

## **Fender Champ Low Power: Amplificateur à lampes**



**Etudiants :**

**Mae VEDEL**

**Nhi NGUYEN Truong Phuong**

**Vincent GUY**

**Corentin POTRON**

**Florent NAGAMA**

---

**Enseignant-responsable du projet :**

**Richard GRISEL**



Date de remise du rapport : **19/06/2017**

Référence du projet : **STPI/P6/2017 – 49**

Intitulé du projet : **Fender Champ Low Power: Amplificateur à lampes**

Type de projet : **(expérimental, montage, modélisation en électronique)**

Objectifs du projet : Les objectifs de ce projet sont de réaliser des mesures de tensions sur l'amplificateur à lampes FENDER afin de comparer les résultats avec une modélisation réalisée sur LTSPICE, de calculer de manière expérimental le taux de distorsion de l'amplificateur et d'étudier l'ajout d'un circuit de tonalité sur l'amplificateur (choix du circuit et montage).

Mots-clefs du projet : Amplificateur, Lampe, Tonalité, Expérimental

## TABLE DES MATIERES

I. Introduction.....	7
II. Méthodologie / Organisation du travail.....	8
III. Travail Réalisé.....	9
1. Présentation de l'amplificateur à lampes.....	9
1.1. Historique de la marque Fender et du Fender Champ.....	9
1.2. Principe des amplificateurs.....	10
1.3. Caractéristique d'une lampe d'amplification (triode, tétrode et pentode).....	10
1.4. Présentation de l'amplificateur à lampes Fender Champ Low Power.....	11
2. Comparaison entre le modèle réel et le modèle simulation LTSPICE de l'amplificateur Fender Champ.....	12
3. Distorsion et étude harmonique.....	13
3.1. Qu'est-ce que la distorsion ?.....	13
3.2. Étude de la distorsion de l'amplificateur.....	13
3.3. Comment régler la distorsion ?.....	15
3.4. Calcul de gain total.....	15
3.5. Distorsion en simulation.....	16
3.6. Distorsion après modification.....	17
4. Ajout d'un contrôle de tonalité.....	18
4.1. Travail préparatoire.....	18
4.2. Simulation LTSPICE.....	19
4.3. Montage sur l'amplificateur.....	22
4.4. Impressions après modification.....	23
IV. Conclusions et perspectives.....	25
V. Index des illustrations.....	26
VI. Bibliographie.....	27
VII. Annexes .....	28
1. Mesures de tensions et calculs de gain (Expérimental et Simulation LTSPICE).....	29
2. Mesures expérimentales de distorsion.....	30
3. Calculs expérimentaux de gain total à la sortie de l'amplificateur.....	31
4. Mesures théoriques de distorsion.....	31

## REMERCIEMENTS

Avant de débiter ce rapport, nous tenons à remercier :

- **Pascal Williams, Mickaël Jolly et Hélène Rade** de l'atelier pour leur aide lors des phases de montages de la baffle et des circuits de tonalités ainsi que pour leur aide logistique lors de la commande des composants électroniques.
  
- **Patrick Doré** : responsable du pôle maintenance et travaux d'avoir donner de son temps pour la réalisation d'une partie du support de l'amplificateur.
  
- **Richard Grisel** : notre enseignant responsable du projet pour son partage de connaissances et pour la bonne tenue de ce projet physique .

## **I. INTRODUCTION**

Dans le cadre de notre projet, nous avons décidé d'étudier et d'améliorer l'amplificateur à lampes Fender Champ réalisé l'année dernière lors d'un projet P6.

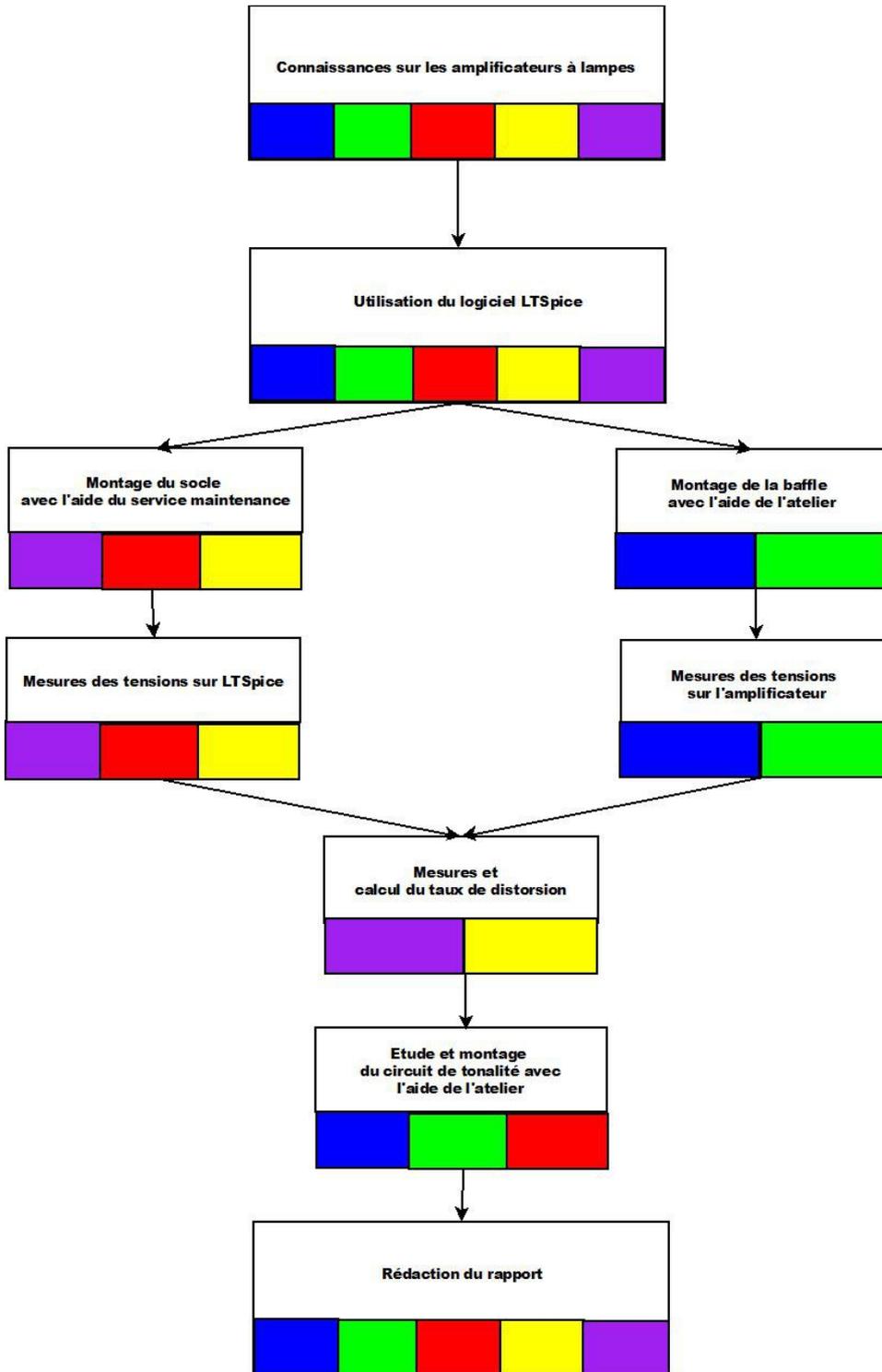
Un amplificateur à lampes est un composant électronique utilisé généralement comme un amplificateur de signal. L'objectif premier de cet amplificateur est de transmettre non seulement le timbre mais également la dynamique c'est-à-dire la façon dont l'amplitude du signal varie dans le temps. La particularité de l'amplificateur à lampes est donc de transmettre tout cela sans pour autant modifier les composantes citées précédemment. Cette transmission se fait donc depuis la source sonore, jusqu'à sa conversion en puissance acoustique par les baffles.

La première partie du projet est de préparer le matériel pour les différents essais (montage de la baffle et construction d'un support pour l'amplificateur).

La seconde partie consiste à réaliser des mesures de tensions et de gains sur l'amplificateur à lampes FENDER afin de comparer les résultats avec la modélisation réalisée sur le logiciel LTSPICE, puis de faire des mesures pour en déduire le taux de distorsion de l'amplificateur.

Dans un dernier temps, d'étudier l'ajout d'un circuit de tonalité sur l'amplificateur (choix du circuit, montage et essais).

## II. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL



Légende :

- Mae VEDEL
- Corentin POTRON
- Nhi NGUYEN Trung Phuong
- Florent NAGAMA
- Vincent GUY

### III. TRAVAIL RÉALISÉ

#### 1. Présentation de l'amplificateur à lampes

##### 1.1. *Historique de la marque Fender et du Fender Champ*

Dans les années 40, les guitaristes de blues ainsi que quelques instrumentistes intégrant les big-bands de jazz sont confrontés aux problématiques de rendu sonore de leur instrument. Ils ne sont pas entendus au milieu des cuivres et des pianos, et poussent au maximum le volume de leurs amplis de guitare.

Leo Fender construit alors à l'unité, dans un atelier, des amplificateurs dédiés à la guitare électrique à partir de pièces de postes de radios. A l'écoute de ses clients, il devient un électronicien réputé, son génie est reconnu aux états-unis, et il finit par créer une société de facture d'instruments et d'amplis, Fender, qui portera son nom.

Les premiers amplificateurs délivrent une puissance raisonnable de 10 watts, au format combo, ils sont recouverts de tweed comme les valises de l'époque, et présentent quelques problèmes de fiabilité. Leur principe repose sur l'amplification d'un signal électrique émis par des capteurs magnétiques depuis une guitare. Disposant d'un haut-parleur et d'une égalisation, ils sont coûteux à produire.

Ces amplificateurs sont alors mutualisés, partagés entre plusieurs musiciens, et disposent donc de plusieurs entrées, d'une égalisation commune (un bouton tone) et d'un volume général. Un haut-parleur de radio émet un son nasillard qui sera considérablement amélioré par la suite.

Les guitaristes reviennent régulièrement à l'atelier Fender pour réparer leur ampli, remplacer les lampes. Un de ses clients renommé, Dick Dale, jouit d'une grande popularité, et lui demande de concevoir un système plus robuste destiné à la guitare électrique. Le succès de ce guitariste est tel qu'il se produit dans des salles de plus en plus grandes pour y accueillir un maximum de public. Le son de sa guitare doit être entendu par tous, son "surf style" est apprécié, et il finit par pousser son amplificateur au-delà de ses limites, surchargeant le son d'un grain caractéristique, l'overdrive.



*Illustration 1: Amplificateur  
Fender Champ 5E1 de 1957*

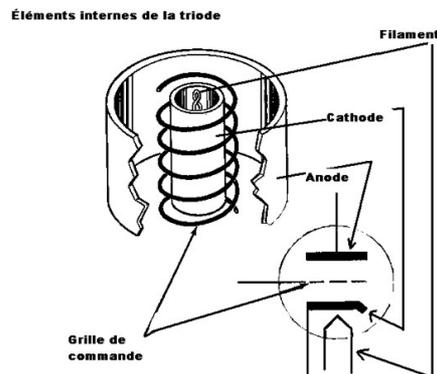
C'est en 1957 que Fender sort le modèle Fender Champ 5E1 (équivalent de notre amplificateur) utilisant une double triode 12AX7 dans l'amplificateur pour fournir 2 étages d'amplification de tension et un seul tube de puissance 6V6GT (pentode) pour produire environ 5 watts

## 1.2. Principe des amplificateurs

Un amplificateur électronique permet d'augmenter la tension et l'intensité d'un signal électrique. Pour amplifier le signal, le système électronique utilise l'alimentation électrique du système pour obtenir l'énergie nécessaire à l'amplification. Un bon amplificateur ne déforme pas le signal d'entrée et permet ainsi d'obtenir un signal de sortie identique et amplifié qui permet à l'ensemble du système d'utiliser ce signal. Nous pouvons trouver des amplificateurs dans l'ensemble des circuits électroniques.

## 1.3. Caractéristique d'une lampe d'amplification (triode, tétrade et pentode)

La lampe triode est le premier dispositif amplificateur d'un signal électronique. L'ingénieur américain Lee De Forest est l'inventeur, en 1906, de cette lampe qu'il nomme Audion. C'est le physicien W. H. Eccles qui donne le nom de triode à cette lampe à trois électrodes.



*Illustration 2: Illustration d'une triode*

La triode se compose d'une cathode semi-conductrice à chaud, émettrice d'électrons, d'une anode réceptrice, d'une grille placée entre les deux et d'un filament chauffant.

La cathode est chauffée par un filament placé derrière. (Parfois le filament et la cathode ne forment qu'un seul élément). Le chauffage de la cathode confère suffisamment d'énergie aux électrons de la cathode pour leur permettre de se libérer et de rejoindre un « nuage électronique » dans le vide entourant la cathode. La cathode possède un potentiel (souvent le 0V) plus petit que celui de l'anode provoquant la migration des électrons vers l'anode, car les électrons (charge négative) sont attirés par les charges positives de l'anode.

En jouant sur le potentiel (tension) de la grille par rapport à la cathode, un nombre plus ou moins grand d'électrons émis par la cathode arriveront jusqu'à l'anode, créant un courant variable entre anode et cathode : l'amplification de puissance est réalisée car la grille ne consomme pas de courant, c'est en théorie un potentiel statique.

Une pentode est une évolution de la tétrode qui est une amélioration de la triode. La tétrode possède une électrode de plus que la triode et une grille écran placée entre l'anode et la grille de commande. Grâce à cet ajout, on peut utiliser la lampe à de plus hautes fréquences et elle permet un meilleur gain. Cependant, ces avantages conduisent également à une discontinuité dans les caractéristiques tension/courant. C'est pour cela qu'a été inventée la pentode qui possède une grille d'arrêt entre l'anode et la grille écran.

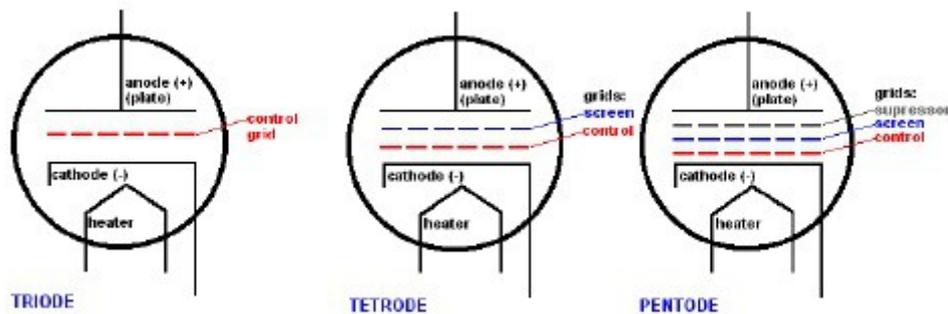


Illustration 3: Schéma de la triode, tétrode et pentode

#### 1.4. Présentation de l'amplificateur à lampes Fender Champ Low Power

L'amplificateur Fender Champ Low Power ou WF-55 est constitué de 2 étages d'amplification et d'un étage de sortie.

Voici ci-dessous la structure de l'amplificateur Fender :

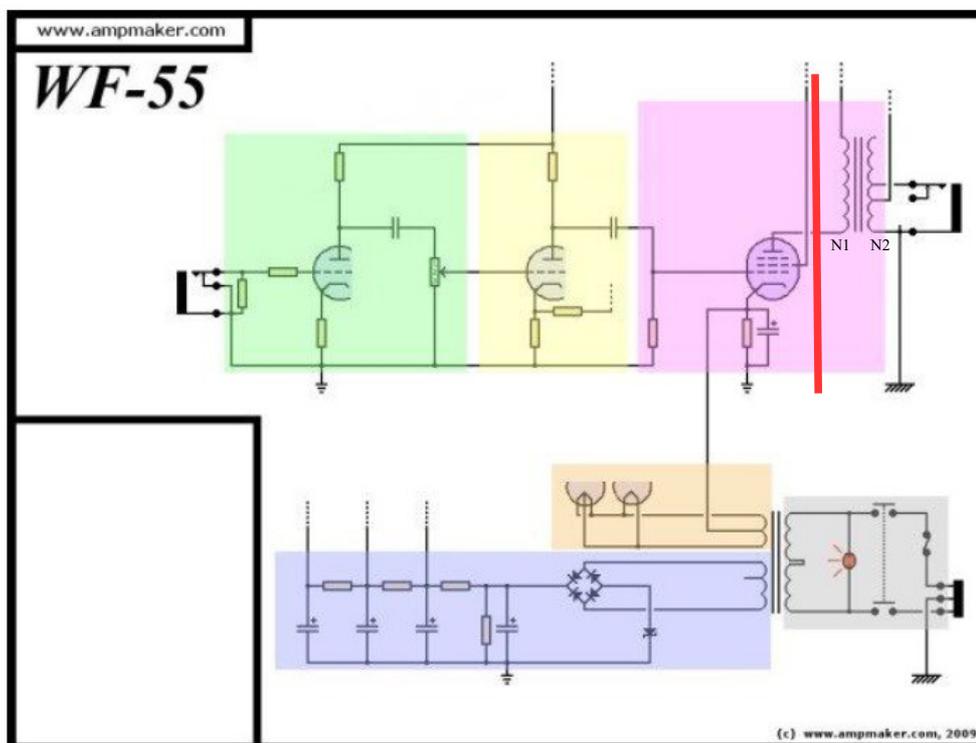


Illustration 4: Schéma de l'amplificateur à lampes Fender Champ (WF-55)

Pour amplifier un son, on utilise un ou plusieurs composants tels que les transistors ou les lampes. Dans le cas du Fender, on utilise 2 étages amplificateurs à lampe montés en cascade. On utilise plus spécifiquement une double triode ECC83, une triode se retrouve dans le premier étage pré-amplificateur (partie verte du schéma) tandis que le reste de l'ECC83 dans le second étage amplificateur (partie jaune).

L'étage suivant est l'étage de puissance qui comporte une pentode 6v6 (partie rose à gauche de la ligne rouge).

Le dernier étage est un transformateur (partie rose à droite de la ligne rouge) qui, grâce à des bobines, peut adapter la tension du signal au haut-parleur en sortie. En effet, sans cette adaptation, la tension du signal serait trop importante pour un haut-parleur avec une résistance de 4 ou 8 ohms. La formule qui donne les tensions en fonctions du nombre de spires des bobines est:  $V1/V2=N1/N2$ .

L'ensemble étage de puissance et transformateur forme l'étage de sortie, cet étage est le lieu de l'amplification de la puissance afin de pouvoir mouvoir la membrane du haut-parleur, on passe alors des quelques millivolts en entrée à plusieurs dizaines de Volts (on obtient ainsi des amplitudes de signal fortes) et on produit aussi de l'intensité. On cherche à obtenir une différence d'impédance peu importante entre l'impédance de sortie de l'amplificateur et celle d'entrée du haut-parleur. Dans le cas contraire, on perd de la puissance sous forme de chaleur (effet Joules). Dans un amplificateur à lampe la différence d'impédance est importante, il faut donc l'adapter afin d'optimiser les gains. Souvent, on abaisse la tension, pour abaisser l'impédance. De ce fait, l'intensité diminue du fait de la conservation d'énergie.

## 2. Comparaison entre le modèle réel et le modèle simulation LTSPICE de l'amplificateur Fender Champ

Dans cette partie, nous allons vérifier si le modèle LTSPICE de l'amplificateur Fender Champ est proche du modèle réel. Pour cela, nous allons mesurer les tensions en régime continu à différents points de l'amplificateur et les comparer avec les valeurs trouvées sur LTSPICE. Voici ci-dessous, les points de l'amplificateur où nous avons mesuré les tensions.

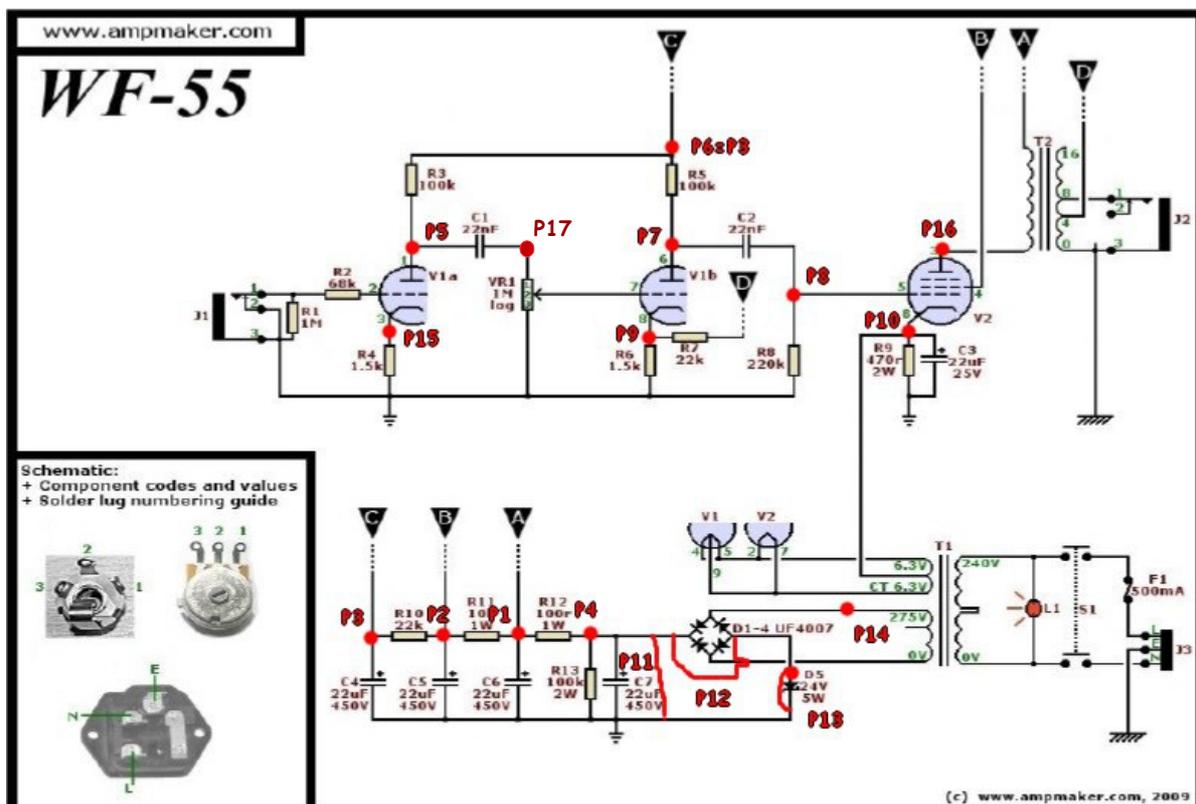


Illustration 5: Schéma de l'amplificateur avec les points de mesures de tension

On observe avec un courant continu que l'écart entre expérimental et simulation est assez faible pour la plupart des points l'écart est de moins de 10V. **Voir annexe 1 pour les résultats point par point.** Cet écart est assez faible et montre que le modèle LTSPICE est assez réaliste. Néanmoins, l'écart n'est pas dû à une erreur systématique corrigable car la différence entre tension expérimentale et tension simulation est négative ou positive.

Nous nous sommes aussi demandés s'il y avait une différence entre le gain d'un signal sinusoïdal de 20mVcc (cc : crête à crête) en entrée du modèle réel et la simulation LTSPICE. Pour cela, nous avons mesuré les tensions au niveau des points P4, P5, P7, P8, P16 et P17 afin de pouvoir calculer les gains de l'étage de pré-amplification ( $V_{P5}/V_{\text{entrée}}$ ), de l'étage d'amplification ( $V_{P7}/V_{P17}$ ) et de l'étage de puissance ( $V_{P16}/V_{P8}$ ). **Voir annexe 1 pour les résultats.**

On s'aperçoit que l'écart entre les gains expérimentaux et simulation est assez grand mais reste dans le même ordre de grandeur. Sur le gain total logarithmique on a un écart d'environ 2,4dB. La différence entre gain expérimental et gain simulation n'est pas de signe fixe, on peut donc éliminer aussi l'hypothèse d'une erreur systématique. Pour conclure, nous pouvons dire que le modèle de l'amplificateur Fender Champ sur LTSPICE est cohérent avec le modèle réel. Le modèle en statique est très proche du modèle réel mais il faut prendre un peu plus de précautions lorsqu'on simule avec un signal d'entrée alternatif car les différences avec le modèle réel sont plus marquées.

### 3. Distorsion et étude harmonique

#### 3.1. *Qu'est-ce que la distorsion ?*

L'amplificateur a pour objectif d'amplifier un signal d'entrée de faible puissance. Mais si la puissance en sortie est trop importante, alors le son ne peut plus être fidèlement restitué par l'ampli et il est distordu. C'est donc une déformation du son à travers l'ampli qui donne un effet aux notes jouées par la guitare. C'est un effet de saturation volontairement recherché par les musiciens car il donne une véritable identité musicale au son de la guitare.

La distorsion est une mesure de la quantité de puissance contenue dans les harmoniques d'un signal fondamental. La distorsion est inhérente aux dispositifs et aux systèmes qui possèdent des caractéristiques non linéaires, comme un amplificateur à lampes. Plus l'appareil est non linéaire, plus sa distorsion est importante.

#### 3.2. *Étude de la distorsion de l'amplificateur*

Notre but était de mesurer la distorsion de l'ampli en calculant le taux de distorsion harmonique total. Nous avons simulé le signal d'une guitare en entrée en envoyant un signal sinusoïdal dans l'ampli. Nous avons fait des mesures pour différentes tensions et fréquences d'entrée. Pour chaque signal d'entrée, nous mesurons à l'oscilloscope:

- La tension de sortie du signal
- Les fréquences des harmoniques du spectre du signal de sortie
- Le gain en dB de chaque harmonique par rapport au fondamental

Le gain ( $G_h$ ) des harmoniques nous permettait de retrouver la tension ( $V_h$ ) de chaque harmonique par la formule:

$$V_h = \sqrt{2} \times 10^{(G_h/20)}$$

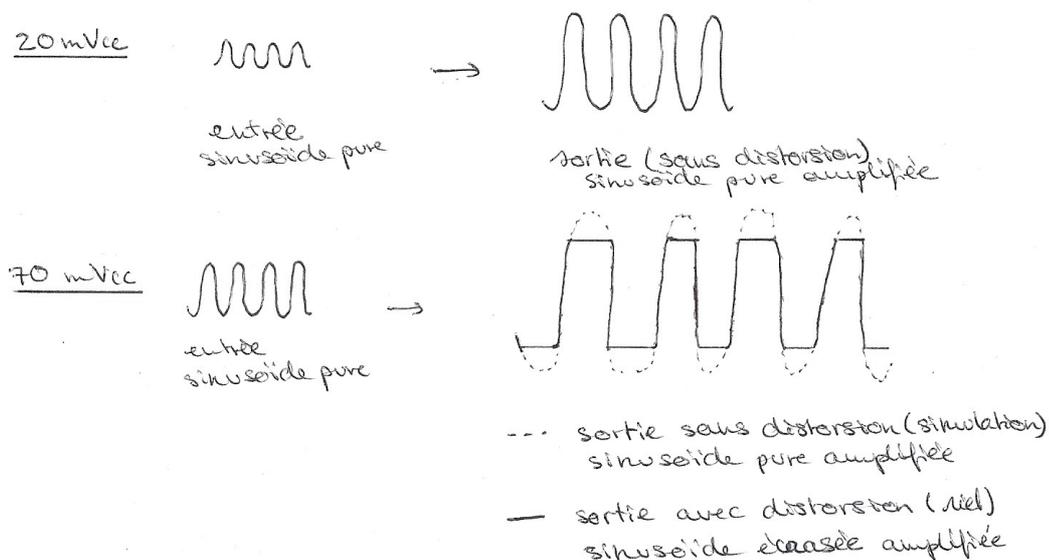
Nous pouvons ensuite calculer le taux de distorsion harmonique total: **Voir calculs en annexe 2**.

$$THD = \frac{100 \times \sqrt{\sum_{h=2}^H (V_h)^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^H (V_h)^2}}$$

Nous pouvons conclure de nos résultats que la distorsion pour une tension d'entrée de 20mVcc est très faible, entre 0 et 6% mais très proche de 0 pour les fréquences de la guitare entre 200Hz et 2000Hz. Ce qui signifie que le signal est très peu déformé et reste une sinusoïde presque pure en sortie.

Pour une tension d'entrée de 70mVcc, on a une distorsion beaucoup plus importante, de l'ordre de 15%. Le signal est très déformé. Les pourcentages de distorsion restent à peu près égaux en fonction des fréquences, ce qui prouve une homogénéité de la distorsion. En effet, si l'écart était trop important le son changerait radicalement d'une note à l'autre. On remarque un pourcentage un peu plus important à la fréquence de 500Hz mais c'est une fréquence très utilisée à la guitare. En effet, les fréquences de la guitare varient généralement entre 200Hz et 2000Hz. C'est l'intervalle que nous avons pris pour nos mesures.

On remarque aussi que l'on obtient des harmoniques de rangs impairs et pairs. Une harmonique de rang impair a une fréquence proportionnelle par un chiffre impair à la fréquence du fondamental qui, lui, a la même fréquence que le signal d'entrée. Une harmonique de rang pair a une fréquence proportionnelle par un chiffre pair à la fréquence du fondamental. Par exemple, pour une fréquence d'entrée de 100Hz, le fondamental est l'harmonique de fréquence 100Hz, l'harmonique de fréquence 200Hz est une harmonique paire (2\*100) et l'harmonique de fréquence 300Hz est une harmonique impaire (3\*100). Si l'on n'obtient que des harmoniques de rang impairs alors la forme de la tension du signal en fonction du temps est symétrique après déformation. C'est à dire que les tensions positives et négatives s'annulent. Mais des harmoniques de rangs pairs entraînent une dissymétrie qui peut générer des composantes continues. Les composantes continues sont généralement parasites mais peuvent être intéressantes.



**Illustration 6: Schéma représentant le signal amplifié avec et sans distorsion**

### 3.3. Comment régler la distorsion ?

On peut se demander comment régler la distorsion.

Il est possible de régler la distorsion en réglant le volume de la guitare. En effet, lorsque l'on règle le volume de la guitare, on règle la tension du signal d'entrée. Et on a montré que si l'on augmentait la tension d'entrée, la distorsion augmentait aussi.

On peut aussi régler la distorsion en modifiant le gain d'entrée de chaque étage pour rajouter de la saturation. C'est un réglage de résistance que nous n'avons pas sur notre ampli. Dans ce cas, il faudrait aussi régler le gain en sortie de l'ampli avec le bouton de volume de l'ampli car le volume est très vite trop fort à écouter.

Enfin, on peut régler la distorsion en modifiant la tonalité ce qui permet d'augmenter ou de diminuer les sons graves, mediums ou aigus.

Le réglage de la distorsion dépend de ce que veut le musicien car c'est une recherche de son que l'on veut plus ou moins saturé. Le musicien règle la distorsion en fonction de l'effet qu'il veut donner à son son. Certaines distorsions sont agréables à entendre et même des distorsions différentes peuvent amener à un effet sur le son intéressant.

Des amplis différents n'ont pas la même distorsion. En effet, le taux de distorsion harmonique total est différent pour chaque fréquence. On ne trouve pas forcément les mêmes harmoniques, et elle n'ont pas la même tension.

### 3.4. Calcul de gain total

Les résultats de notre étude nous ont aussi permis de calculer le gain total pour différentes tensions et fréquences d'entrée car nous avons, pour chaque, relevé la tension du signal de sortie. **Voir calculs en annexe 3.**

On remarque que, pour une même fréquence, le gain total avec 70mVcc en entrée est plus faible que le gain total avec 20mVcc en entrée. Par exemple, pour 1000Hz, il est de 2771 à 70mVcc et de 3060 à 20mVcc. Cela est dû à la distorsion qui est très faible à 20mVcc et très importante à 70mVcc. En effet, les calculs du gain se font avec des tensions en Vac et non en Vcc car on calcule la surface sous la courbe. Or, quand il n'y a pas de saturation on peut convertir facilement  $V_{cc} = V_{ac} \times 2\sqrt{2}$  et le facteur  $2\sqrt{2}$  se simplifie dans les calculs du gain. Mais cette formule n'est plus valide lorsqu'il y a de la saturation et on ne peut pas convertir avec un facteur qui se simplifie. Donc un gain calculé avec une valeur de tension en Vcc n'est pas représentatif lorsque le signal est déformé. Si les tensions étaient mesurées en Vac on devrait retrouver un gain plus proche entre 20mV et 70mV en entrée. Le gain à 70mVcc est plus faible car, sans distorsion, le signal de sortie serait une sinusoïde, mais avec de la distorsion c'est une sinusoïde écrasée et la crête est donc plus faible.

On ne peut pas comparer nos gains totaux aux résultats de calculs de gain précédents car ils donnaient le gain total après la pentode et nous avons ici un gain total à la sortie de l'amplificateur, sur les hauts parleurs, car nous avons branché l'oscilloscope aux hauts parleurs.

### 3.5. Distorsion en simulation

Nous avons aussi fait les mêmes mesures sur le logiciel de simulation LTSPICE. En effet, après avoir rentré les paramètres de notre ampli, le logiciel donne le signal de sortie théorique et fait la FFT (Fast Fourier Transform). Nous avons relevé les mêmes valeurs que dans l'expérience théorique. Nous avons pris une tension d'entrée de 70mVcc pour pouvoir comparer avec nos résultats expérimentaux. Nous n'avons pas jugé nécessaire de faire la simulation avec une tension d'entrée de 20mVcc car nous avons mesuré une faible distorsion expérimentalement. **Voir calculs en annexe 4.**

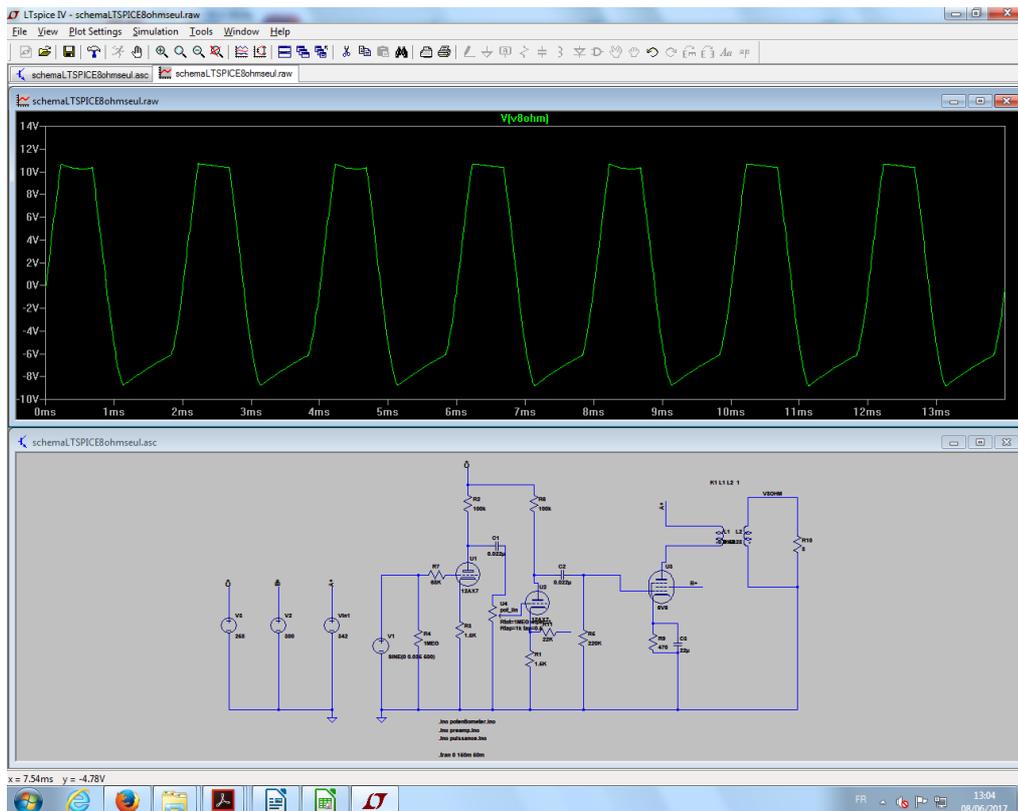


Illustration 7: Signal de sortie avec une entrée à 70mVcc et 500Hz

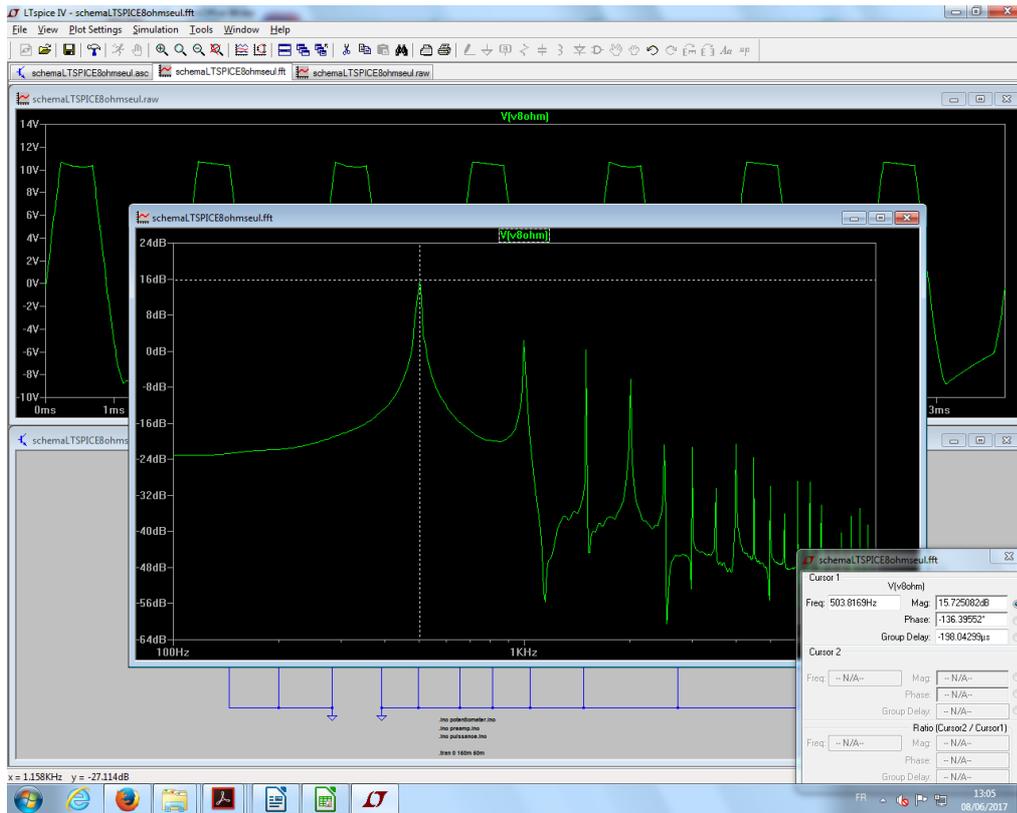


Illustration 8: FFT du signal de sortie pour une entrée de 70mVcc et 500Hz

Nous obtenons des taux de distorsion homogènes d'environ 23% ce qui semble cohérent par rapport aux résultats obtenus expérimentalement qui étaient d'environ 15%.

### 3.6. Distorsion après modification

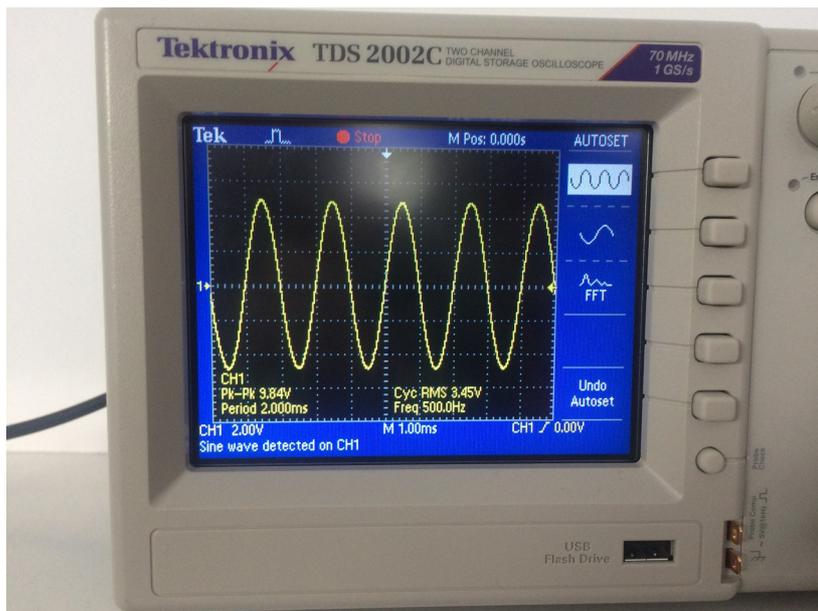


Illustration 9: Signal de sortie pour une entrée de 20mVcc et 500Hz

Après les modifications effectuées sur l'ampli (ajout du circuit de tonalité), nous avons regardé la forme du signal de sortie sur l'oscilloscope. On retrouve un signal saturé avec 70mVcc et sinusoïdal avec 20mVcc.

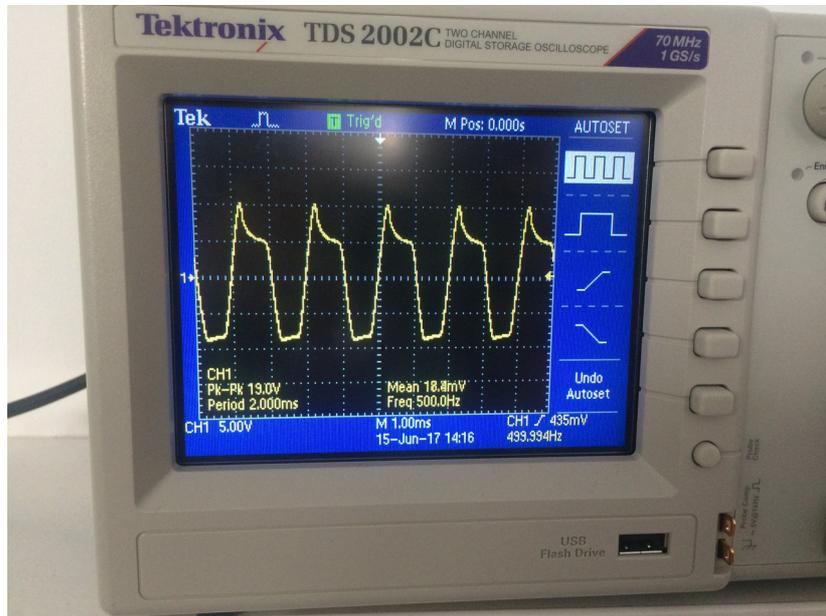


Illustration 10 : Signal de sortie pour une entrée de 70mVcc et 500Hz

## 4. Ajout d'un contrôle de tonalité

### 4.1. *Travail préparatoire*

L'amplificateur en lui-même étant déjà monté par le groupe P6 de l'an dernier, nous avons quand même souhaité réaliser un montage électrique supplémentaire pour apporter une valeur ajoutée au Fender : un contrôle de tonalité.

Après des recherches sur internet, nous avons constaté qu'il existait de nombreux modèles de contrôle de tonalité, allant des plus simples (un bouton) aux plus complexes (trois boutons permettant de régler les basses, médiums et aigus). Nous avons choisi d'installer le modèle avec un bouton car il ne nécessite pas beaucoup de modifications au niveau de l'amplificateur. Il présente de plus l'avantage d'être facilement encastrable dans la façade de l'ampli (un emplacement pour un autre potentiomètre est en effet déjà prévu).

Nous avons ainsi récupéré les schémas du circuit électronique afin de réaliser des tests préliminaires en simulation sur LTSPICE. En effet, ce serait dommage que le circuit atténue trop l'amplification et/ou que son effet soit trop faible pour être perceptible.

## 4.2. Simulation LTSPICE

### a. Étude du gain

Après étude du schéma de montage, nous avons constaté que plusieurs modifications sont apportés au Fender. Nous avons donc simulé l'ajout de ces modifications sur le modèle numérique de l'ampli dans le but de les comprendre :

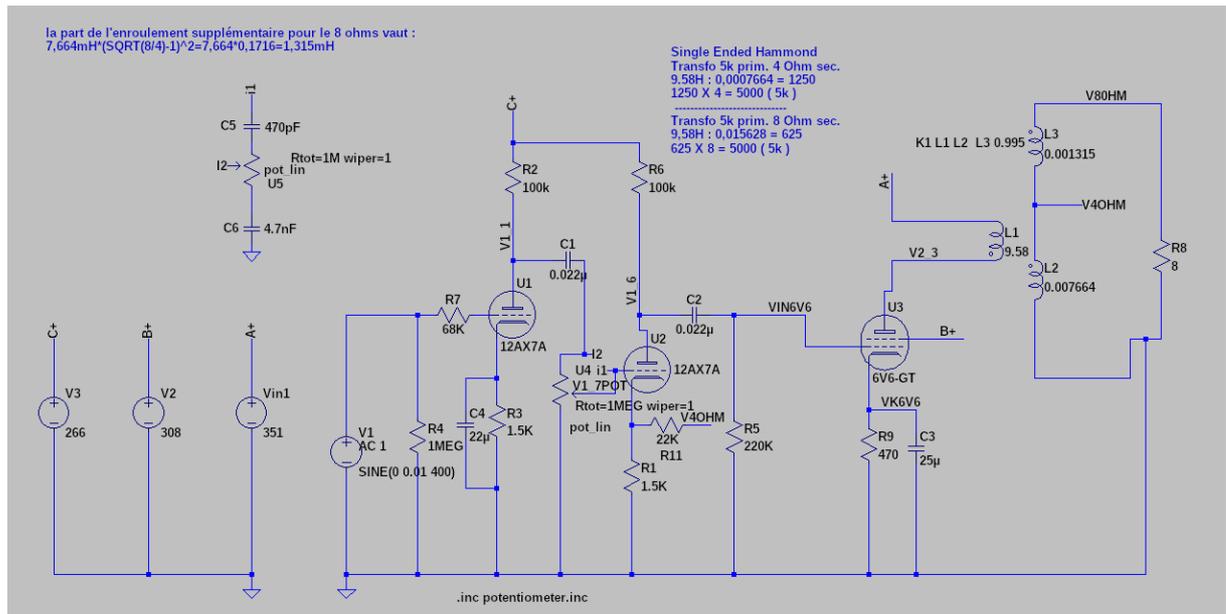


Illustration 11: Modèle numérique LTSPICE de l'amplificateur Fender Champ

Ci-dessous dans le tableau les mesures théoriques ainsi que le gain calculé associé par rapport à l'entrée :

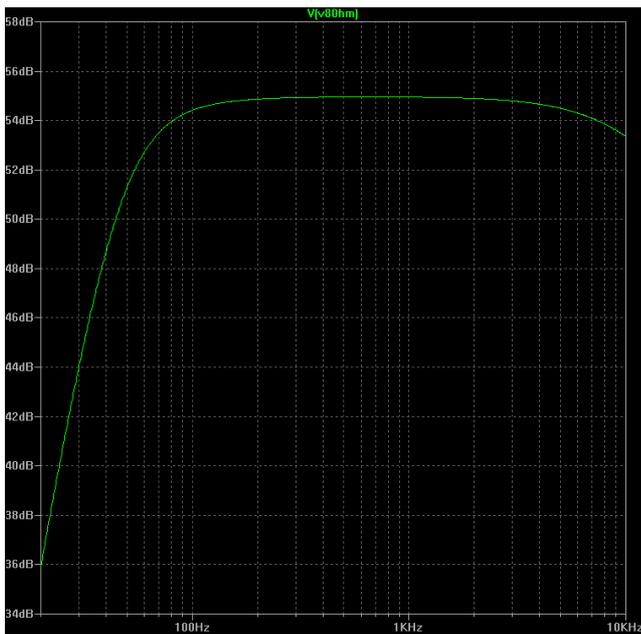
Point de mesure	Avant montage	Après montage sans condensateur	Après montage
Entrée	20mV (x1)	20mV (x1)	20mV (x1)
Après étage 1	600mV (x30)	400mV (x20)	900mV (x45)
Après étage 2	8V (x400)	6V (x300)	13V (x650)
Après étage 3	155V (x7750)	110V (x5500)	233V (x11650)
Sortie	4V (4ohm) (x200)	2,9V (4ohm) (x145)	6V (4ohm) (x300)
	6V (8ohm) (x300)	4V (8ohm) (x200)	8,7V (8ohm) (x435)

Nous constatons que l'ajout en parallèle d'un condensateur 22 $\mu$ F/24V au premier étage du Fender au niveau de la résistance R3 (1,5K) permet de compenser la perte d'amplification due à l'ajout du circuit de réglage de tons. En effet, un contrôle de tonalité a, par nature, toujours tendance à réduire le gain final et ceci s'expliquant simplement par l'ajout, en début d'amplification, par un certain nombre de composants passifs présentant une résistance plus ou moins élevée au courant. L'ajout d'un système de compensation est donc généralement un passage obligatoire pour ne pas perdre de gain.

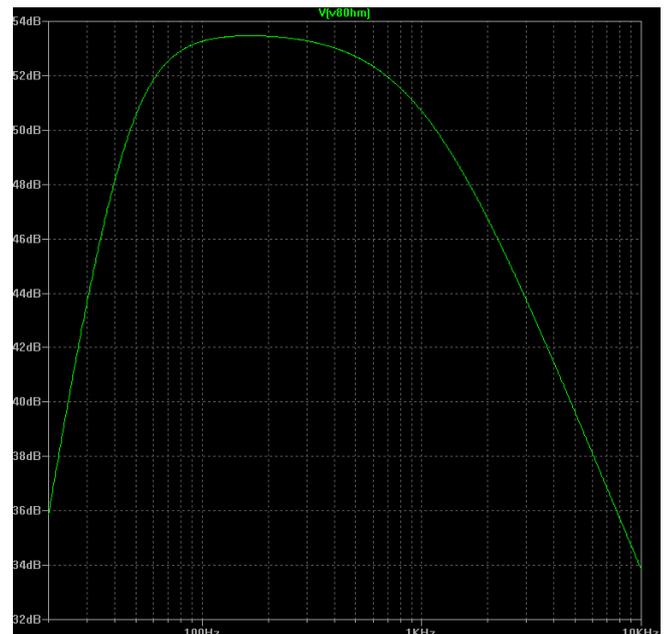
Fait intéressant : nous constatons que nous obtenons un gain supérieur en sortie par rapport au montage initial. Ceci entraînera sûrement une distorsion plus importante en sortie si le volume est poussé à fond. On peut remédier à ce problème en modifiant la résistance R8 (220K) par une résistance de 50K. Le gain en sortie de l'étage 2 est donc diminué et on se retrouve avec des valeurs proches de celles présentes initialement sans modification. Faute de temps, nous n'avons pas fait cette ultime modification sur l'ampli. Cependant, les résultats sur LTSPICE sont concluants.

### *b. Etude de l'effet*

Après avoir étudié le gain pour être sûrs de ne pas perdre trop d'amplification et validé cette partie, nous avons effectué à un test de réponse en fréquence de l'ampli en fonction de la valeur du potentiomètre de réglage de tonalité.



*Illustration 12: Réponse en sortie de l'ampli en fonction de la fréquence du signal (potentiomètre à 0)*



*Illustration 13: Réponse en sortie de l'ampli en fonction de la fréquence du signal (potentiomètre à 1)*

Les deux graphiques montrent la réponse en sortie de l'ampli en fonction de la fréquence du signal : on constate que plus la valeur de résistance du potentiomètre est élevée (photo de gauche à 0 et photo de droite à 1), plus la plage des aigus est coupée et il ne reste donc que les basses.

On peut ainsi par déduction en déduire que le circuit de contrôle de tonalité est en fin de compte un filtre dit passe-bas, c'est-à-dire qu'il coupe les hautes fréquences à un certain seuil tout en laissant passer les basses fréquences. De plus, plus la résistance est importante plus le filtre fait effet. Après plusieurs simulations en modifiant la valeur du potentiomètre, on obtient le graphique ci-dessous qui nous montre bien l'évolution de la coupure des aiguës :

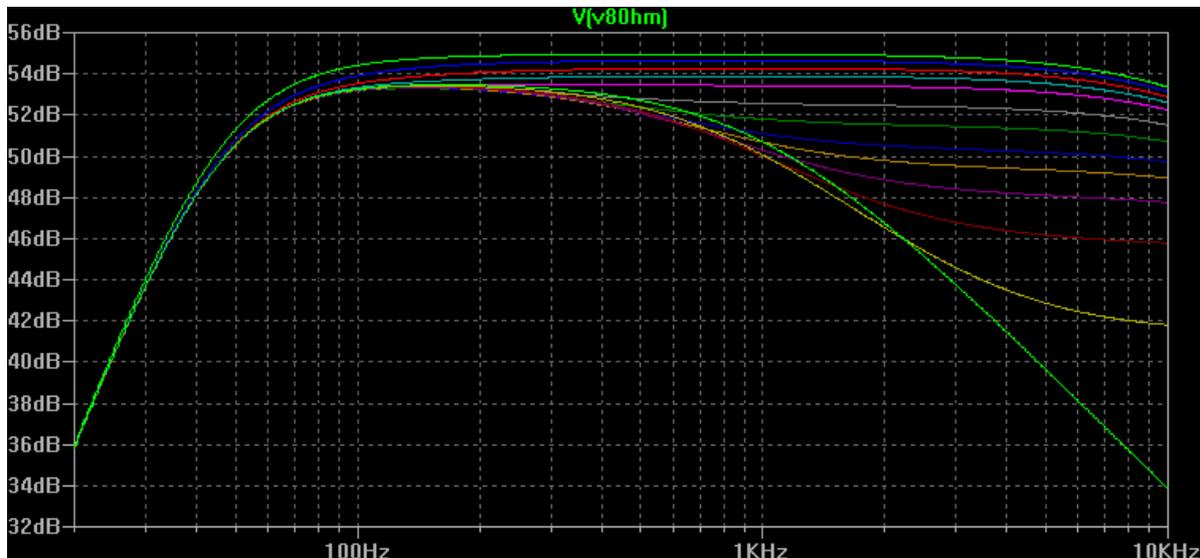


Illustration 14: Evolution de la sortie de l'amplificateur (dB) en fonction de la fréquence du signal (Hz)

Le potentiomètre à ajouter est un potentiomètre dit à échelle logarithmique : effectivement, l'effet est, par la conception du système, perçu linéairement par l'oreille lorsque la valeur du potentiomètre évolue de façon logarithmique. Si nous avons utilisé un potentiomètre linéaire, nous aurions eu du mal à régler le contrôleur de tonalité, la plage de modification n'étant pas étalée sur toute la rotation du bouton mais seulement sur sa fin. On peut voir ci-dessous l'échelle d'un potentiomètre logarithmique :

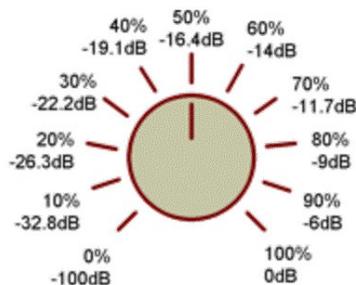


Illustration 15: Échelle du potentiomètre logarithmique

On a également la réponse fréquentielle témoin, c'est à dire celle qui est donnée par l'amplificateur sans ajout du contrôle de tonalité :

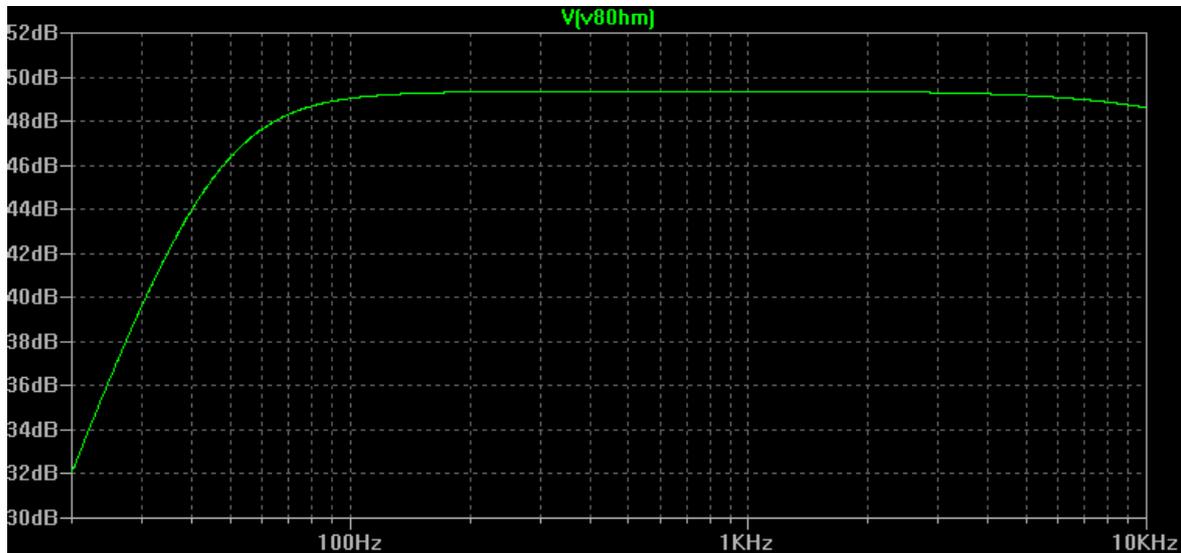


Illustration 16: Réponse fréquentielle témoin

On constate qu'il n'y a presque pas de différence lorsque le potentiomètre est mis à la position 0, si ce n'est que l'amplification est plus importante avec le circuit ajouté : pic à 55dB pour les fréquences médiums tandis que celui d'origine présente un pic à seulement 49,5dB, ceci s'expliquant par le condensateur rajouté expliqué plus haut.

L'allure de réponse étant quasiment la même on peut en conclure que le circuit n'apporte pas trop de distorsions au signal audio et que ce dernier reste fidèle au modèle d'amplificateur original.

### 4.3. Montage sur l'amplificateur

Il a d'abord fallu commander les composants nécessaires avant de les assembler et de monter le tout sur l'ampli. Nous nous sommes aidés du schéma électronique suivant :

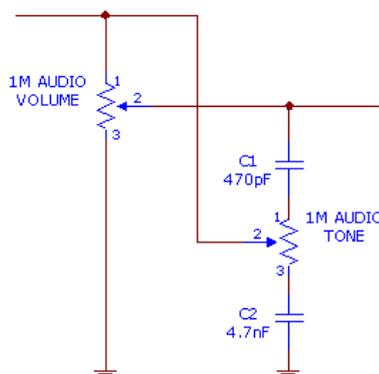


Illustration 17: Schéma du circuit de tonalité

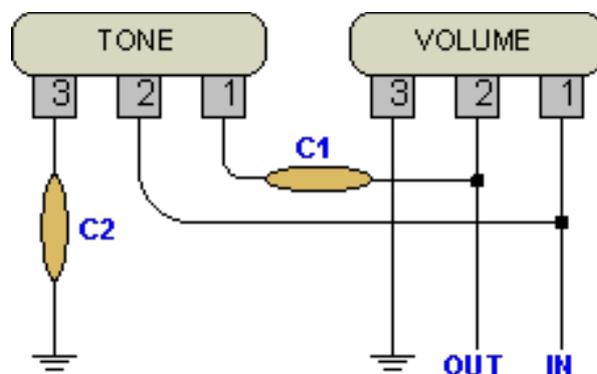
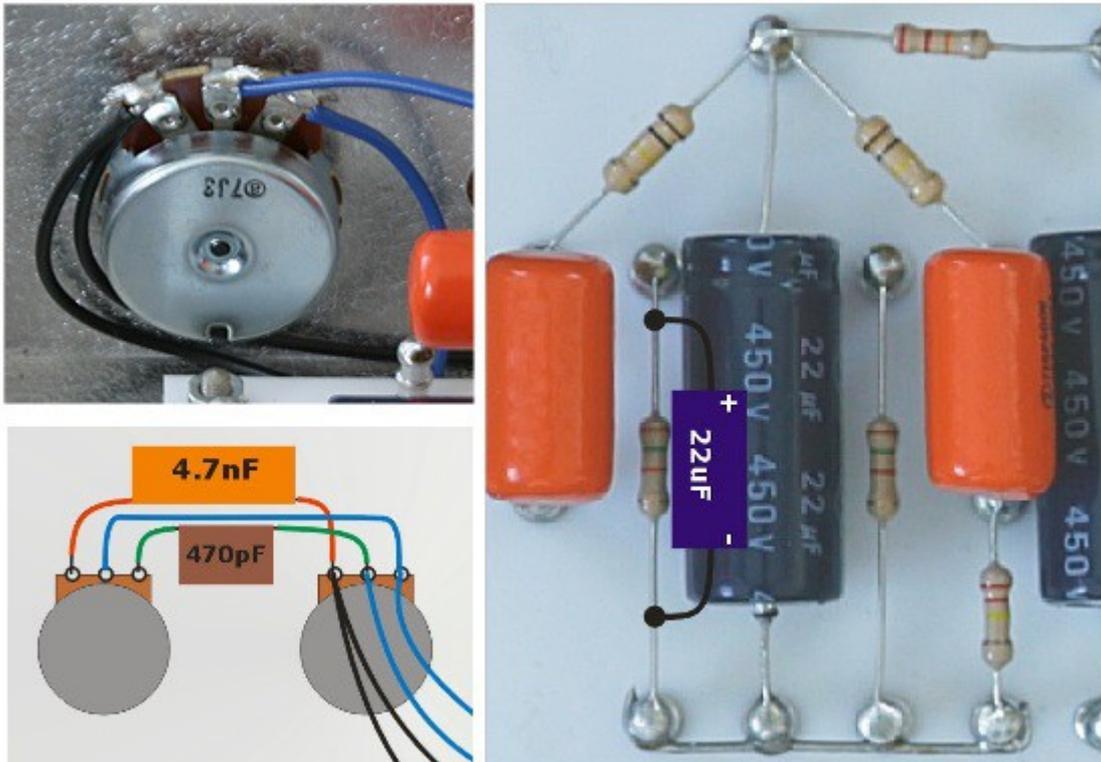


Illustration 18: Illustration du circuit de tonalité

Après réception des composants, nous avons soudé les éléments selon les schémas suivant :

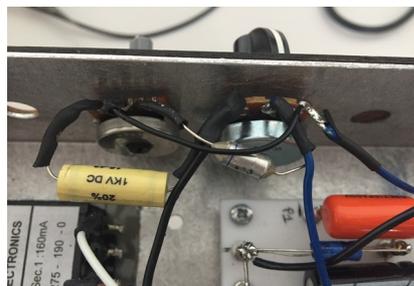


*Illustration 19: Illustration et photos du montage du circuit de tonalité sur l'amplificateur*

Il a fallu pour ce montage faire les opérations suivantes :

- Démontez la façade avant pour percer un nouveau trou afin de recevoir le potentiomètre
- Soudez les éléments entre eux selon le schéma de montage en faisant attention aux polarités
- Remontez le tout et réalisez des tests pour vérifier le bon fonctionnement de la modification

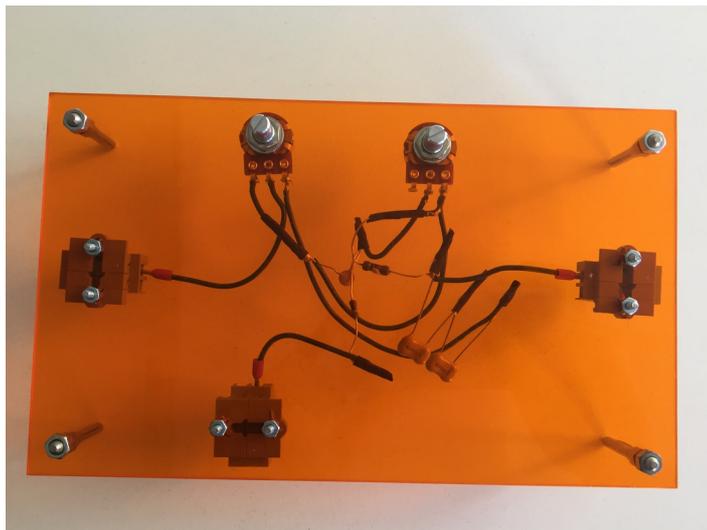
#### **4.4. Impressions après modification**



*Illustration 20: Bouton de réglage du circuit de tonalité*

Auditivement parlant, on remarque très bien la différence lorsque l'on fait varier le potentiomètre de réglage. On peut avoir soit que des basses ou que des aiguës ou encore égaliser pour obtenir le son initial. Les tests expérimentaux sont donc très concluants.

Nous envisagions au départ de tester un autre modèle plus évolué de modification de ton avec deux contrôleurs : un pour les basses et un pour les aiguës. Seulement, faute de temps et les résultats du premier étant déjà très concluants, nous n'avons pas terminé cette seconde modification. Vous pouvez tout de même voir sur la photo suivante le montage qui a déjà été soudé :



*Illustration 21: Deuxième circuit de tonalité*

## **IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES**

Dans ce projet nous avons tout d'abord validé le modèle de l'amplificateur sur la simulation LTSPICE à l'aide d'une comparaison de mesures de tensions et de gains, nous avons ensuite mené une étude complète de la distorsion de l'ampli en calculant le taux de distorsion harmonique total. Nous avons par la suite envisagé l'amélioration de l'amplificateur avec l'ajout d'un circuit de tonalité, nous avons donc trouvé un modèle sur internet, nous l'avons testé en simulation sur LTSPICE et nous l'avons par la suite monté sur l'ampli. Ce projet nous a permis de travailler en groupe sur un sujet que nous avons tous choisi par intérêt, l'initiation à l'électronique mais également la réalisation d'un projet dans son ensemble. Nous avons renforcé notre expérience dans le travail de groupe avec l'organisation des différentes tâches et de la rédaction du rapport. Nous avons découvert au fil des séances de nouvelles techniques tels que le logiciel LTSPICE, la soudure mais également le traitement de résultats à partir des données brutes mesurées par l'oscilloscope. Voici ci-dessous la conclusion personnelle de chacun des membres de ce projet.

**Mae** : « J'ai trouvé ce projet très intéressant. C'était passionnant de découvrir le fonctionnement d'un amplificateur à lampes et d'étudier ses fonctionnalités. C'est incroyable de voir le résultat lorsque l'on joue de la guitare. De plus, le projet était enrichissant, il m'a permis de mener un travail en groupe et de réaliser des mesures pour ensuite les analyser. »

**Nhi** : « Ce projet est une expérience inoubliable pour moi. Depuis très longtemps, je suis très intéressée par l'amplificateur à lampes. Grâce à ce projet, je peux mieux comprendre et bien découvrir ce type spécifique d'amplificateur. D'un autre côté, ça m'aide beaucoup à travailler en groupe avec des nouvelles personnes. »

**Florent** : « Ce projet m'a permis d'améliorer mon esprit d'équipe, ce qui est très important dans mon futur métier d'ingénieur où je serai forcément amené à travailler en groupe. De plus, ce projet m'a permis de découvrir le logiciel LTSPICE qui nous a été très utile pour la simulation du Fender. Enfin, j'ai pu mieux comprendre le fonctionnement de l'amplificateur à lampes ainsi que du circuit de tonalité. »

**Corentin** : « Ce projet m'a beaucoup apporté en terme de travail d'équipe : il m'a fait prendre conscience que la mise en commun et la séparation des tâches est essentielles pour mener un projet à bien. Il m'a également permis de concevoir une modification sur l'ampli par nos propres moyens en faisant des recherches puis des simulations puis des tests réels, ce qui s'approche de la démarche d'un ingénieur. »

**Vincent** : « En tant que redoublant, c'est mon deuxième projet physique et je dois dire que j'ai aussi appris énormément de choses. Ça a été super agréable de travailler dans ce groupe car il y avait une très bonne ambiance de travail (partage des tâches, etc). J'ai pu acquérir de nombreuses connaissances sur les amplificateurs à lampes et le logiciel LTSPICE et j'ai bien aimé l'instant « bricolage » lors de la construction du second circuit de tonalité. »

En ce qui concerne les perspectives de ce projet, tout d'abord il aurait été intéressant de pouvoir comparer les 2 circuits de tonalités pour pouvoir évaluer lequel est le meilleur. Il aurait été aussi intéressant de pouvoir améliorer un peu plus l'amplificateur en lui ajoutant de nouvelles fonctionnalités. Bref il y a assez de travail pour un prochain projet.

## **V. INDEX DES ILLUSTRATIONS**

Illustration 1: Amplificateur Fender Champ 5E1 de 1957.....	8
Illustration 2: Illustration d'une triode.....	9
Illustration 3: Schéma de la triode, tétrode et pentode.....	10
Illustration 4: Schéma de l'amplificateur à lampes Fender Champ (WF-55).....	10
Illustration 5: Schéma de l'amplificateur avec les points de mesures de tension.....	11
Illustration 6: Schéma représentant le signal amplifié avec et sans distorsion.....	13
Illustration 7: Signal de sortie avec une entrée à 70mVcc et 500Hz.....	15
Illustration 8: FFT du signal de sortie pour une entrée de 70mVcc et 500Hz.....	16
Illustration 9: Signal de sortie pour une entrée de 20mVcc et 500Hz.....	16
Illustration 10 : Signal de sortie pour une entrée de 70mVcc et 500Hz.....	17
Illustration 11: Modèle numérique LTSPICE de l'amplificateur Fender Champ.....	18
Illustration 12: Réponse en sortie de l'ampli en fonction de la fréquence du signal (potentiomètre à 0).....	19
Illustration 13: Réponse en sortie de l'ampli en fonction de la fréquence du signal (potentiomètre à 1).....	19
Illustration 14: Evolution de la sortie de l'amplificateur (dB) en fonction de la fréquence du signal (Hz).....	20
Illustration 15: Échelle du potentiomètre logarithmique.....	20
Illustration 16: Réponse fréquentielle témoin.....	21
Illustration 17: Schéma du circuit de tonalité.....	21
Illustration 18: Illustration du circuit de tonalité.....	21
Illustration 19: Illustration et photos du montage du circuit de tonalité sur l'amplificateur.....	22
Illustration 20: Bouton de réglage du circuit de tonalité.....	22
Illustration 21: Deuxième circuit de tonalité.....	23

## **VI. BIBLIOGRAPHIE**

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Triode\\_%28%C3%A9lectronique%29](https://fr.wikipedia.org/wiki/Triode_%28%C3%A9lectronique%29) (valide à la date du 13/05/2017)

<http://www.leblogquigratte.fr/2011/11/04/comment-fonctionne-un-ampli-a-lampe-explications-simples/> (valide à la date du 13/05/2017)

<http://renaud.battle.free.fr/index95.htm> (valide à la date du 10/06/2017)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Fender\\_Champ](https://en.wikipedia.org/wiki/Fender_Champ) (valide à la date du 10/06/2017)

<http://monster.partyhat.co/article/amplifier-tone-stacks/> (valide à la date du 09/05/2017)

<http://www.ampmaker.com/infocentre/thread-104.html> (valide à la date du 09/05/2017)

[https://www.sonelec-musique.com/electronique\\_bases\\_pots\\_gain.html](https://www.sonelec-musique.com/electronique_bases_pots_gain.html) (valide à la date du 10/05/2017)

## **VII. ANNEXES**

**1) Mesures de tensions et calculs de gain (Expérimental et Simulation LTSPICE)**

**2) Mesures expérimentales de distorsion**

**3) Calculs expérimentaux de gain total à la sortie de l'amplificateur**

**4) Mesures théoriques de distorsion**

---

## 1. Mesures de tensions et calculs de gain (Expérimental et Simulation LTSPICE)

Point	Tension en régime continu (V)		Écart (V) entre expérimental et simulation
	Expérimental	Simulation	
P1	353	342	11
P2	306,8	300	6,8
P3=P6	268	258	10
P4	358	//	//
P5	174	166,9	7,1
P7	170	166,9	3,1
P8	0	0	0
P9	1,34	1,37	-0,03
P10	18	18,44	-0,44
P11	359	//	//
P12	367	//	//
P13	13	//	//
P14	270	//	//
P15	1,36	1,37	-0,01
P16	337	340,9	-3,9
P17		3,67	

Point	Signal sinusoïdal (entrée 20mVcc et 100Hz)	
	Expérimental V <sub>cc</sub>	Simulation V <sub>cc</sub>
P5	0,576	0,595
P7	8,5	13,4
P8	8,5	12,7
P16	155	182
P17	0,576	0,56
Gains	Expérimental	Simulation
Gain 1	28,8	29,75
Gain 2	14,76	23,93
Gain 3	18,24	14,33
Gain total	7750	10202
Gain logarithmique (dB)	77,79	80,17

(CC différence des crêtes du signal de CC (crête à crête) à AC (courant alternatif) diviser par  $2\sqrt{2}$  car pas de distorsion) .

Aucune information sur l'alimentation, on a supposé une alimentation parfaite dans la simulation donc pas de valeurs pour P4,P11,P12,P13,P14 .

Calcul du gain normalement en AC mais ici le  $2\sqrt{2}$  se simplifie.

## 2. Mesures expérimentales de distorsion

Expérience distorsion					
Vin	Fréquence harmoniques (Hz)	Gain harmonique (dB)	Vmax=racine(2)*10^(dB/20)	Taux distorsion harmonique total (%)	
20mVcc	200	5,83	2,7670372	0,9088287635	
	1800	-35	0,0251486686		
	500	5,43	2,6425000113	0,7115019935	
	1000	-45,8	0,0072529552		
	1500	-42,6	0,01048371		
	2000	-40,2	0,0138202213		
	1000	6,65	3,0409900408		0,6355812224
	2000	-41,3	0,0121762904		
	4000	-42,5	0,0106051056		
	5000	-45,3	0,0076827199		
	7000	-45,7	0,0073369405		
	2000	7,45	3,3343792744	0,6110762079	
	4000	-38,2	0,0173986278		
	8000	-42,5	0,0106051056		
	70mVcc	200	15,4	8,3275068352	15,4511503697
400		-1,39	1,2050775555		
600		-9,39	0,4797500159		
800		-24,6	0,0832750684		
1000		-35	0,0251486686		
1200		-26	0,0708785783		
1400		-38,6	0,0166155606		
1600		-34,6	0,0263338888		
2000		-41,4	0,0120369096		
500		15	7,9527072877	19,7657821402	
1000		0,21	1,448821886		
1500		-6,59	0,6622393729		
2000		-20,2	0,1382022132		
2500		-31,4	0,0380640502		
3000		-23,4	0,0956125713		
3500		-31	0,0398579537		
4000		-33	0,031660298		
4500		-31,4	0,0380640502		
1000		16,6	9,5612571309		15,7581389387
2000		-0,59	1,3213412643		
3000		-5,79	0,7261310331		
4000		-17	0,1997629753		
5000		-27	0,0631705994		
6000		-24,6	0,0832750684		
7000		-29	0,0501781907		
8000		-31,8	0,0363508858		
2000		17,4	10,4837099717	14,9340958928	
4000		-0,99	1,261871111		
6000		-4,19	0,8730015159		
8000		-12,2	0,347148264		
10000	-19	0,1586773715			
12000	-27	0,0631705994			
14000	-28,6	0,052543016			
16000	-38,6	0,0166155606			

### 3. Calculs expérimentaux de gain total à la sortie de l'amplificateur

V_in	Fréquences d'entrée (Hz)	V_out (V c-c)	Gain=V_out/V_in
<u>20mVcc</u>	200	5,72	<b>2860</b>
	500	5,28	<b>2640</b>
	1000	6,12	<b>3060</b>
	2000	6,64	<b>3320</b>
<u>70mVcc</u>	200	16,8	<b>2400</b>
	500	15,4	<b>2200</b>
	1000	19,4	<b>2771,4285714286</b>
	2000	21,8	<b>3114,2857142857</b>

### 4. Mesures théoriques de distorsion

Simulation distorsion						
Vin	Fréquence d'entrée (Hz)	Fréquence harmoniques (Hz)	Gain harmoniques (dB)	Vmax=racine(2)*10^(dB/20)	Taux distorsion harmonique total (%)	
<u>70mVcc</u>	200	200	16,567252	9,5252766445	<b>22,7047769358</b>	
		400	2,8870196	1,9718141454		
		600	-4,7720036	0,8164222233		
		800	-8,528756	0,5297576024		
		1000	-13,177601	0,3101951105		
		1200	-19,847832	0,1439207448		
	500	500	15,725082	8,6450816188	<b>23,8530982222</b>	
		1000	1,8520861	1,7503274462		
		1500	-2,6155804	1,046492157		
		2000	-7,5685279	0,5916823343		
	1000	1000	14,342724	7,3731182273	<b>26,0275765772</b>	
		2000	1,1859855	1,6211166743		
3000		-1,7969333	1,1499218675			
2000	2000	16,544078	9,499897027	<b>23,337268306</b>		
	4000	2,2243047	1,8269650226			
	6000	-0,31406526	1,3639917227			