée par une tension. Pour ces modules, on envisagera deux implémentations :

- une implémentation purement analogique, par exemple à base de circuits Curtis [CEM3340](#),
- une purement numérique consistant à générer les formes d’onde via la carte RPi3 et un convertisseur numérique-analogique (ou bien la sortie PWM — à étudier)

L’approche numérique permet de générer des formes d’onde plus complexes, par exemple en utilisant des wavetables, ou par une méthode de synthèse granulaire, tandis que l’approche analogique offre un son généralement plus ”chaud” à cause des non-linéarités et des fluctuations du circuit.

4.3 Filtres (VCF)

Les VCF (voltage controlled filters) sont des filtres (généralement passe-bas mais pas seulement) dont la fréquence de coupure est elle aussi pilotée par une tension de commande. Ici on envisagera des implémentations :

Basic Synthesizer Patch

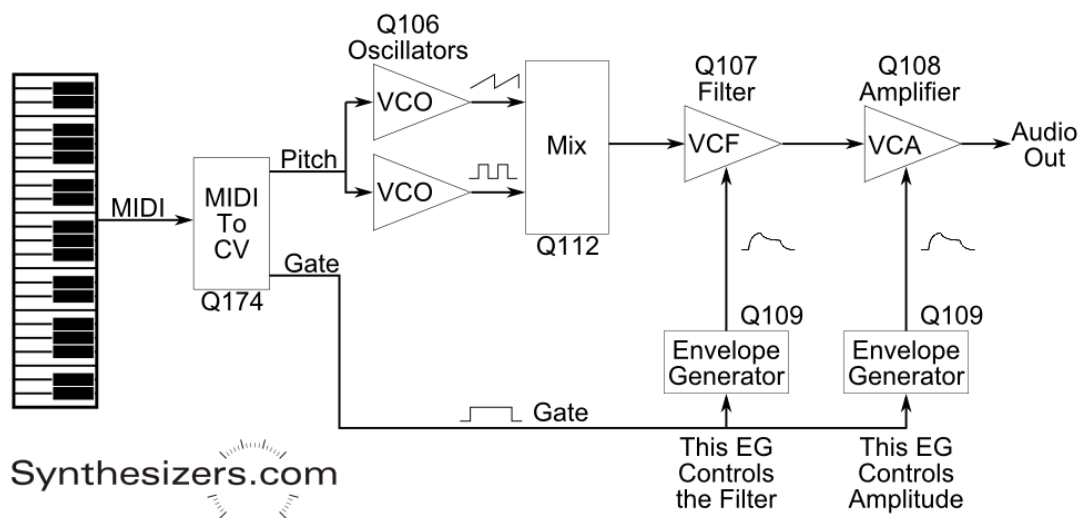


FIGURE 1 – Architecture typique d'un synthétiseur analogique à synthèse soustractive : un clavier produit un code MIDI (entre 0 et 127) correspondant à une note de la gamme, cette note est ensuite convertie en une tension (signal "CV") qui est injectée à la fois à l'entrée des VCO (oscillateurs commandés en tension) afin de produire la fréquence (ou "pitch") appropriée et à l'entrée des générateurs d'enveloppe afin de déclencher la production de l'enveloppe de filtre et d'amplitude adéquate.

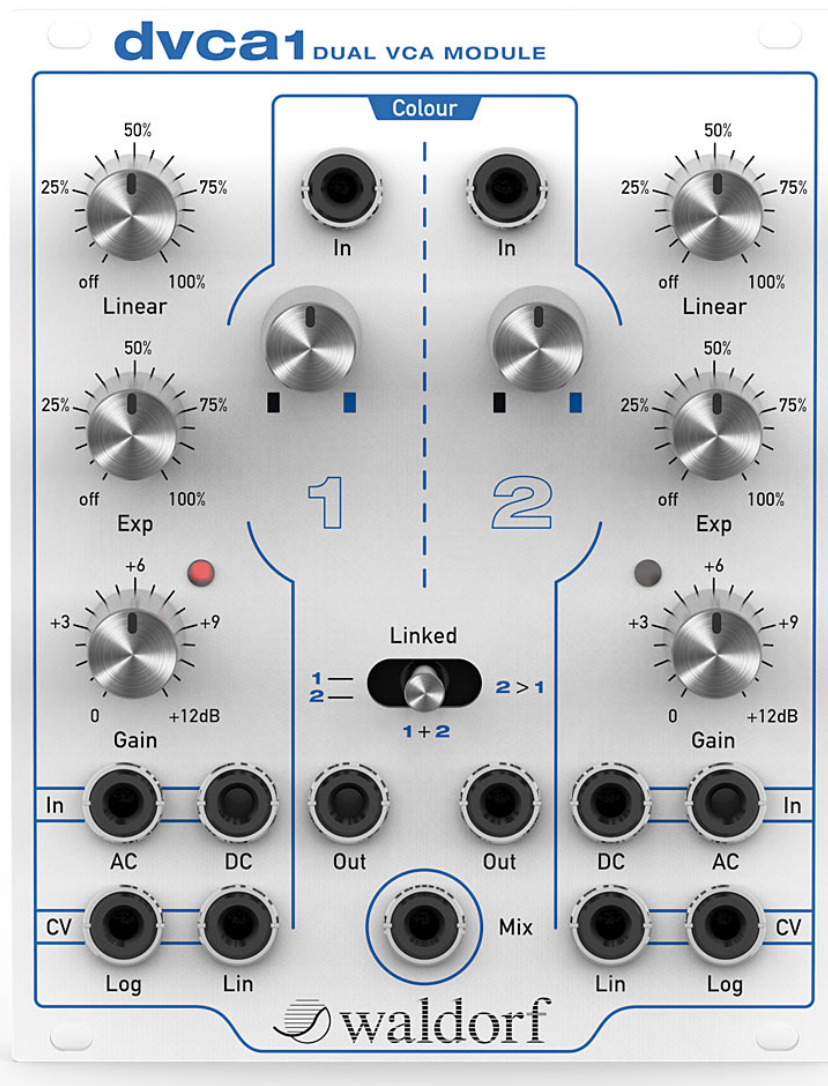


FIGURE 2 – Exemple de module VCA de marque Waldorf destiné à la synthèse modulaire et le PCB "sous le capot" basé sur des circuits SSM2264...

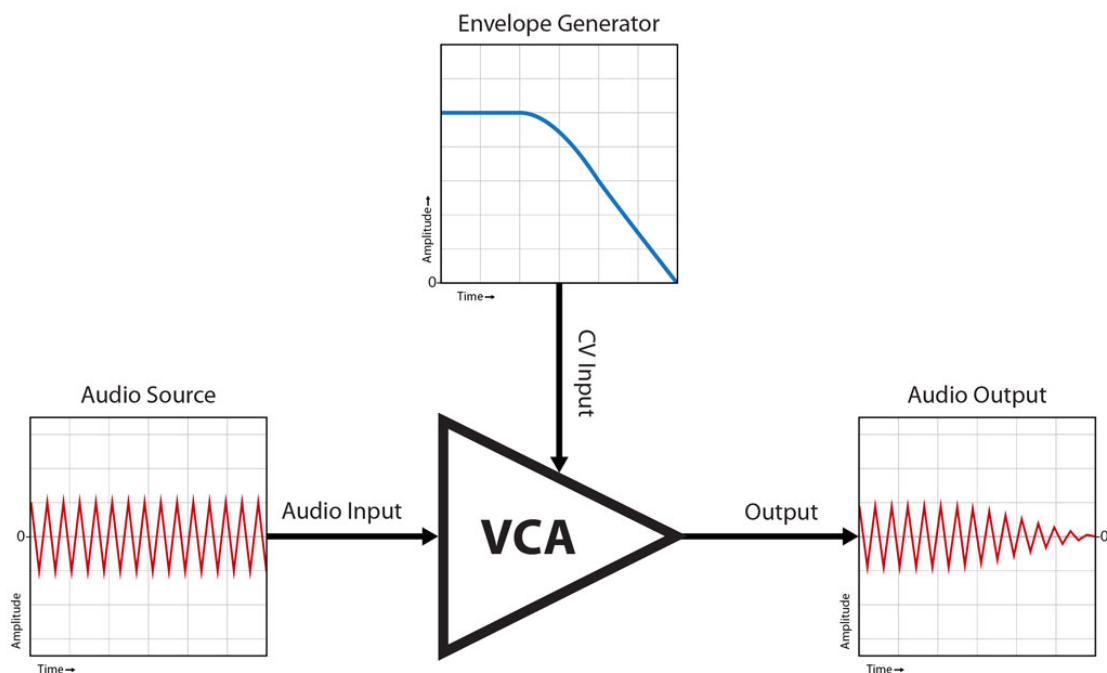


FIGURE 3 – Utilisation typique d’un VCA et d’un générateur d’enveloppe pour moduler l’amplitude d’un oscillateur et donner au son produit un caractère plus réaliste : la source audio est le signal brut produit par le VCO (sinus, triangle, carré, etc) ; le signal transite par un amplificateur contrôlé en tension (VCA) par le générateur d’enveloppe via le contrôle CVInput, et produit le signal modulé ”Audio Output”.

- soit à base d’amplificateurs à transconductance (OTA de type [LM13700](#)), permettant, via l’architecture SVF [State Variable Filter](#), de produire avec un seul circuit des filtres LP (low pass), BP (band pass), AP (all pass, déphaseur) et HP (high pass) ;
- soit à base de circuits intégrés de type [CEM3320](#), qui implémentent déjà un choix particulier d’architecture de filtre.

L’objectif de ces modules VCF est d’ôter des harmoniques au signal au cours de l’évolution temporelle du signal, afin de rendre compte de l’atténuation naturelles (dans les instruments acoustiques) des hautes fréquences. Ainsi par exemple, on utilise un filtre passe-bas pour simuler l’extinction d’une note de piano ou au contraire le régime transitoire initial d’un son de cuivre. De nombreux schémas sont proposés sur le site du fabricant [electric-druid](#).

4.4 Amplificateurs VCA

Ce sont des amplificateurs commandés en tension (voltage controlled amplifier) dont le rôle est de moduler l’amplitude du signal sonore au cours du temps afin de rendre compte des variations naturelles d’amplitude sonore au cours de la ”vie” d’une note produite par un instrument (cf. Figure 3). Sur la plupart des instruments acoustiques, la production physique d’une note implique le démarrage (A :attack) puis la stabilisation (D :decay) d’un oscillateur (corde vibrante, membrane, onde sonore dans un tuyau), le maintien plus ou moins long de l’énergie de l’oscillateur si le son est entretenu (S :sustain,



FIGURE 4 – Enveloppe typique d’amplitude de type ADSR (en rouge) et signal audio résultant (en vert).

cas des instruments à vent ou à corde frottée), puis enfin un régime libre (R :release) au cours duquel l’énergie du système vibrant se dissipe par rayonnement acoustique. Ici aussi on envisagera des solutions à base de circuits OTA.

4.5 Générateurs d’enveloppe ADSR

Les générateurs d’enveloppe (attaque, decay, sustain, release), dont le rôle est de produire les modulations appropriées à la fois des fréquences de coupure des VCF et des enveloppes d’amplitude des VCA ; il arrive très souvent que les enveloppes soient distinctes pour les VCF et les VCA : ainsi pour un son de trompette, l’attaque du VCA est beaucoup plus courte que celle du VCF ; ici, nous envisagerons exclusivement une implémentation numérique

La figure 4 illustre une forme typique d’enveloppe de contrôle d’amplitude. Les générateurs d’enveloppe sont chargés de produire une telle enveloppe, paramétrée traditionnellement par quatre paramètres : la durée d’attaque, la durée de décroissance (Decay), le niveau de tenu (Sustain) en dB (ici -6dB à titre d’exemple), et enfin la durée de retour à 0 du signal après relâchement de la touche du clavier (Release time). L’enveloppe ainsi générée vient contrôler le gain d’un VCA (si l’on souhaite contrôler l’amplitude du son) ou d’un VCF (si l’on souhaite contrôler la fréquence de coupure du filtre au cours du temps).

Les enveloppes qui vont piloter les différents modules contrôlés en tension (VCF, VCA, VCO) étant des signaux basse fréquence (en gros, quelques Hz maximum), il existe deux approches pour générer les enveloppes à partir d’une carte RPi3 :

- en utilisant un convertisseur numérique-analogique (via bus série SPI ou bus I2C en général) ; nous proposons d’utiliser des CNA de la famille [Microchip 4822](#) connectable en mode SPI ;
- en utilisant les sorties PWM de la carte, et un simple filtre passe-bas.

4.6 LFO et matrice de modulation

Les LFO (low frequency oscillators, quelques Hz à quelques dixièmes de Hz) sont indispensables pour donner "vie" au signal. Ils consistent à moduler les différentes ca-

ractéristiques des modules VCO, VCF et VCA avec des signaux de modulations variant lentement à l'échelle du signal (en général, les périodes des LFO tournent autour de quelques secondes). Il est notamment possible de réaliser :

- un tremolo en modulant un VCA
- un vibrato en modulant un VCO
- une wah-wah en modulant un VCF

La possibilité de construire une matrice de modulation complexe est une des clés permettant de générer des sons riches. En pratique, nous envisagerons une implémentation à base d'interrupteurs analogiques commandés en logique CMOS, permettant d'aiguiller chaque LFO vers tel ou tel module. Une matrice de modulation 3 vers 8 par exemple (3 LFO vers 8 tensions de commande) comporterait ainsi 24 interrupteurs.

4.7 Interface Homme-Machine, face avant

Une partie de ce sujet sera dédié au développement d'une interface homme-machine (IHM) efficace et ergonomique. Elle permettra de modifier les différents paramètres sonores (formes de enveloppes ADSR, taux de modulation des LFO et matrices de modulation, fréquences des filtres, effets audio, etc) à l'aide de :

- un écran tactile piloté par une carte RPi3
- des encodeurs à quadratures [Bourns](#), que l'on connectera aux entrées de détection en quadrature de la RPi3
- des bargraph à LED (ou une solution similaire mais ergonomique) se trouvant à côté de charge encodeur, destinés à montrer la valeur des paramètres ajustés

4.8 Interface MIDI & Arpeggiators

L'instrument sera pilotable en [MIDI](#). Il s'agit d'une norme numérique de communication entre instruments de musique, qui utilise le protocole série asynchrone (dit protocole "1-wire" : un seul fil transporte les données, et l'horloge est reconstruite à l'arrivée) au débit de 31250 bauds. La norme permet de transmettre numéro de note, durée et vélocité, ainsi que des paramètres non-musicaux via les messages MIDI CC (control change) et MIDI PC (program change). On utilisera les broches de l'interface série (Tx/Rx) de la RPi3, et un optocoupleur de type 6N138 pour implémenter cette interface MIDI.

C'est également la carte RPi3 qui sera chargée d'implémenter un [arpégiateur](#). Les paramètres (nombre de notes, extension, tempo, etc.) en seront ajustable via l'interface graphique.

5 Module d'effet analogique (REY5)

Cette partie concerne plus particulièrement la réalisation du module d'effet de sortie (qui pourra, ceci dit, tout à fait être utilisé indépendamment, par exemple sous forme de rack d'effet pour guitare).

Le module sera composé de deux éléments clé :

- un élément de réverbération à ressorts du fabricant Accutronics (module également appelé "reverb tank", cf. [Figure 5](#)), pour lequel vous trouverez un tuto très pédagogique [ici](#)
- un circuit d'écho analogique de type BBD (Brigade Bucket Device, cf. [Figure 6](#)), par exemple le composant MN3007 dont vous trouverez une datasheet [ici](#)



FIGURE 5 – Le module de réverbération est basé sur un "reverb tank" à ressorts au son très caractéristique ("La Femme", "Marietta", etc)

Pour ces deux éléments vous devrez concevoir le circuit de pilotage (driver de courant pour le reverb tank, et générateur d'horloge pour la BBD, buffers de sortie, etc).

La ligne à retard aura plusieurs fonctions :

- introduire un predelay ajustable dans l'effet de réverbération
- être utilisé en tant que delay pur
- être utilisé comme chorus/flanger en combinaison avec un modulateur à LFO (cf partie précédente "LFO et matrice de modulation")

Par ailleurs, les différents paramètres du module devront être programmable et mémorisables via la carte Raspberry Pi 3. En l'occurrence :

- les fréquences de l'horloge de la BBD, qui fixeront directement la durée du retard
- la possibilité d'enclencher ou pas un feedback (rebouclage de la ligne à retard sur elle-même via un sommateur à AOp)
- la modulation de la fréquence d'horloge de la BBD pour créer un chorus/flanger
- les niveaux d'entrée et de sortie du reverb tank
- la possibilité de débrayer un des deux modules (reverb ou retard)

Pour l'interface graphique, on se référera à la partie "Interface Homme-Machine, face avant" plus haut dans le texte.

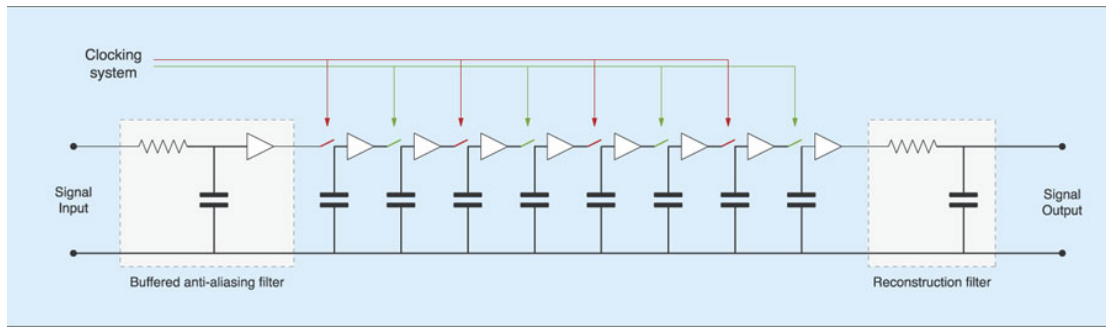


FIGURE 6 – Le module de retard est réalisé grâce à une ligne à retard analogique (BBD, Brigade Bucket Device).



FIGURE 7 – Le nouveau composant "Nutube" intègre deux triodes de préamplification dans un circuit intégré. Par rapport à des triodes/pentodes classiques, ce circuit permet des tensions de polarisation beaucoup plus faibles (autour de 30 à 80 Volts au lieu des 200 à 400V requis pour une triode classique).

6 Distorsion à tubes (partie du sujet REY6)

Cette partie concerne plus spécifiquement la conception d'un module "distorsion à tube", qui constitue une partie du sujet REY6 ("amplificateur guitare à tubes"). L'objectif de ce sujet REY6 est donc double, et s'insère en partie dans ce "gros" sujet REY1-5 :

- dans un premier temps, offrir un module d'effet capable de colorer le son de sortie de notre synthétiseur en lui ajoutant des harmoniques caractéristiques des amplificateurs à tubes (=triodes), avec un taux de distorsion ajustable ; ce module constituera **également** l'étage de préamplification de l'ampli guitare ;
- dans un second temps, et relativement indépendamment des sujets REY12345 (second semestre), concevoir un étage de puissance à pentodes (que l'on attaquera avec le préamplificateur précédent), utilisable indépendamment comme amplificateur guitare/basse.

Le premier semestre sera donc consacré à la conception d'un étage préamplificateur à tube (triodes), le second semestre à l'étage de puissance à pentodes, seul le module préamplificateur étant intégré dans notre synthétiseur hybride. Ici nous ne parlerons que du cahier des charges du module "préamp", l'étage de puissance faisant l'objet d'un cahier des charges distinct à préciser au *début du second semestre*.

Le cahier des charges préliminaire de l'étage préamplificateur est le suivant :

- la partie "triode" sera basée sur un nouveau composant fabriqué par Korg, le "Nutube" (cf. Figure 7), qui intègre deux triodes sur un chip de petite taille, et qui

- nouveauté appréciable — autorise des tensions de polarisations "raisonnables", autour de quelques dizaines de Volts (là où des triodes/pentodes classiques exigent plusieurs centaines de Volts) ; la datasheet est disponible [ici](#) ;
- tous les paramètres (gain, couleur, distorsion, etc) devront être programmables/mémorisables par la carte RPi3 ; l'implémentation pourra utiliser des potentiomètres numériques programmables de type [Microchip MCP4251](#) ou bien des modules VCA (voire plus haut, "amplificateurs VCA" des binômes REY123)
- le module pourra être débrayable via l'interface graphique de la RPi3

7 Gestion de projet et discipline à respecter pour bien travailler en équipe...

Pour la gestion du projet, je demande que nous utilisions :

- l'outil de planification de tâches en ligne [ZOHO](#) (le projet a déjà été créé)
- le partage de documents via Google Drive.

ZOHO étant limité à 10Mo de stockage en version gratuite, nous serons obligés d'utiliser tour à tour ces deux outils.

Je demande qu'à la fin de chaque séance chacun remplisse son "cahier de manip" en indiquant :

- les tâches que vous avez réalisées pendant la séance
- les nouveaux problèmes rencontrés ("issue tracking")
- les anciens problèmes résolus ("closed")
- le nom des nouveaux documents créés ou des anciens documents édités sur Google Drive (schémas, calculs de pré-détermination, etc)
- le temps consacré aux aspects pratiques (poursuite d'un câblage sur plaquette, simulation sous SPice, soudure ou wrapping, réalisation de PCB, etc)

8 Pistes pour se mettre dans le bain dès aujourd'hui...

Pour tous :

- créer un compte sous ZOHO (voir plus haute), et s'abonner au projet ENSEA.
- participer au dossier partager Google Drive dont je vous enverrai l'adresse par mail

REY123 Pour démarrer et se mettre immédiatement dans le bain, je propose quelques circuits simple à câbler cet après-midi :

- Câbler un oscillateur simple à base de [NE555](#) / écouter / critiquer !
- Réaliser une résistance variable commandée en tension en utilisant une photorésistance et une LED (approche utilisée dans les compresseurs analogique des années 70)
- Câbler un filtre actif à AOp (TL081 par ex), remplacer une des résistances par la photorésistance ci-dessus et tester le ... VCF ainsi produit :)

Avec ces trois "modules", vous pouvez déjà réaliser un petit module de synthèse sonore avec VCO, VCA et VCF :) Il n'est pas optimal du tout, il lui manque beaucoup de choses pour qu'il soit un bon candidat à la synthèse modulaire, mais précisément, c'est en critiquant ses limitations que vous pourrez progresser :)

Sur le plan **théorique** je vous demande de refaire les calculs du [tuto suivant](#) afin de bien comprendre comment utiliser un amplificateur à transconductance (OTA) pour construire un VCF ou un VCA. Ensuite nous passerons sous Spice pour les simulations.

REY4 Prise en main de la carte Raspberry Pi 3. En particulier, utilisation de la bibliothèque [Pi4J](#) pour piloter les broches d'entrée-sortie de la carte (broches dites "GPIO" et broches des bus série Tx/Rx, série synchrone SPI, broches PWM, etc).

REY5 Je vous propose de diviser l'équipe et les tâches en deux :

- En attendant de recevoir le composant, analyse de la datasheet des lignes à retard [MN3007](#), en particulier pour comprendre quelles contraintes s'exercent sur l'horloge.
- Prise en main de la carte Raspberry Pi 3. En particulier, installation puis utilisation de la bibliothèque [Pi4J](#) pour générer l'horloge

REY6 En attendant de recevoir le composant NuTube, chercher un modèle de tube (ou "triodes") pour Spice et réaliser des simulations pour comprendre comment fonctionne un tel composant.