

# L'effet « Wah-wah » électronique, sujet ludique pour « mini stage » transversal en électronique

Luc Lasne, Pierre Lamirand Septembre 2012

Université de Bordeaux 1, Centre de Ressources en EEA  
351, Cours de la Libération 33405 Talence cedex, France.

Contact e-mail : [lasne@creea.u-bordeaux1.fr](mailto:lasne@creea.u-bordeaux1.fr)

**Résumé :** Cet article est centré sur l'étude et la réalisation d'un dispositif électronique de type « pédale à effet Wah-wah » analogique commandée par un circuit programmable. Après une description succincte des schémas classiques, une réalisation compacte à amplificateur opérationnel est étudiée. Une réalisation sur deux voies, avec effet sonore piloté par un microcontrôleur, permet de conduire à peu de frais à un effet stéréo programmé pour signal audio en sortie de PC ou de baladeur. L'ensemble de l'étude est conçu comme une approche transversale de l'électronique moderne destinée à un « **mini stage d'électronique** » pour étudiants de niveau Licence 2 à 3 ; l'objectif global étant de présenter de façon synthétique diverses facettes de l'électronique signal à travers un seul projet, de découvrir des choses difficiles à appréhender dans la seule théorie. En fin d'article figure le témoignage de l'étudiant qui a inauguré le stage.

## 1. Généralités

L'effet « Wah-wah » est un effet musical consistant à donner au son d'un instrument le timbre d'une voix prononçant des « ouh » et des « ah » (d'où le nom) modulés par l'interprète. Si à la base l'effet est réalisable directement par l'obturation plus ou moins prononcée du diapason des cuivres (surtout la trompette), c'est certainement en version électronique, qu'il est le plus populaire. La « pédale Wah-wah » est ainsi une pédale d'effet bien connue dans le monde de la guitare électrique, notamment pour avoir fait « le son » des années 1970 à travers Jimmy Hendrix, Supertramp, ou plus récemment des artistes comme -M- et même certains musiciens de Jazz.



Figure 1 : Jimi Hendrix et sa pédale Wah-wah

Son principe repose sur une amplification (une « mise en valeur ») d'une partie du spectre produit par l'instrument (aigus, graves, ou mediums) dont on module la fréquence centrale par l'action du pied sur la pédale. Lorsque cet effet est produit en rythme, il permet de donner au morceau une

expression particulièrement vocale (le son « ouah » se superpose aux notes jouées) ou encore de souligner de façon inimitable et énergique l'attaque sur les cordes.

Sur le plan spectral, tout repose sur une amplification sélective d'une partie du spectre. De façon simplifiée, chanter une note en prononçant le son « ouh » conduit à un résultat plutôt « sourd » (peu d'aigus). En chantant la même note tout en prononçant un « ah », le spectre révèle un contenu plus garni en hautes fréquences. Ainsi, amplifier la bande des aigus d'un son « ouh » revient à donner à la note une consonance de « ah ».

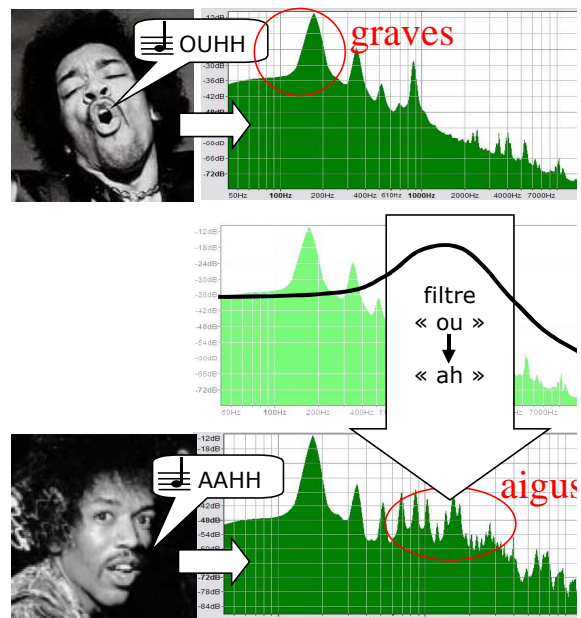


Figure 2 : Spectres de « ouh » et de « ah »

Une pédale Wah-wah pour guitare fonctionne sur ce même principe, c'est à dire sur le « glissement » commandé par l'utilisateur de la partie du spectre amplifiée par un filtre.

## 2. L'électronique de la Wah-wah

### 2.1. Circuits à transistors et filtre résonant

Les premières commercialisations de « pédales d'effets » pour guitares électriques datent de 1967 et sont dues à l'entreprise VOX® (spécialisée dans les amplificateurs). Cette date fut suivie d'une véritable explosion de l'utilisation et de la popularisation de cet effet dans la musique rock. Les premières versions, restées légendaires et toujours utilisées pour leur son « vintage » fonctionnent autour du circuit électronique à transistor relativement simple représenté sur la figure 3 :

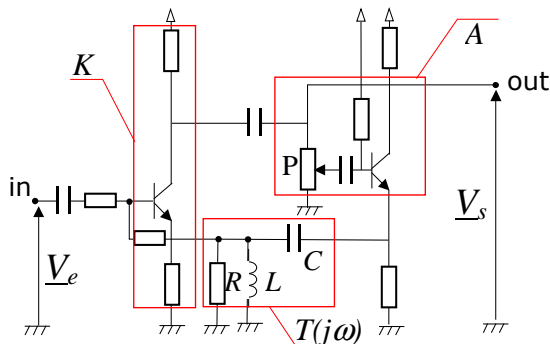


Figure 3 : Circuit Wah-wah à transistor

Ce circuit, en dehors de toutes les fonctions de polarisation et de découplage, se comporte comme un amplificateur en contre-réaction, à gain variable. La position de la pédale permettant, par un système de crémaillère, de régler la position du potentiomètre P et ainsi celle du gain A.

En notant K le gain constant de l'amplificateur inverseur d'entrée, et  $T(j\omega)$  la fonction de transfert du filtre résonant RLC disposé dans la contre réaction, il vient :  $V_s = K.(V_e - V_s.A.T(j\omega))$

$$\text{Ou encore : } \frac{V_s}{V_e} = \frac{K}{1 + A.K.T(j\omega)}$$

$$\text{Avec } T(j\omega) = \frac{LC(j\omega)^2}{1 + \frac{L}{R}(j\omega) + LC(j\omega)^2},$$

On obtient ainsi le « gain » du filtre :

$$\frac{V_s}{V_e} = G = \frac{K(1 + \frac{L}{R}(j\omega) + LC(j\omega)^2)}{1 + \frac{L}{R}(j\omega) + (1 + A.K).LC(j\omega)^2}$$

Dans cette fonction de transfert, la variation du facteur A permet d'obtenir le « glissement » de la fréquence centrale du filtre  $f_0$  correspondant à l'effet Wah-wah, conformément aux diagrammes de Bode représentés sur la figure 4.

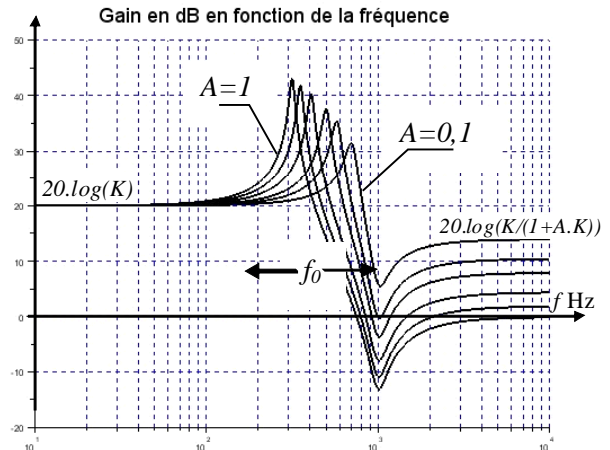


Figure 4 : Courbe de gain du circuit à transistor

Les composantes fréquentielles présentes dans la bande passante du filtre sont mises en valeur (amplifiées) alors que le reste des fréquences est inchangé (ou peu amplifié). Lorsque A est proche de 1 ce sont les fréquences basses qui sont prépondérantes dans le signal de sortie, alors que ce sont les aigus lorsque A tend vers des faibles valeurs.

### 2.2. Circuits à « AOP » et filtre résonant

Des circuits comparables à Amplificateurs opérationnels (« AOP ») sont apparus sur le marché dès les années 80, mais leur fonctionnement repose le plus souvent sur le même type de filtre de retour résonant, et tout particulièrement sur la présence de l'inductance volumineuse et coûteuse de la version à transistor. La plupart des modèles sont ainsi une « transcription à AOP » de l'amplificateur bouclé de base, comme le représente la figure 5 :

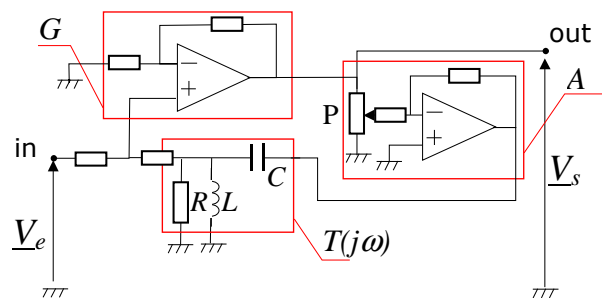


Figure 5 : Circuit Wah-wah à AOP

Le fonctionnement, quasiment identique, produit sensiblement les mêmes courbes de gain que celles représentées sur la figure 4.

### 2.3. Circuit à « AOP » et à contrôle optoélectronique de l'effet

Dès la fin des années 70, l'entreprise Morley® propose aux musiciens une large gamme de

pédales d'effet, dont une Wah-wah assez spécifique. Son filtre est architecturé autour d'un unique amplificateur opérationnel et le réglage de l'effet ne se fait plus directement par variation du potentiomètre (qui peut causer des grésillements et des coupures parasites) mais par l'éclairement d'une photorésistance (LDR). L'utilisateur contrôle avec la pédale la luminosité d'une LED qui illumine la photorésistance, ce qui revient à contrôler la fréquence centrale du filtre et à produire l'effet Wah-wah sans action directe sur le circuit du filtre.

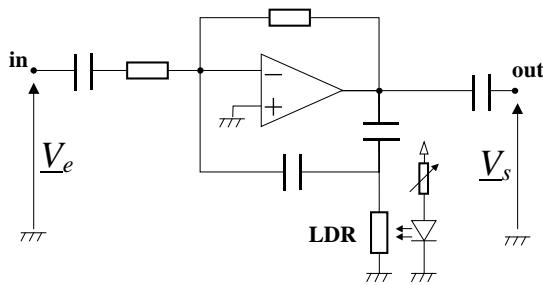


Figure 6: Circuit à AOP et à contrôle optique

Cette solution particulièrement élégante reste connue pour sa solidité à tout épreuve, due à l'absence de composants volumineux et de commandes électromécaniques à incidence directe sur le fonctionnement du filtre.

### 2.4. Circuit à filtres numériques

Les années 90 ont vu se développer des solutions de filtrage exclusivement numériques, notamment avec l'apparition des boîtiers multi-effets numériques. La plupart du temps, les fonctions de filtrage sont réalisées par des circuits de type DSP, et l'effet Wah-wah est souvent auto-ajusté par le volume ou « l'attaque » sur les cordes ... Ces solutions, non développées dans cet article, produisent toutefois un son réputé « peu chaleureux » qui fait regretter les pédales analogiques des premières heures, très prisées pour leur son « vintage ».

## 3. Etude d'un filtre Wah-wah à amplificateur opérationnel

### 3.1. Schéma électronique réduit

La figure 7 représente un schéma réduit, hors fonctions de polarisation et de découplage, d'un filtre électronique assurant une fonction passe bande à fréquence centrale réglable.

NB : Ce schéma est directement inspiré du filtre Wah-wah minimaliste des pédales Morley®.

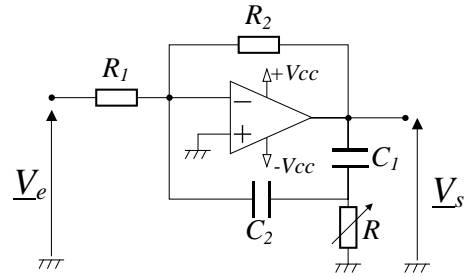


Figure 7 : Schéma électronique réduit

Dans ce circuit particulier, la structure des mailles de contre réaction rend difficile l'écriture directe de la relation entrée / sortie. Afin d'isoler cette relation de façon limpide, on formalise les diverses impédances du schéma et on précise, de par le fonctionnement linéaire de l'AOP, la présence du potentiel de masse sur l'entrée « - ». Il en résulte le schéma suivant :

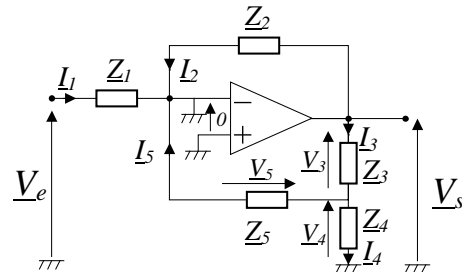


Figure 8 : Schéma formalisé

Les diverses impédances et tensions permettent d'écrire simplement les courants dans des diverses branches :

$$I_1 = \frac{V_e}{Z_1}, \quad I_2 = \frac{V_s}{Z_2}, \quad I_3 = \frac{V_3}{Z_3}, \quad I_4 = \frac{V_4}{Z_4}, \quad I_5 = \frac{V_5}{Z_5}$$

En faisant apparaître les admittances associées, on écrit plus simplement :

$$I_1 = V_e \cdot Y_1, \quad I_2 = V_s \cdot Y_2, \quad I_3 = V_3 \cdot Y_3, \quad \text{etc.}$$

Il ne reste plus qu'à formuler respectivement les différentes lois des nœuds et des mailles pour isoler la relation recherchée :

$$\begin{cases} V_e \cdot Y_1 + V_s \cdot Y_2 + V_5 \cdot Y_5 = 0 \\ V_3 \cdot Y_3 - V_4 \cdot Y_4 - V_5 \cdot Y_5 = 0 \\ V_3 + V_4 = V_5 \\ V_5 = V_4 \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} V_e \cdot Y_1 + V_s \cdot Y_2 + V_5 \cdot Y_5 = 0 \\ V_5 \cdot Y_5 = (V_s - V_5) \cdot Y_3 - V_5 \cdot Y_4 \end{cases}$$

soit donc :

$$\begin{cases} V_e \cdot Y_1 + V_s \cdot Y_2 + V_5 \cdot Y_5 = 0 \\ V_5 = V_s \cdot \frac{Y_3 \cdot Y_5 + Y_3 + Y_4}{Y_5 + Y_3 + Y_4} \end{cases}$$

ainsi :

$$\underline{V}_e \cdot \underline{Y}_1 + \underline{V}_s \cdot \underline{Y}_2 + \underline{V}_s \cdot \frac{\underline{Y}_3 \underline{Y}_5}{\underline{Y}_5 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4} = 0$$

ou encore :

$$\frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_e} = - \frac{\underline{Y}_1 (\underline{Y}_5 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_4)}{\underline{Y}_3 \underline{Y}_5 + \underline{Y}_2 \underline{Y}_5 + \underline{Y}_2 \underline{Y}_4 + \underline{Y}_2 \underline{Y}_3}$$

A ce niveau, il suffit de remplacer les admittances par les expressions correspondantes aux composants initiaux pour obtenir la fonction de transfert du circuit :

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{R_1}, \underline{Y}_2 = \frac{1}{R_2}, \underline{Y}_3 = j \cdot C_1 \cdot \omega, \underline{Y}_4 = \frac{1}{R}, \underline{Y}_5 = j \cdot C_2 \cdot \omega$$

$$\text{et : } \frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_e} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\frac{1}{R} + j \cdot (C_1 + C_2) \cdot \omega}{R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot (j \cdot \omega)^2 + j \cdot C_2 \cdot \omega + \frac{1}{R} + j \cdot C_1 \cdot \omega}$$

$$\frac{\underline{V}_s}{\underline{V}_e} = - \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + j \cdot R \cdot (C_1 + C_2) \cdot \omega}{1 + j \cdot R \cdot (C_1 + C_2) \cdot \omega + R \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot (j \cdot \omega)^2}$$

L'expression de cette fonction de transfert permet ainsi de tracer le diagramme de Bode associé sur la figure 9, en précisant les grandeurs remarquables, telles que :

- le gain statique :  $G_s = 20 \text{Log}(\frac{R_2}{R_1})$
- la fréquence de résonance :  $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}$
- le gain du filtre à la résonance :  
 $G_{\text{max}} \approx 20 \text{Log}(\frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{R \cdot (C_1 + C_2) \cdot \omega})$   
 $= 20 \text{Log}(\frac{R_2^{3/2} \cdot \sqrt{C_1 \cdot C_2}}{\sqrt{R \cdot R_1} \cdot (C_1 + C_2)})$
- la pente dans la coupure : -40 dB/décade

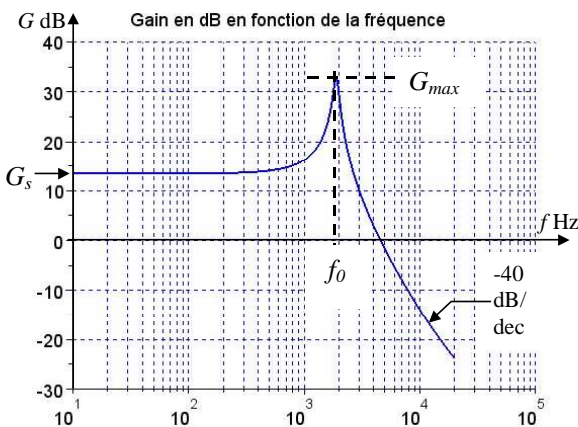


Figure 9 : Diagramme de Bode formel

Il apparaît nettement sur le diagramme le fait qu'un changement de valeur de la résistance  $R$  provoque une variation de la fréquence de coupure du filtre ( $f_0$  varie de façon inversement proportionnelle à

$\sqrt{R}$ ). Cela revient à une sorte de « glissement » de la bande de fréquence amplifiée par le filtre, paramétrée par les valeurs de  $R$ . Parallèlement, le gain maximal subit également une décroissance proportionnelle à  $\sqrt{R}$ , ce qui signifie que les « aigus » et les « graves » ne seront pas amplifiés de façon identique par le filtre.

### 3.2. Schéma électronique complet

Il est possible de déterminer les caractéristiques du circuit réel finalisé en s'appuyant sur le schéma précédent, les valeurs des résistances et capacités étant issues des expressions littérales et du cahier des charges. Une différence toutefois : pour permettre à l'alimentation d'être unipolaire (une pile 9V), le potentiel de la patte « + » de l'AOP est fixé à 4,5V par un pont diviseur de tension, et l'entrée comme la sortie sont découplées par des condensateurs de liaison.

Le schéma complet est ainsi le suivant :

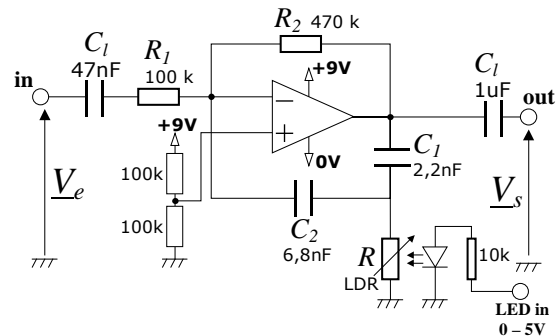


Figure 10 : Schéma électronique complet

La famille de diagrammes de Bode correspondante est représentée ci-dessous pour des valeurs de la résistance  $R$  s'échelonnant entre 100  $\Omega$  et 50 k $\Omega$ . Le « glissement » de la fréquence de résonance y est évident.

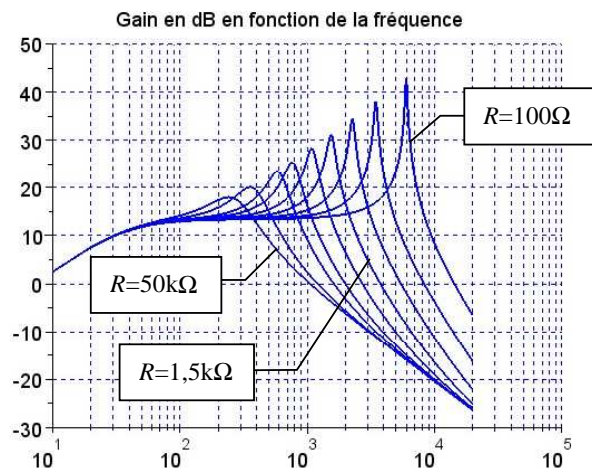


Figure 11 : Famille de courbes de gain

Sur ce schéma, la variation commandée de la résistance  $R$  est opérée par un moyen très simple : La résistance  $R$  est en fait une photorésistance LDR (Light Dependant Resistor). L'entrée « LED in 0-5V » est une entrée de tension analogique comprise entre 0 et 5V (standard TTL, USB, etc) et cette tension permet de fixer le courant qui traverse une LED illuminant la LDR. Ainsi, le réglage de tension de l'entrée « LED in » influe directement sur la valeur de  $R$  et donc sur la réponse en fréquence du filtre.

### 3. Filtre Wah-wah programmable commandé en PWM

L'idée globale du circuit consiste en fait à utiliser le filtre analogique en stéréo de manière à l'appliquer à un signal de type audio (une sortie de carte son, un lecteur MP3, etc). Outre la commande directe des deux voies, il semble intéressant de présenter à l'utilisateur des effets programmés, créateurs d'ambiances particulières (rebond gauche / droite de l'effet, accélération de l'effet Wah-wah, variation périodique, etc.). Pour ce faire, l'utilisation d'un microcontrôleur s'impose et à ce titre la carte de développement « Arduino® Uno » (ou Duemillanova, ou encore Nano) et son environnement « Open source » convient tout particulièrement aux étudiants de Licence.

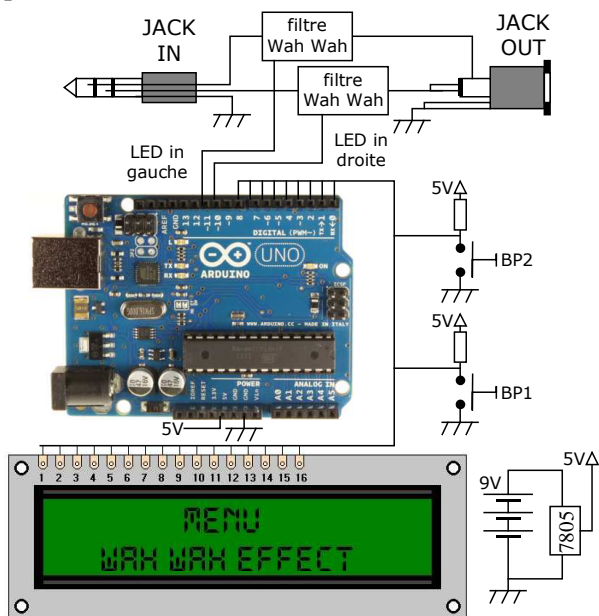


Figure 12 : Circuit complet commandé par microcontrôleur

Le schéma de la figure 12 représente ainsi l'ensemble du circuit, comprenant deux filtres analogiques identiques réalisés sur circuit imprimé, une carte Arduino® Uno associé à un afficheur

LCD, des boutons poussoirs pour le défilement du menu, et des sorties PWM pour la commande en luminosité des LEDs de contrôle de l'effet.

Après montage de l'ensemble, ce sont principalement les étudiants qui programment les effets, le menu sur l'afficheur et la détection des appuis sur les boutons d'action. Le test en grandeur nature sur la sortie audio du PC utilisé pour la programmation rend le projet ludique et la finalité évidente.

### 4. Contexte pédagogique du projet

Ce projet est en réalité un travail à présenter sous la forme d'un « mini-stage » au niveau L2 / L3 électronique ou physique.

Tout d'abord la présentation du projet est simple et attractive, l'effet Wah-wah est un effet musical, associé à la musique amplifiée voir électronique et il est possible de préparer quelques plages audio lors d'une présentation pour faire comprendre de façon synthétique l'objectif du stage.

Les étudiants associés au projet vont alors découvrir, dans un déroulement logique, les notions suivantes, chacune d'elles étant nécessaire au passage au stade suivant :

- Notions de filtrage en fréquence, amplification, atténuation, fréquence de coupure, etc.
- Notions de fonction de transfert, diagramme de Bode, de gain, de phase, etc.
- Notions de dimensionnement des composants, fonctionnement d'un AOP, polarisation et découplage.
- Développement sur platine de test, mesures de réponses en fréquence, confrontation de modèle et de circuit réel.
- Réalisation d'un circuit imprimé, développement du schéma, routage du typon, gravure et soudure des composants.
- Adaptation d'un signal audio stéréo, chaîne d'amplification.
- Programmation d'un microcontrôleur sur environnement Arduino, implantation des entrées sorties numériques, PWM, etc.
- Exportation du contrôleur discret sur carte ou platine de test, programmation du « boot loader », etc..

Tout ces aspects du travail, réalisés les uns après les autres en étroite collaboration avec l'enseignant, permettent aux étudiants d'appréhender l'électronique de façon à la fois transversale et simple. Le but ultime est de leur faire découvrir le fait que « se mettre à

l'électronique », de façon personnelle et volontaire, aujourd'hui est une chose agréable et largement facilitée par l'utilisation massive des microcontrôleurs et d'internet. Autrement dit, il n'a jamais été aussi agréable et « simple » de faire de l'électronique, ..., alors pourquoi s'en priver ?

## 5. Témoignage

*Pierre Lamirand, Etudiant en Licence 3 GSAT à Bordeaux 1, qui a inauguré ce stage en 2012, fournit ci dessous son témoignage sur les diverses facettes du travail et sur ce qu'il en a retiré :*

**Le stage :** « J'ai choisi d'orienter ce stage sur la pratique, pour mieux appréhender la théorie. Cela a plutôt bien fonctionné, il m'a permis de comprendre comment fonctionnaient certains outils mathématiques comme le diagramme de Bode et sa mise en forme rapide au travers d'un logiciel mathématique comme Scilab®. Ce projet était un moyen ludique de revoir les circuits RLC et leurs fonctionnements, le fonctionnement des AOP mais aussi des rappels sur les codes de couleur des résistances... J'ai aussi appris que le système d'identification des condensateurs était... compliqué.

Ce projet était aussi l'opportunité de voir le déroulement, pas à pas, de la réalisation d'un circuit imprimé. Son étude, sa conception sur ordinateur (logiciel ISIS/ARES), l'impression d'un typon, l'insolation et la révélation du circuit, perçage, test des lignes, soudure des composants... Enfin avec l'idée de piloter la pédale à l'aide d'un microcontrôleur (arduino uno), j'ai aussi revu et complété mes connaissances en programmation en langage C. »

**Ce que j'ai aimé :** « Tout d'abord, le thème en lui-même. Etant musicien amateur, je trouvais que travailler le sujet de la pédale Wah-wah était attrayant. L'étude du circuit d'origine et sa modélisation sur une platine de test. Cette étape nous a permis de rendre le circuit original avec l'utilisation d'une LED associée à une photorésistance pour contrôler l'effet Wah-wah, et aussi de confirmer que notre circuit théorique fonctionnait dans la pratique. J'ai aimé la recherche des problèmes et surtout leur résolution.

Ensuite c'est un projet dans lequel j'ai pu être majoritairement autonome. De simples rappels, ou de nouvelles informations théoriques, confiées par mon maître de stage, m'ont permis de progresser d'une étape à l'autre.

De façon plus globale, c'est un stage très complet au cours duquel j'ai survolé différents aspects de l'électronique. Cela m'a donné l'envie et la motivation de continuer à pratiquer. D'autre part j'ai compris plus facilement certains des concepts théoriques étudiés par la suite en cours. »

**Mes difficultés...** « Principalement au début avec l'utilisation de l'oscilloscope et ses différentes fonctions (et bugs) mais avec un peu de pratique en autonomie, et de bons conseils soufflés par mon tuteur, je me suis vite adapté. Dès que nous avons abordé la partie essais sur la platine, nous avons été obligés de faire pas mal de bricolage pour pouvoir connecter les entrées et les sorties audio à la platine... Entortiller les câbles autour des prises jacks n'était pas très fun... d'où la nécessité de penser à soigner la connectique. »

**Si c'était à refaire ?** « Je pense que je ne changerais pas grand-chose. Peut-être passerais-je un peu plus de temps à trouver le moyen d'optimiser le circuit dans son encombrement spatial et dans sa connectique... mais dans l'ensemble pas de grosse différences. »

## 6. Liens sur la toile

- Une page web destinée à l'explication du fonctionnement (un peu farfelu) des pédales Wah-wah :

[http://geofex.com/Article\\_Folders/wahpedl/wahped.htm](http://geofex.com/Article_Folders/wahpedl/wahped.htm)

- Un site détaillant le circuit et la conception d'une pédale à filtre résonant et amplificateurs opérationnels :

<https://www.smallbearelec.com/Projects/ISeeWah/ISeeWah.html>

- Une page intéressante et assez complète sur la réalisation d'une Wah-wah de type Morley :

<http://members.shaw.ca/roma/wah.html>

D'autres types de pédale sont abordées également sur le site.

- Un diaporama de l'ENSEIRB portant sur les effets sonores aborde de façon très compacte l'effet Wah-wah :

<http://uuu.enseirb.fr/~dondon/audio/trspeffetAUDIO2.pdf>

- Une page contenant plusieurs schémas compacts à transistor ... mais sans explications :

<http://www.aronnelson.com/gallery/main.php/v/WAH-ARCHIVE /WAH-SCHEMATICS/>