

**Projet de Physique P6  
STPI/P6/2023 - Groupe 41**

## **Projet amplificateur Audio à lampes**



**Étudiants :**

**Irina COSTRITA**

**Maylis FRANÇOIS**

**Mathis SAUNIER**

**Vincent TAILLADE**

---

**Enseignant responsable du projet :  
Richard GRISEL**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

Date de remise du rapport : **17/06/2023**

Référence du projet : **STPI/P6/2023 – 41**

Intitulé du projet : **Projet amplificateur Audio à lampes Saison 1**

Type de projet : **Electronique / Experimental / Modélisation**

Objectifs du projet :

***Le but de ce projet est de mettre en pratique les connaissances théoriques en électronique et en physique acoustique que nous avons acquises en cours, tout en développant nos compétences pratiques en conception et construction d'amplificateurs audio à tubes. Nous espérons également obtenir un amplificateur de haute qualité pour notre système de haut-parleurs, qui améliorera considérablement la qualité sonore de notre expérience d'écoute de musique.***

Mots-clefs du projet : **Électronique, amplificateur à lampes, simulation**

## TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Méthodologie / Organisation du travail.....</b>	<b>7</b>
<b>3. Travail réalisé et résultats.....</b>	<b>8</b>
3.1. Travail préparatoire.....	8
3.1.1. Présentation et généralités sur les amplificateurs à lampes.....	8
3.1.2. Inventaire des composants électroniques.....	9
3.1.3. Initiation à la soudure.....	9
3.2. Travail théorique.....	11
3.2.1. Compréhension du schéma et de LTSpice.....	11
3.2.2. Analyse transitoire.....	13
3.2.3. Analyse AC.....	16
3.2.4. Problème de composante continue.....	18
3.3. Tests.....	20
<b>4. Conclusion et perspectives du projet.....</b>	<b>22</b>
4.1. Conclusion générale.....	22
4.2. Conclusion sur l'apport personnel de cet E.C. projet.....	22
<b>5. Bibliographie.....</b>	<b>24</b>
<b>6. Annexes.....</b>	<b>25</b>

## **REMERCIEMENTS**

Nos remerciements s'adressent d'abord à notre enseignant-responsable, Monsieur Richard Grisel. En effet, il s'est montré disponible tout en s'assurant de notre bonne compréhension à chaque étape du projet. Il a fait preuve d'une grande écoute à notre égard et s'est montré très impliqué lorsque l'un d'entre nous rencontrait des difficultés.

Nous tenions à remercier également les techniciens Hélène Rade, Michael Jolly ainsi que Pascal Williams qui nous ont aidé pour l'assemblage de l'amplificateur. Leur disponibilité a également renforcé la dynamique du projet.

Nous remercions vivement l'INSA de Rouen Normandie pour nous avoir donné l'opportunité de travailler sur des projets originaux et qualitatifs.

Enfin, nous remercions nos camarades avec lesquels on a pu échanger et travailler dans les meilleures conditions possibles.

---

**Enseignant responsable du projet :  
Richard GRISEL**

## 1. INTRODUCTION

Dans le monde de la musique, le désir de reproduire les sons ou plutôt les mélodies a toujours été une source de motivation pour innover, créer et se moderniser. C'est alors que l'amplificateur révolutionne et passionne les audiophiles. Son rôle est d'amplifier le signal audio qui lui est fourni en entrée afin d'obtenir, en sortie, un volume sonore suffisant pour être audible.

En effet, un son provenant d'un instrument dit électrique suit le parcours suivant. Il est capté par des microphones puis transmis sous la forme d'un signal électrique via un câble jack jusqu'à l'amplificateur qui relié à un haut-parleur va nous fournir un nouveau son plus puissant. Cette "onde" électrique va passer aux travers de circuits électroniques qui contiennent des lampes, éléments essentiels à l'amplification.

Pour arriver à l'amplificateur audio à lampe, élément central d'une installation sonore, il y a eu la contribution, à travers les époques, de différents physiciens et esprits chercheurs. C'est le cas du très célèbre Thomas Alva Edison qui a mis au point la lampe à incandescence en 1847, qui devenait opaque très rapidement. Soucieux et persévérant, il corrige le problème en plaçant une feuille d'étain afin d'attirer le noircissement vers un point particulier. Il vient alors d'inventer la diode à Vide. Ensuite, c'est l'ingénieur et électricien anglais Ambrose Fleming qui décide de reprendre le principe pour inventer la diode à tube en 1903. Lee de Forest ajoutera quant à lui, une électrode supplémentaire et déposera le brevet pour la triode trois ans plus tard.

Malgré une technique des tubes qui se démocratise, l'arrivée des semi-conducteurs en 1950 détourne l'intérêt de certains musiciens pour les lampes.

Mais alors, pourquoi un amplificateur à lampes ? Précisément parce qu'il produit un son plus chaleureux et que selon les usages, à l'instar des concerts, le son produit est de meilleure qualité. Cependant, les prix d'acquisition d'un tel appareil n'est pas donné à tout le monde et cela reste un dispositif assez fragile.

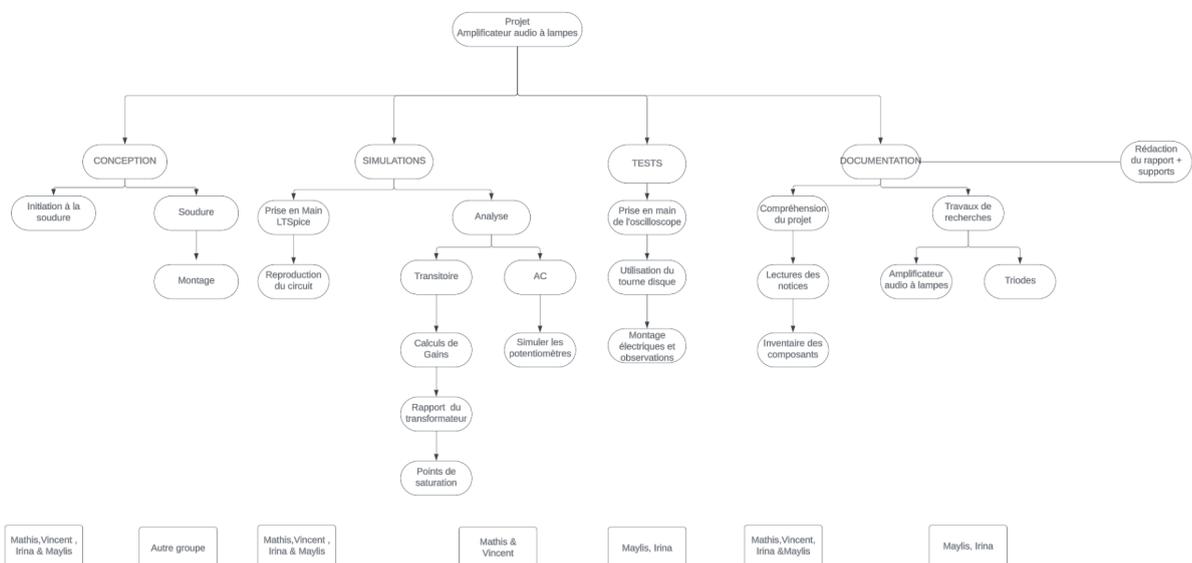
## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Tout d'abord, ce projet a pu être réalisé grâce à l'implication de deux groupes entre lesquels le travail à effectuer a été réparti. Avant de débiter le montage de l'amplificateur, nous devons effectuer un travail préparatoire afin de comprendre les notices, répertorier les composants et se familiariser avec le projet à réaliser.

Ensuite, chaque groupe s'est initié aux deux aspects du projet avant de se concentrer sur l'un d'entre eux: l'assemblage (plus expérimental) ou la simulation/tests (plus théorique).

Nous avons réparti avec l'autre groupe les tâches à mener à bien et la partie de la fabrication de l'amplificateur sur laquelle nous devons travailler. Notre équipe s'est concentrée sur les mesures des différents composants de l'amplificateur et de la simulation de celui-ci.

La partie théorique était elle aussi divisée en 2 sous-parties: la simulation avec le programme LTSpice puis des tests avec le tourne disque. L'importance de la partie de simulation consiste à prévoir les gains sur les différents étages de pré-amplification et amplification pour prévoir le fonctionnement de l'amplificateur et éviter de détériorer ses différents composants.



### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Travail préparatoire

##### 3.1.1. Présentation et généralités sur les amplificateurs à lampes

Évoquons dans un premier temps le fonctionnement général d'un amplificateur. Dans le cadre de ce projet, nous avons pu manipuler un amplificateur à lampe qui utilisent donc des "lampes" ou triodes pour amplifier un signal.

Au départ, les amplificateurs utilisaient une diode composée de deux électrodes : une cathode et une anode ayant pour but de "capturer" les électrons produits par le filament de la lampe afin de permettre à des courants plus importants de circuler.

Dans notre cas, il y a trois électrodes dans la lampe (d'où le nom triode). Ce système d'amplification est très utilisé aujourd'hui encore et cette révolution a vu le jour en 1906 grâce à Lee de Forest à qui on doit l'idée d'avoir rajouté une troisième électrode.

Cette électrode s'appelle la grille, elle est située entre l'anode et la cathode et a pour but de réguler le flux d'électron.

Dans les lampes, on retrouve alors ces trois éléments cités précédemment enfermés dans une enceinte en verre dans laquelle le vide est fait.

La cathode (filament qui est chauffé) est chargée négativement et elle constitue la source d'électrons tandis que l'anode (la plaque) est chargée positivement.

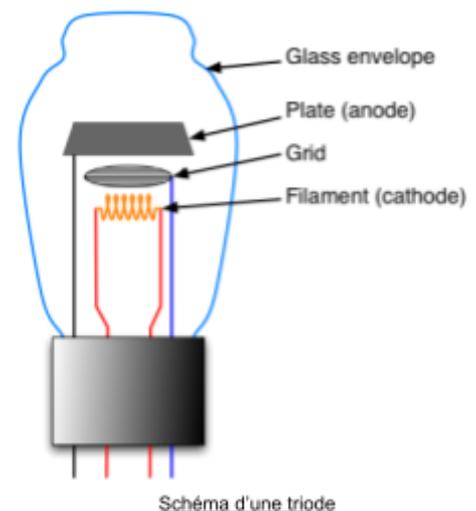
La température du filament, dû à la tension du signal émis, excite les électrons qui sont attirés et accélérés vers l'anode du à la différence de charge entre cette anode et la cathode.

Maintenant détaillons l'utilité de la grille placée au milieu. Elle est connectée à un instrument, comme une guitare, qui va modifier la tension de la grille.

Même si une grande différence de tension est appliquée entre l'anode et la cathode, le nombre d'électrons qui circulent entre les deux est réglé par la grille. En effet, si elle est chargée négativement elle repousse ces électrons vers la cathode, ce qui limite le flux d'électrons. Par contre si elle est chargée positivement elle "envoie" les électrons vers l'anode.

Ainsi, un petit changement de tension en entrée peut conduire à une grande tension à l'anode, ce qui est à la base du principe d'amplification. De plus, le signal fourni par la guitare est à la même fréquence que le flux d'électrons qui passe au travers de la grille ce qui produit donc une amplification.

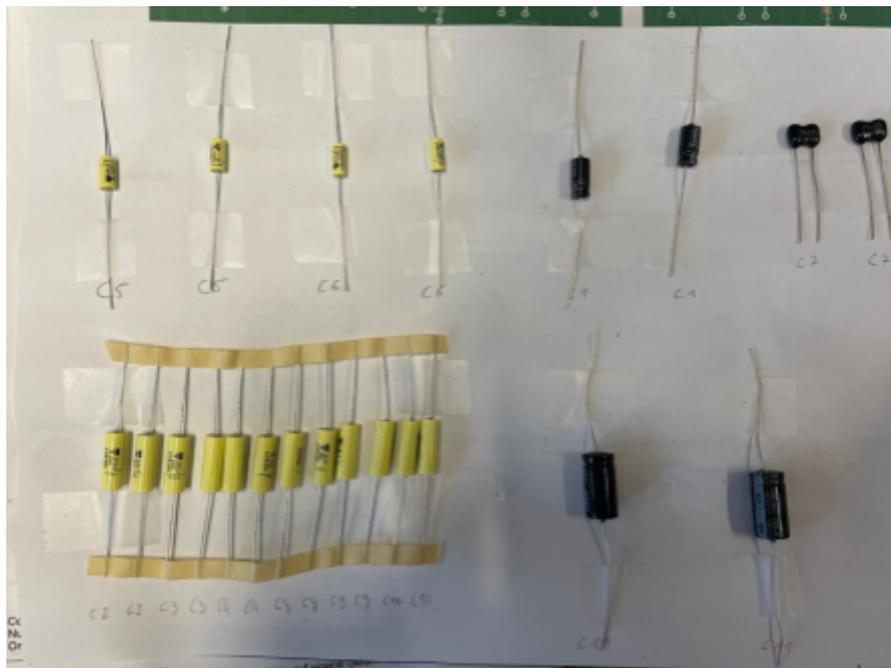
En somme, le son émis par la guitare, de très faible tension, modifie la charge de la grille qui va laisser passer un flux d'électrons plus ou moins important à une certaine



fréquence. Ce flux va ensuite traverser la grille, ce qui va donc créer de grande tension sur l'anode provoquant l'amplification.

### **3.1.2. Inventaire des composants électroniques**

Comme nous l'avons évoqué ci-dessus, le début du projet et sa bonne tenue sur la durée nécessitait un travail de fond et de classification des composants. Pour cela nous avons réalisé un inventaire pour vérifier que nous avions tout en notre possession et cela nous a aidé lors du montage car tout était facile d'accès.



Tri des composants

### **3.1.3. Initiation à la soudure**

Bien que nous nous soyons consacrés à la partie simulation et tests de ce projet, nous avons tout de même pu réaliser quelques éléments de montage et de conception de l'amplificateur.

La première étape du montage était la soudure des composants (résistances, condensateurs ...) sur les 2 cartes électroniques. En effet, l'amplificateur comporte deux voies (voie de droite et de gauche) et il a donc fallu réaliser ce travail de soudure sur ces deux dernières. Pour cela, nous avons appris à prendre en main le fer à souder. Ce sont les techniciens des laboratoires qui nous ont formés à son utilisation ainsi qu'aux méthodes et techniques pour réaliser une bonne soudure.

Cette étape est primordiale car une mauvaise soudure pourrait créer un faux contact ou fausser les mesures lors des tests finaux sur l'amplificateur. On parle alors de soudure sèche.

On nous a appris à doser la quantité d'étain nécessaire à chaque soudure ainsi qu'à placer les composants dans le bon sens. Mal positionnés, les condensateurs peuvent aussi inverser la polarisation et fausser nos mesures par la suite.

Lors de la première séance du projet, nous avons tous pu participer à cette étape de soudure, par binôme, mais par la suite nous nous sommes repartis le travail et notre groupe s'est consacré à la partie simulation tandis que l'autre groupe a pu continuer le montage des cartes.

### 3.2. Travail théorique

La deuxième partie de ce rapport présente toute la partie de simulation et de test de l'amplificateur. Dans un premier temps, nous détaillerons le schéma électronique de l'amplificateur puis nous verrons deux types d'analyses théoriques effectuées : l'analyse transitoire puis l'analyse "AC".

#### 3.2.1. Compréhension du schéma et de LTSpice

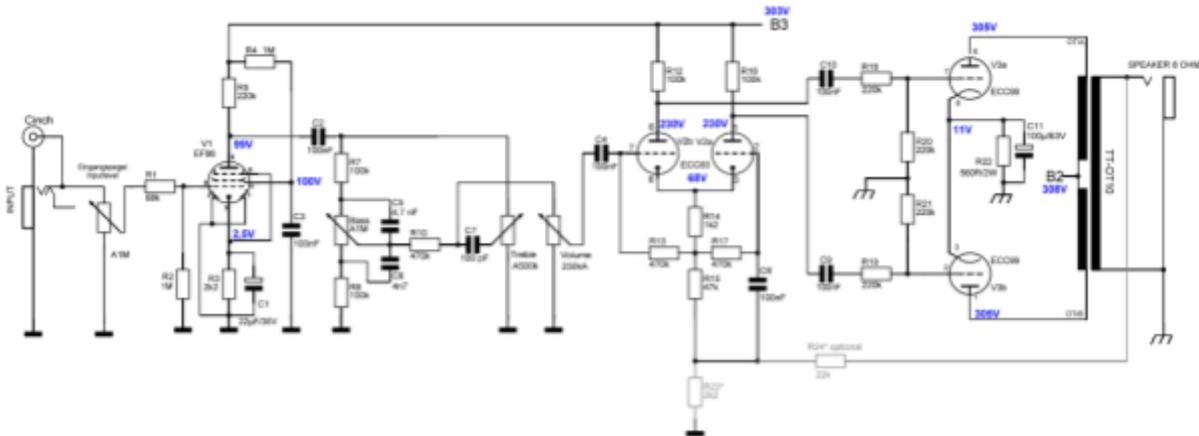
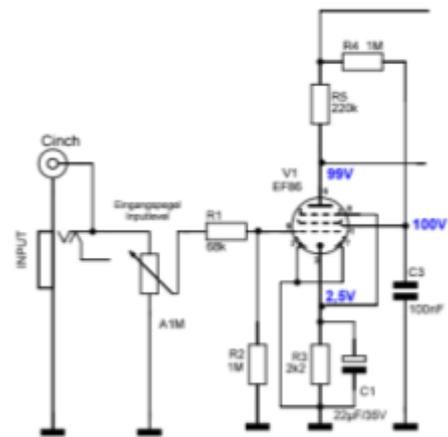


Schéma complet d'une voie

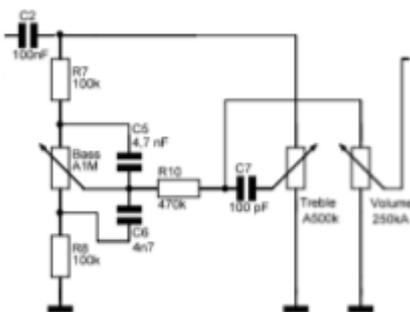
La première étape a été d'assimiler l'ensemble du schéma qui nous a été présenté. L'objectif n'était pas de comprendre l'effet de chaque composant mais plutôt de savoir reconnaître et identifier l'utilité des grandes parties qui composent notre amplificateur qui sont :

- l'étage de pré-amplification;
- le filtrage;
- l'étage différentiel;
- le transformateur.

L'étage de pré-amplification a pour objectif d'élever l'amplitude du signal d'entrée (qui provient des micros de l'instrument et ne dépasse pas la centaine de millivolts ( $mV$ )). Il est nécessaire d'élever la puissance du signal avant l'étape de filtrage qui va amener à une perte de puissance sonore.



Étage de pré-amplification



Zone de filtrage

Sans cette pré-amplification, le signal serait bien trop faible à son entrée de l'étage différentiel pour que ce dernier fournisse correctement une nouvelle amplification du signal.

Sur ce premier étage, nous avons également un potentiomètre de gain qui permet de régler le coefficient d'amplification selon nos besoins. Ce potentiomètre à un fonctionnement simple car il laisse passer une quantité plus ou moins forte de signal en fonction de son réglage.

Nous pouvons maintenant aborder le zone de filtrage qui est composée de nombreux potentiomètres qui permettent un réglage affiné du son :

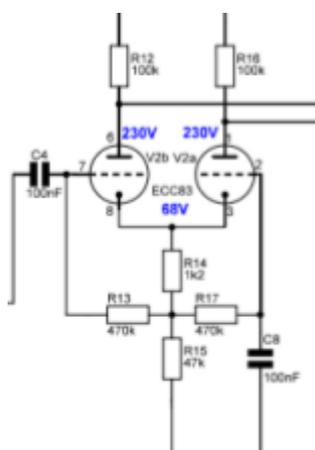
- Treble qui correspond à la quantité d'aigus atténués ou non ;
- Bass qui correspond à la quantité de basses atténuées ou non ;
- Volume qui permet de gérer le niveau sonore général (après la pré-amplification du signal).

Pour détailler un peu plus le fonctionnement de ces potentiomètres on peut commencer par dire que celui de volume fonctionne comme celui de gain ci dessus, c'est-à-dire qu'il laisse passer une quantité de signal proportionnel à son réglage.

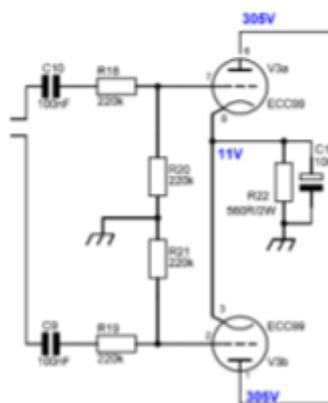
Les potentiomètres des aigus et des basses sont quant à eux liés à des résistances et des condensateurs afin de former des filtres passe-haut et passe-bas d'ordre 1. Nous observerons l'influence théorique de ces potentiomètres dans la suite de notre rapport.

Passons maintenant à l'étage différentiel qui va permettre une nouvelle amplification du signal grâce à deux circuits électroniques différents.

Le premier est un amplificateur différentiel qui utilise 2 triodes (ECC83) et le second est un montage dit "push pull".



Montage différentiel

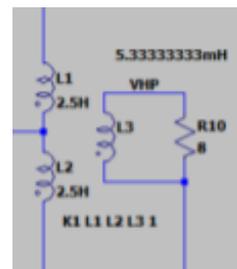


Montage push pull

Ces systèmes électroniques étant complexes et utilisant des éléments d'électroniques que nous ne connaissons pas, Monsieur Grisel nous a conseillé de ne pas nous attarder sur leur fonctionnement mais plus sur leur effet. Nous avons donc calculé les gains des différentes parties de notre amplificateur, que nous détaillons dans la suite du rapport.

Enfin, nous pouvons observer un transformateur à la fin de notre schéma papier. Ce transformateur sera simulé par un système de bobines.

À nouveau, Monsieur Grisel nous a fourni la solution à ce problème de modélisation et nous a demandé de ne pas nous attarder derrière la physique de ce montage.



Simulation transformateur

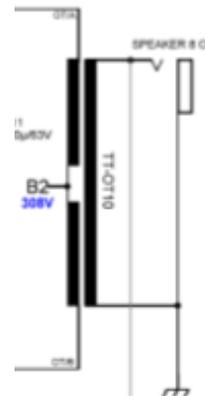


Schéma transformateur

Nous avons à présent compris le fonctionnement global de notre amplificateur.

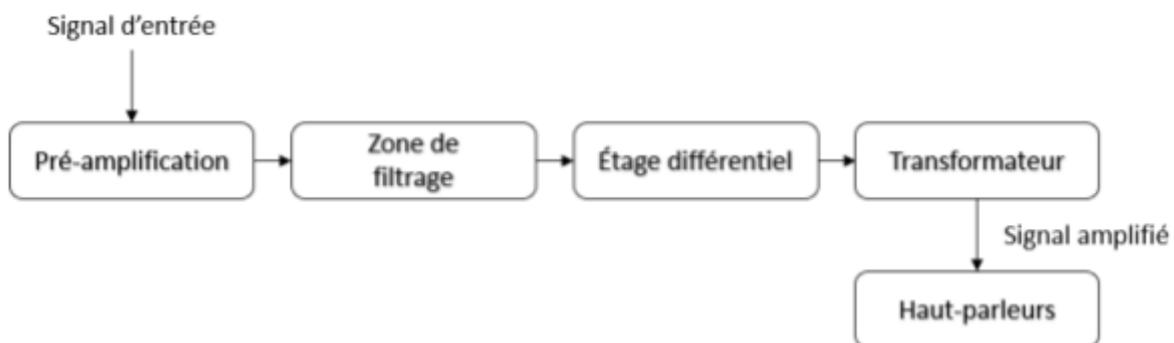


Schéma résumé des parties de l'amplificateur

Nous avons donc réalisé le schéma de notre circuit électronique sur le logiciel LTSpice. Cela nous a pris plusieurs séances car le travail est minutieux et le logiciel, pour la version utilisée, assez ancien.

LTSpice est un logiciel de simulation analogique standard qui permet, uniquement à partir du schéma électrique d'un montage, de réaliser différentes simulations afin de prédire et/ou d'analyser les comportements de notre circuit.

Vous trouverez le schéma réalisé sur LTSpice en annexe (cf Annexe 1).

### 3.2.2. Analyse transitoire

Tout d'abord, le but des premières simulations était de calculer le gain de l'amplificateur ainsi que de trouver les paramètres maximum du signal d'entrée afin que le signal en sortie ne soit pas saturé. C'est avec l'analyse transitoire que nous avons pu réaliser ceci grâce la commande `.tran` sur LTSpice.

### 3.2.2.1 Calculs de gains

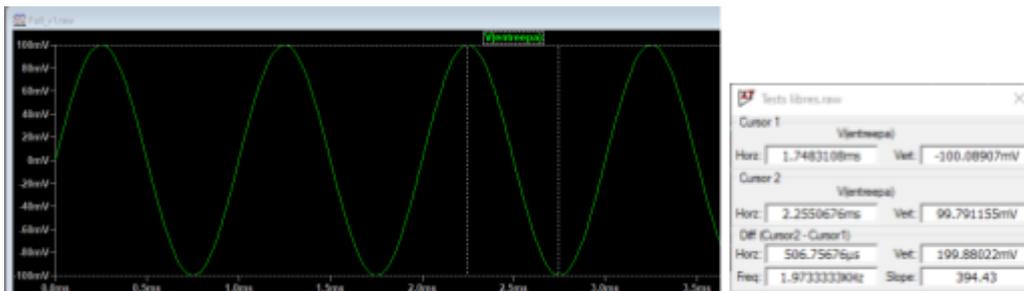
Nous avons donc mesuré le gain de chaque étage de l'amplificateur (pré-amplificateur, différentiel) à l'aide de la formule suivante :  $Gain = \frac{U_{sortie}}{U_{entrée}}$

Ce gain sera ensuite exprimé en décibels avec la formule  $GdB = 20 \log(Gain)$ .

Au départ le signal d'entrée est une sinusoïde dont nous avons fixé les paramètres, une tension de 0,1V et une fréquence de 1000 Hz. Ces paramètres sont réglables directement sur LTSpice et se changent très facilement.

Pour effectuer ces calculs de gain, nous avons donc besoin de relever les tensions d'entrée et de sortie de chaque étage de l'ampli. Il nous fallait donc lancer la simulation avec la commande "run" puis sélectionner sur le schéma l'endroit où nous voulions relever ces tensions.

Voici un exemple de mesure de la tension d'entrée du pré-amplificateur. Nous lisons grâce à des curseurs l'amplitude de notre signal en entrée. En faisant de même avec le signal de sortie nous pouvons calculer notre gain sur l'étage.



Exemple de mesure théorique sur LTSpice

Petite précision à propos de l'étage différentiel qui a une sortie non-inversée et une sortie inversée que nous avons aussi dû prendre en compte. De toute manière, l'obtention d'un gain négatif, donc d'une atténuation, n'aurait pas été logique par rapport à l'usage voulu d'un amplificateur. Voici donc le tableau récapitulatif de nos mesures :

	$V_{Entrée}$ (en V)	$V_{Sortie}$ (en V)	Gain	GdB (en dB)
Étage pré-amplificateur	0,1999	18,01	90,09	39,09
Étage différentiel (inversé)	2,900	-52,49	-18,10	25,15
Étage différentiel (non-inversé)	2,900	50,35	17,36	24,79
<b>Totalité de l'amplificateur</b>	<b>0,1999</b>	<b>7,457</b>	<b>37,31</b>	<b>31,44</b>

Notons ici que nous avons laissé tous les potentiomètres dans un réglage "neutre" qui n'atténue aucune partie de notre signal, mais que nous observons bien l'effet d'atténuation que possède notre filtrage la tension passant de 18 Volts à 2,9 Volts entre l'étage de pré-amplification et différentiel.

Nous pouvons donc estimer que la partie filtrante de notre circuit atténue d'un rapport 6 notre signal ce qui justifie à nouveau la présence du pré-amplificateur.

De plus, lors des premières séances nous avons utilisé un site internet pour estimer le gain que nous apporterait l'étage différentiel. Vous trouverez l'ensemble de cette simulation en annexe (cf. annexe 2) qui prévoyait un gain (en *dB*) de 29,16 *dB* pour le signal inversé et un gain de 28,91 *dB* pour le signal non-inversé ce qui correspond à nos valeurs obtenues sur LTSpice.

### 3.2.2.2. Calculs du rapport du transformateur

Il ne nous reste plus qu'à analyser l'effet du transformateur pour lequel nous pouvons calculer le rapport selon la formule suivante :

$$\text{rapport} = \frac{V_{OTA} - V_{OTB}}{V_s}$$

$V_{OTA}$ (en V)	$V_{OTB}$ (en V)	$V_s$ (en V)	Rapport transformateur
162,1	-162,0	7,485	<b>43,29</b>

$V_{OTA}$  et  $V_{OTB}$  correspondent aux tensions sur les fils reliés aux transformateurs (cf. schéma) et possèdent des tensions opposées en raison de l'étage différentiel qui a séparé le signal en une partie non-inversée et l'autre inversée.

Ensuite, nous avons cherché les limites de fonctionnement de l'amplificateur audio, c'est-à-dire les paramètres d'entrées maximum (fréquence et tension) pour lesquels l'amplificateur produit un signal de qualité sans déformation, un signal non saturé.

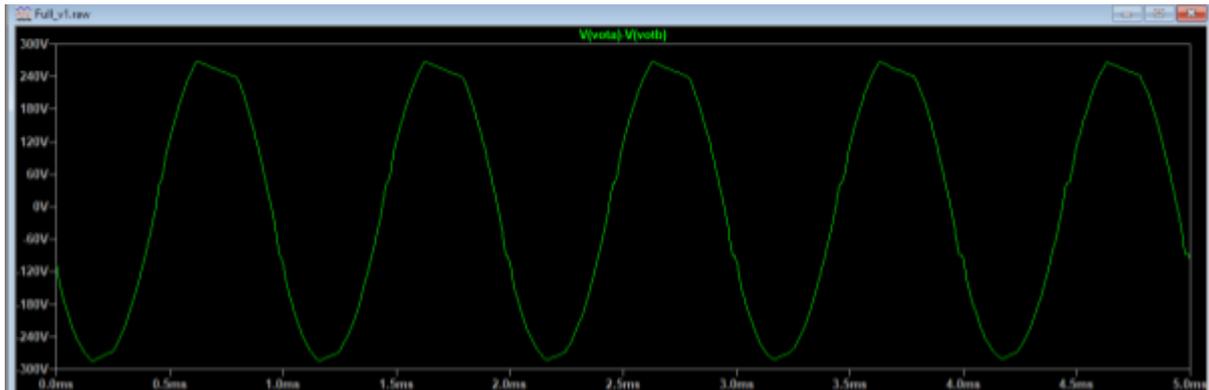
Pour vérifier cette valeur, Monsieur Grisel nous a fourni un calcul plus théorique qui suit le raisonnement suivant :

“Notre amplificateur est câblé pour fonctionner avec des haut-parleurs de 8 ohms. Sachant que le primaire est à 15kΩ nous avons donc un rapport d'impédances de 15000/8 soit 1875. Nous pouvons enfin obtenir le rapport de notre transformateur qui correspond à la racine carrée du rapport d'impédances. Le résultat obtenu est un rapport de transformateur valant 43,30.” Cela correspond au résultat obtenu avec LTSpice.

### 3.2.2.3. Recherche des points de saturation

Une autre analyse théorique que nous devons réaliser était la recherche des caractéristiques d'un signal en entrée qui provoquerait une saturation sur le signal obtenu en sortie de l'amplificateur.

Pour cela, nous avons cherché à la main les paramètres d'entrées qui impliquaient un signal légèrement saturé. Pour rappel, nous désirons un signal en sortie d'amplificateur sans aucune déformation, ce qui correspond à une forme sinusoïdale parfaite dans nos tests.



Exemple de signal saturé

Nous pouvons effectivement constater une légère saturation , la sinusoïdale n'étant pas parfaite.

Après plusieurs tests, nous en sommes venus à trouver la tension maximale acceptable en entrée pour ne pas avoir de saturation. Cette tension est de  $175\text{ mV}$  pour une fréquence de  $1000\text{ Hz}$  ou encore de  $135\text{ mV}$  pour un signal de  $2000\text{ Hz}$ . Il est évident que la valeur de tension maximale varie en fonction de la fréquence choisie mais nous cherchions simplement à avoir un ordre d'idée des points de saturation de notre amplificateur.

De plus, dans la réalité notre signal n'est pas sinusoïdal car il n'est pas composé que d'une fréquence mais d'une multitude de signaux qui sont compris entre  $20\text{ Hz}$  et  $20\,000\text{ Hz}$  (pour un signal audible par l'Homme). Tout cela ne pose pas de problème car les instruments électriques envoient des signaux dont la tension dépasse rarement la centaine de milliVolts et que si par malchance une saturation provient, il suffit de jouer avec le potentiomètre de gain et de volume pour l'éviter.

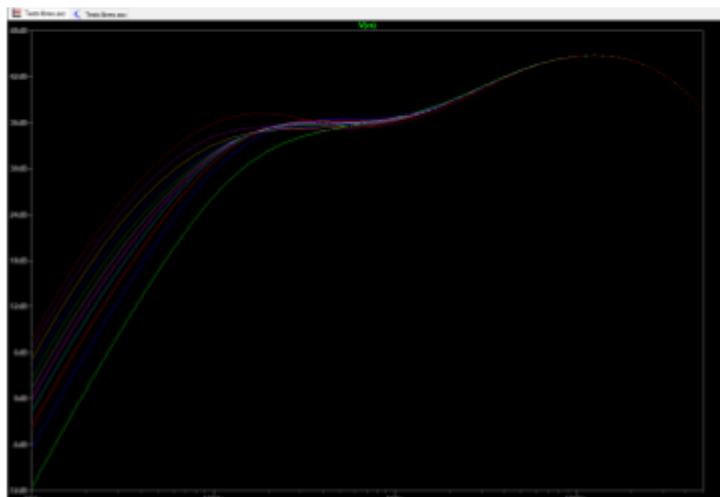
### 3.2.3. Analyse AC

Enfin, nous avons effectué un dernier type d'analyse qui permet d'observer le gain en fonction de la fréquence (en Hertz). Ceci sera utile pour observer l'effet du filtrage sur les aigus et les basses en fonction des réglages des potentiomètres.

#### 3.2.3.1 Potentiomètre de réglage des basses

Pour faciliter nos observations il faudrait simuler le réglage du potentiomètre de basse ce qu'il est possible de réaliser grâce à la fonction `.step param` de LTSpice. Pour cela il faut bloquer les autres potentiomètres sur une position fixe (en fixant les paramètres `wiper` à 1) et assigner la variable `WIPTONE` au potentiomètre dont on veut observer l'effet.

Enfin, la commande complète `“.step param WIPTONE 0 1 0,1”` permet de faire varier la variable `WIPTONE` entre 0 et 1 avec un pas de 0,1. Ainsi, nous pouvons tester et visualiser l'effet du potentiomètre concerné.



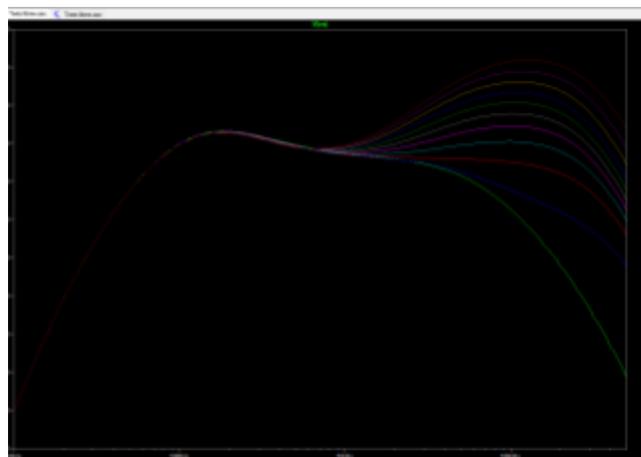
Courbe d'analyse du potentiomètre des basses

La courbe la plus haute, de couleur rouge représente le signal quand  $WIPTONE = 1$ , ce qui correspond à une transmission de toutes les basses. La courbe la plus basse, de couleur verte représente le signal quand  $WIPTONE = 0$ , ce qui correspond au filtrage maximum des basses du signal. Tout ceci est cohérent et nous remarquons que le filtrage atténue les fréquences inférieures à 500 Hz sans changer les fréquences au-dessus.

### 3.2.3.2 Potentiomètre de réglage des aigus

Nous avons réalisé la même manipulation pour tester l'effet du potentiomètre des aigus et nous avons obtenu les courbes suivantes.

À nouveau, nous pouvons dire les choses suivantes. La courbe la plus haute, de couleur rouge représente le signal quand  $WIPTONE = 1$ , ce qui correspond à une transmission de tous les aigus. La courbe la plus basse, de couleur verte représente le signal quand  $WIPTONE = 0$ , correspondant au filtrage maximum des aigus du signal. Nous observons bien que le filtrage est efficace pour les fréquences supérieures à 1000 Hz.



Courbe d'analyse du potentiomètre des aigus

### 3.2.3.3 Potentiomètre de gain et de volume

Pour rappel, il y a 2 autres potentiomètres sur une voie de notre amplificateur : le potentiomètre de gain et celui de volume. Ces 2 potentiomètres sont censés être similaires dans leur fonctionnement et doivent laisser passer une partie signal proportionnellement à leur réglage. Cela sert à régler le volume sonore qui sort au niveau des hauts-parleurs ou à diminuer la puissance du signal si une saturation de celui-ci provient.

Les courbes étant moins intéressantes pour ces potentiomètres vous en trouverez un exemple en annexe (cf Annexe 3 et 4).

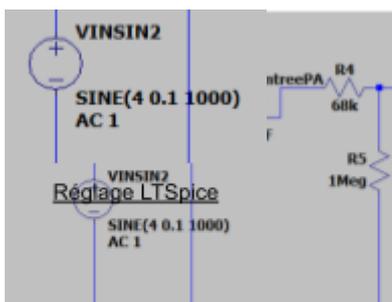
### 3.2.4. Problème de composante continue

#### 3.2.4.1. Explications et première solution

Avant de pouvoir expliquer ce qu'est une composante continue et quel problème cela a posé pour notre projet il faut mettre un petit peu de contexte. Il était prévu que l'amplificateur, une fois finalisé, soit testé pour vérifier son bon fonctionnement. Pour cela, Monsieur Grisel avait proposé l'utilisation d'un tourne disque sur lequel serait placé un vinyle de test permettant la production de signaux à des fréquences bien définies et connues. Ainsi, nous aurions pu utiliser le tourne disque pour fournir des signaux de fréquence précise (par exemple 1000 Hz) à l'entrée de notre amplificateur et vérifier qu'il ressorte bien amplifié et sans déformation.

Cependant, lors d'un test préliminaire du tourne disque, nous avons remarqué que le signal qui en sortait possédait une composante continue de 4 Volts. Autrement dit, la valeur moyenne de l'amplitude de notre signal qui est ici sinusoïdal est de 4 V. Un problème majeur se pose car notre amplificateur est prévu pour des guitares électriques qui fournissent des signaux d'entrée d'une amplitude de quelques centaines de mV. Pour simplifier la situation, il y a un fort risque de faire exploser notre amplificateur si nous y envoyons ce signal possédant une composante continue de 4 V.

Cependant, Monsieur Grisel a trouvé une solution qui consisterait en la création d'un filtre passe haut en début de circuit grâce à l'ajout d'un condensateur d'une valeur de 100 nF. L'utilisation d'un filtre passe haut est adapté à notre problème car la composante continue a pour fréquence 0 Hz, il suffit donc de couper les basses fréquences en dessous de l'ouïe humaine pour réussir à supprimer la composante continue sans altérer le son de nos instruments. Vérifions ceci de manière théorique, toujours grâce à LTSpice.



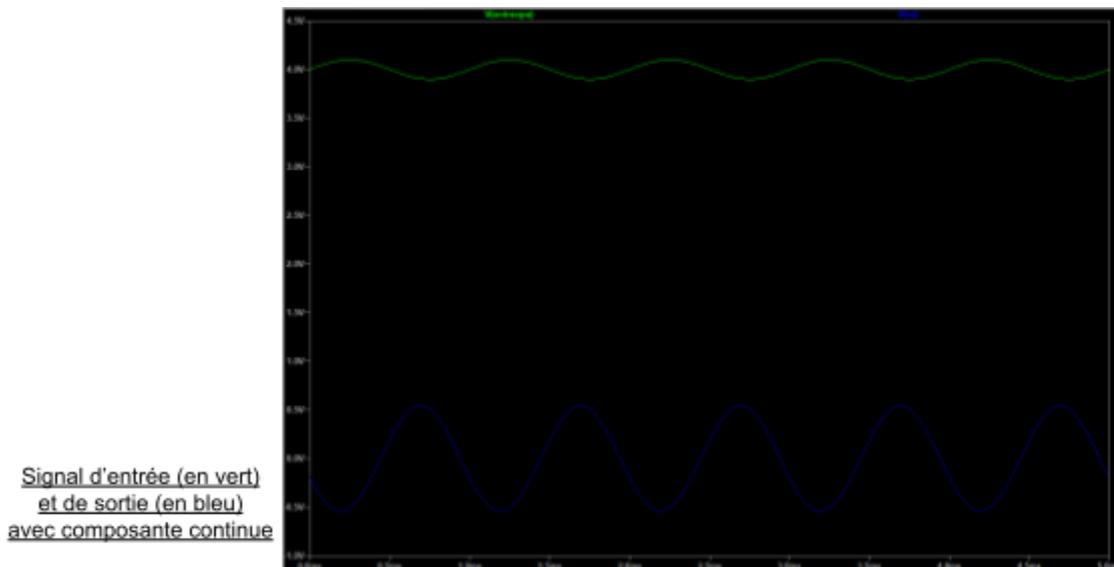
Ajout du condensateur  
"C42" sur LTSpice



Ajout des condensateurs sur  
l'amplificateur

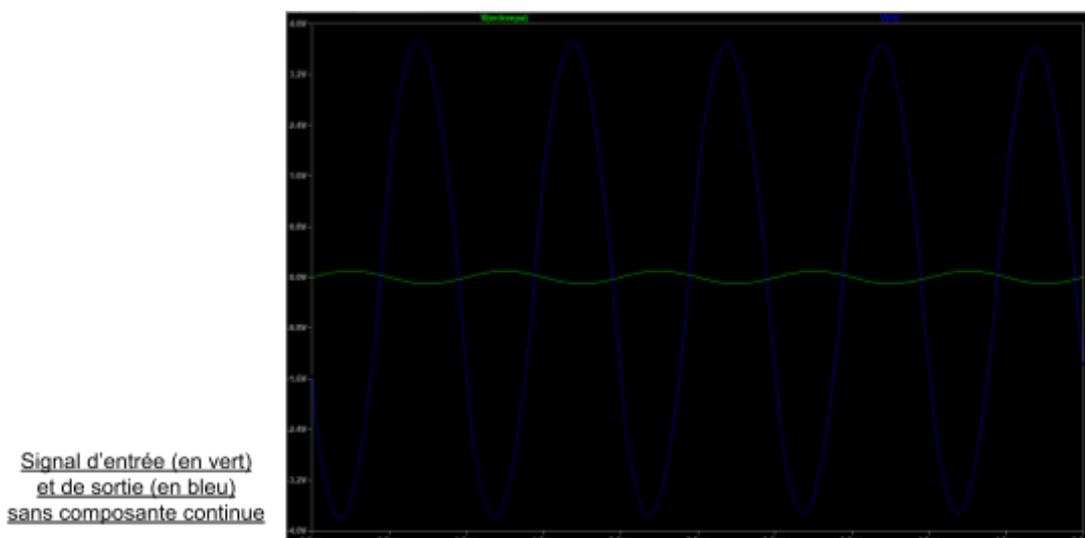
Nous avons donc observé sur LTSpice les effets que pourrait avoir cette composante continue et les changements qu'engendrerait la solution de Monsieur Grisel. De ce fait, nous avons commencé par simuler la composante continue sur LTSpice en passant la valeur moyenne de signal d'entrée de 0 V à 4 V.

Voici l'allure des signaux d'entrée et de sortie en cas de présence de la composante continue.



Dans ce cas le gain total de l'amplificateur est égal à :  $\frac{V_s}{V_E} = \frac{1,085}{0,1997} = 5,43$  ce qui nous donne un gain de  $14,7 \text{ dB}$  ce qui n'est pas suffisant pour un amplificateur.

Une fois le condensateur de  $100 \text{ nF}$  placé en début de circuit et, par conséquent la composante continue supprimée nous obtenons les résultats suivants :



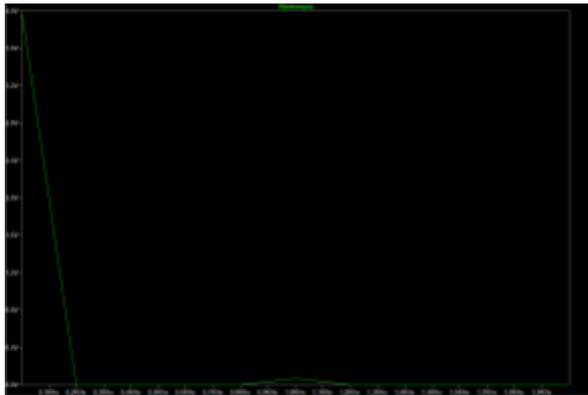
On remarque que comme prévu la valeur moyenne du signal d'entrée est de  $0 \text{ V}$  et que l'amplitude du signal de sortie a augmenté. Nous avons donc un nouveau gain :

$\frac{V_s}{V_E} = \frac{7,459}{0,1997} = 37,4$  soit  $31,5 \text{ dB}$  ce qui est une augmentation de volume raisonnable pour un amplificateur.

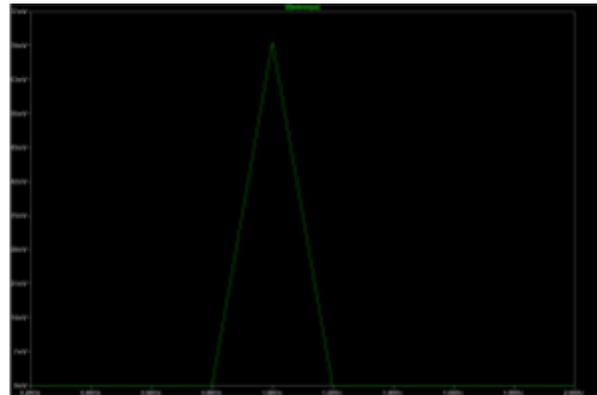
### 3.2.4.2. Bonus sur la composante continue

Ce problème de composante continue a constitué une vraie partie, imprévue, dans notre projet et nous avons eu l'occasion d'utiliser encore plus LTSpice afin de comprendre ce que l'on allait faire.

Par exemple, nous avons réalisé une analyse rapide de fourier sur le signal d'entrée pour bien observer la composante continue de 4 Volt pour une fréquence de 0 Hz et la disparition de celle-ci une fois le condensateur "C42" ajouté à la simulation.



Composante continue à gauche et signal d'entrée au centre



Signal d'entrée seul grâce à notre solution

### 3.2.4.3 Une deuxième solution : le correcteur RIAA

Une autre solution a été proposée par Monsieur Grisel afin d'avoir un signal d'entrée sans composante continue et ceci est possible si l'on utilise la sortie "phono" de la platine. Néanmoins, il faut savoir qu'il est difficile d'enregistrer des basses sur des vinyles, le choix suivant a donc été fait : diminuer les basses et augmenter les aigus. Cependant, lors de la restitution du son il serait bien d'avoir un signal "original". Il faudrait donc, à la lecture du vinyle, augmenter les basses et diminuer les aigus. C'est ce que fait le correcteur RIAA.

Pour résumer, nous avons installé des condensateurs à l'entrée de notre amplificateur pour supprimer une possible composante continue. Mais durant nos tests, nous avons utilisé un tourne-disque qui fournissait un signal sans composante continue grâce à un correcteur RIAA branché sur la sortie phono de l'appareil.

## 3.3. Tests

Une fois la simulation et l'assemblage de l'amplificateur terminée, nous avons procédé à une série de mesures sur chaque partie de ce dispositif.

D'abord, nous avons réalisé des tests sur la carte d'alimentation grâce à un multimètre. Nous avons alors relevé la tension efficace et nous l'avons comparée avec les données fournies sur les plans. Ces résultats sont concluants car la marge d'erreur est inférieure à 10%.

Ensuite, nous avons relevé des mesures sur les cartes d'amplifications, d'abord sans triode pour vérifier que les composants supportent la tension puis nous avons ajouté les lampes sur les différentes cartes. On génère un signal sinusoïdal de (50 mV crête-crête / 1 kHz) dans les deux entrées grâce à deux générateurs basse fréquence.

Puis nous effectuons les mesures de tensions crête à crête grâce à un oscilloscope sur les différents étages de l'amplification et de filtrage (cf. annexe 5 pour une photo de l'installation).

Avant d'observer les résultats présentés ci-dessous nous pouvons préciser que notre simulation sur LTSpice permet de prédire le comportement d'une voie de l'amplificateur qui dans la réalité en possède deux (voies droite et gauche). Cela implique que nous avons 2 mesures expérimentales légèrement différentes (en raison des incertitudes des composants, du matériel, ...) sans que cela n'ait de conséquence remarquable :

Composant	Broche	Valeurs mesurées (V)		Valeurs simulation (V)	Delta	
		Gauche	Droit		Gauche	Droit
	Entrée	0,05	0,05			
Filtrage utilisateur	C2 / R7	1,51	1,55	4,51	-66,52 %	-65,63 %
	C4 / R13	0,34	0,34	0,74	-53,87 %	-54,14 %
ECC83	Broche 6	32,60	32,20	11,80	176,27 %	172,88 %
	Broche 1	31,60	31,00	11,40	177,19 %	171,93 %
ECC99	Broche 7	16,10	15,90	5,81	177,11 %	173,67 %
	Broche 2	15,40	14,90	5,47	181,54 %	172,39 %
	Broche 6	159,00	160,00	54,35	192,55 %	194,39 %
	Broche 1	160,00	161,00	54,39	194,17 %	196,01 %
	Sortie	11,00	12,50	2,77	297,11 %	351,26 %

Cette fois-ci nous possédons des écarts très forts entre nos valeurs théoriques et mesurées et cela peut s'expliquer par de nombreux facteurs.

Premièrement, ces tests ont eu lieu lors des dernières séances de projet et les valeurs expérimentales ont été prises qu'une seule fois, par Monsieur Grisel et les étudiants qui annotaient du mieux que possible. Ces conditions ne sont évidemment pas optimales et il est fort probable que des erreurs se soient glissées dans nos valeurs à ce moment-là.

Deuxièmement, nous savons que les lampes, éléments essentiels de notre amplificateur, sont fragiles. Nous en avons déjà remplacé une suite à des tests infructueux et il s'est avéré que cette dernière était cassée. À nouveau, il est possible qu'une lampe partiellement endommagée (ou un autre composant) puisse troubler nos mesures.

Troisièmement, le logiciel LTSpice ne permet pas de simuler les lampes de type *ECC99* et *ECC83* (présentes en 4 exemplaires dans notre montage). Nous avons donc utilisé le modèle de lampe *12AX7* sur LTSpice qui permet une simulation plus précise mais avec beaucoup plus d'incertitudes.

Enfin, toutes ces raisons combinées nous amène à la conclusion suivante : ces tests ne sont sûrement pas corrects et montrent qu'un délai supplémentaire aurait été nécessaire pour les réaliser correctement. Cependant, il est important dans le métier d'ingénieur d'être capable de repérer ses erreurs et de savoir se remettre en question ce qui est le cas ici.

Monsieur Grisel a également pu voir ces écarts de valeurs mais malheureusement, l'amplificateur étant finalisé nous n'avons plus accès aux câblages et nous sommes donc dans l'incapacité de faire de nouveaux tests.

## 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES DU PROJET

### 4.1. Conclusion générale

Ce projet nous a apporté des compétences sur la construction, l'analyse et la simulation d'un amplificateur à lampes. Nous pouvons le considérer comme l'application de nos connaissances acquises au cours des années STPI sur un dispositif audio sophistiqué.

Les tests de simulations effectués sont très importants dans l'étude d'un amplificateur, car ils permettent de vérifier son comportement avant de le mettre en fonctionnement. Ces tests permettent de détecter les éventuelles erreurs de conception ou de montage. Puisque notre amplificateur fonctionne correctement, nous pouvons dire avec confiance que ces simulations de l'amplificateur à lampes, prouvent qu'il est essentiel d'être attentif et de collaborer les uns avec les autres.

En outre, nous avons renforcé nos aptitudes de travail en équipe. Après la répartition des rôles, nous avons pu réussir de finir le montage et de faire tous les tests nécessaires avant de mettre l'amplificateur en fonction. Ayant chacun son travail, une bonne communication nous a permis de nous concentrer sur notre travail de manière efficace et rapide. Nous avons su nous organiser et mettre en place des solutions pour palier aux contraintes de temps et de disponibilités personnelles. Ainsi, grâce à l'aide de Monsieur Grisel et de nos camarades, nous avons mené à bien ce projet ambitieux.

### 4.2. Conclusion sur l'apport personnel de cet E.C. projet

Maylis François : J'ai beaucoup appris durant ce projet, d'abord à gérer les différentes tâches qui m'ont été confiées, mais également à me faire confiance et m'organiser de telle sorte à rentabiliser mon temps et celui de mes collègues. Ce projet fait appel à tout ce que l'on peut attendre d'un ingénieur humaniste c'est à dire faire preuve d'adaptabilité, d'écoute et d'entraide tout en privilégiant le travail d'équipe.

Mathis Saunier : Ce projet a été très enrichissant pour moi, tant sur un plan personnel que scolaire. Je comprends désormais mieux le fonctionnement des amplificateurs (que j'utilisais lorsque je jouais de la guitare) et me rends compte que je ne possède pas toutes les compétences nécessaires si j'avais souhaité réaliser ce projet seul. Cela ne me démotive pas pour autant car je sais que la spécialité que je souhaite me donnera l'occasion de faire à nouveau de l'électronique et par conséquent l'occasion de m'améliorer. Cela m'a aussi montré à quel point le travail en équipe est important et qu'à plusieurs, nous pouvons atteindre des résultats bien plus poussés.

Vincent Taillade : Tout au long de ce projet, j'ai pu mettre en œuvre mes compétences de travail d'équipe afin d'aider mon groupe à la réalisation de cet amplificateur à lampes. J'ai pu également découvrir le domaine de l'électronique et approfondir mes connaissances dans ce dernier. De plus, durant ce projet, nous avons pu réaliser le travail d'un ingénieur, c'est-à-dire partir d'un modèle théorique jusqu'en arriver à sa conception complète. S'adapter, résoudre les problèmes rencontrés et chercher de nouvelles solutions

sont des compétences que j'ai pu développer grâce à la réalisation de cet amplificateur. En somme, ce projet m'a apporté tant sur le plan humain que sur le plan technique.

Irina Costrita : J'ai eu l'opportunité de mieux comprendre la complexité de l'élaboration d'un amplificateur à lampes, ainsi que la charge de travail nécessaire pour obtenir les résultats souhaités. Ce projet m' a rapproché un peu plus du métier d'ingénieur, en me montrant l'importance de travailler avec zèle ensemble afin d'avoir un grand pas de progression.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

*Lien internet (INTRODUCTION):*

- <https://www.solfege.org/amplificateurs-a-lampe/> (valide à la date du 15/06/2023);
- <https://larepubliqueduson.com/blog/2021/03/26/tout-sur-les-tubes/> (valide à la date du 26/03/2021);
- <https://blog.a-wai.com/2015/02/18/histoire-tubes-1/> (valide à la date du 18/02/2015).

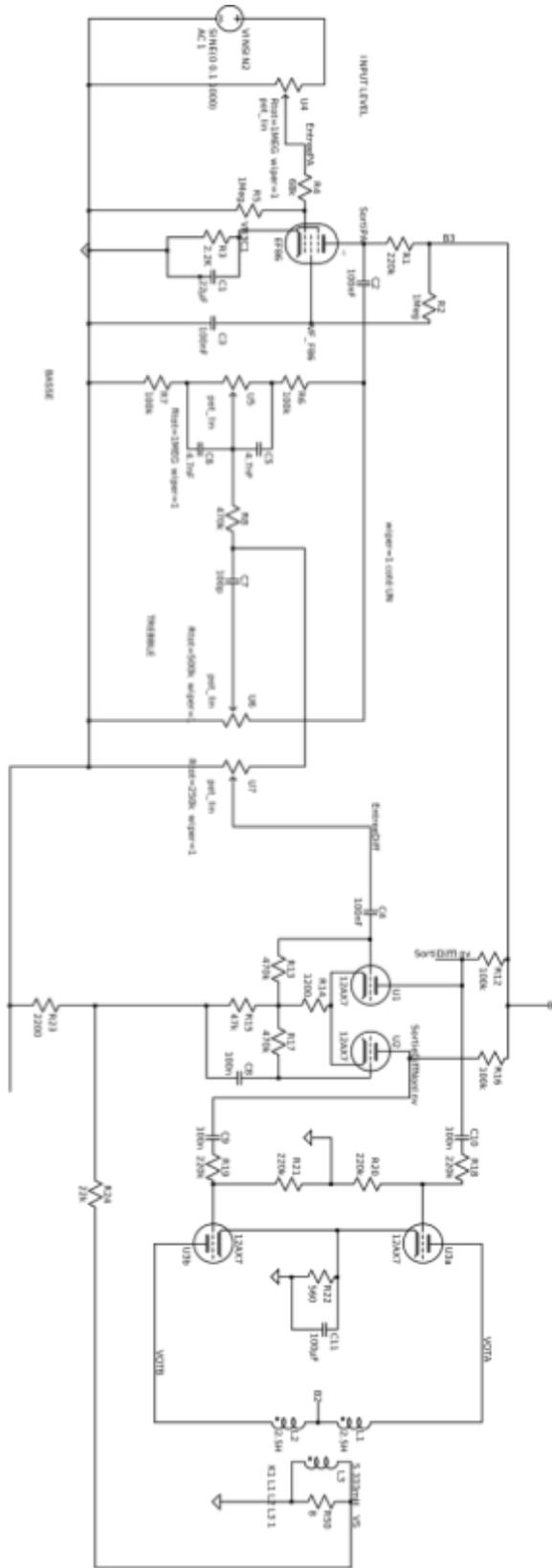
*Lien Multimédia ( Triode ) :*

- Chaîne : AUDIO ET RADIO À TUBES - LA TRIODE - Principe et et caractéristiques;
- [https://www.electronique-et-informatique.fr/Triodes\\_Tubes\\_Electroniques.php](https://www.electronique-et-informatique.fr/Triodes_Tubes_Electroniques.php) (valide à la date du 22/05/2023).

*Lien pour le calcul du Gain:*

- <https://www.ampbooks.com/mobile/amplifier-calculators/long-tailed-pair/>

**6. ANNEXES**



**Annexe 1 : Schéma simulation LTSpice**

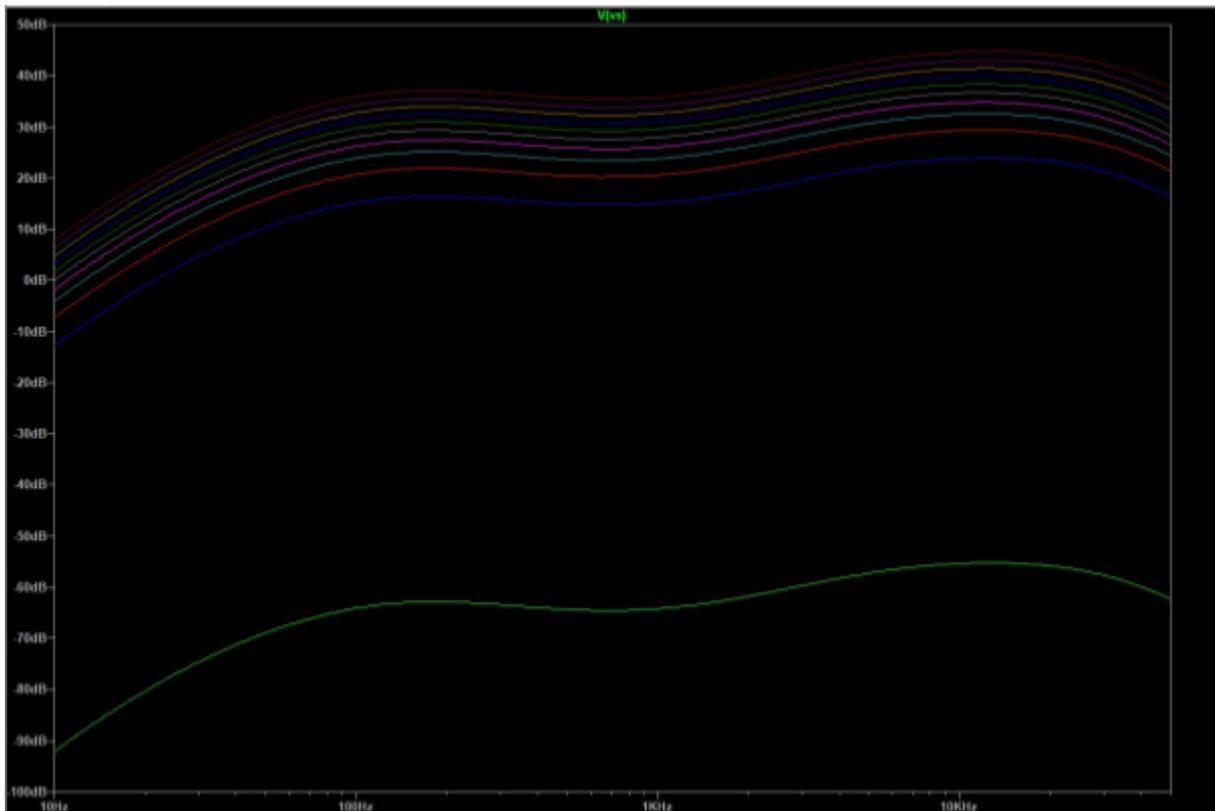
**inverted voltage gain** 28.71 (29.16 dB)

**non-inverted voltage gain** 27.88 (28.91 dB)

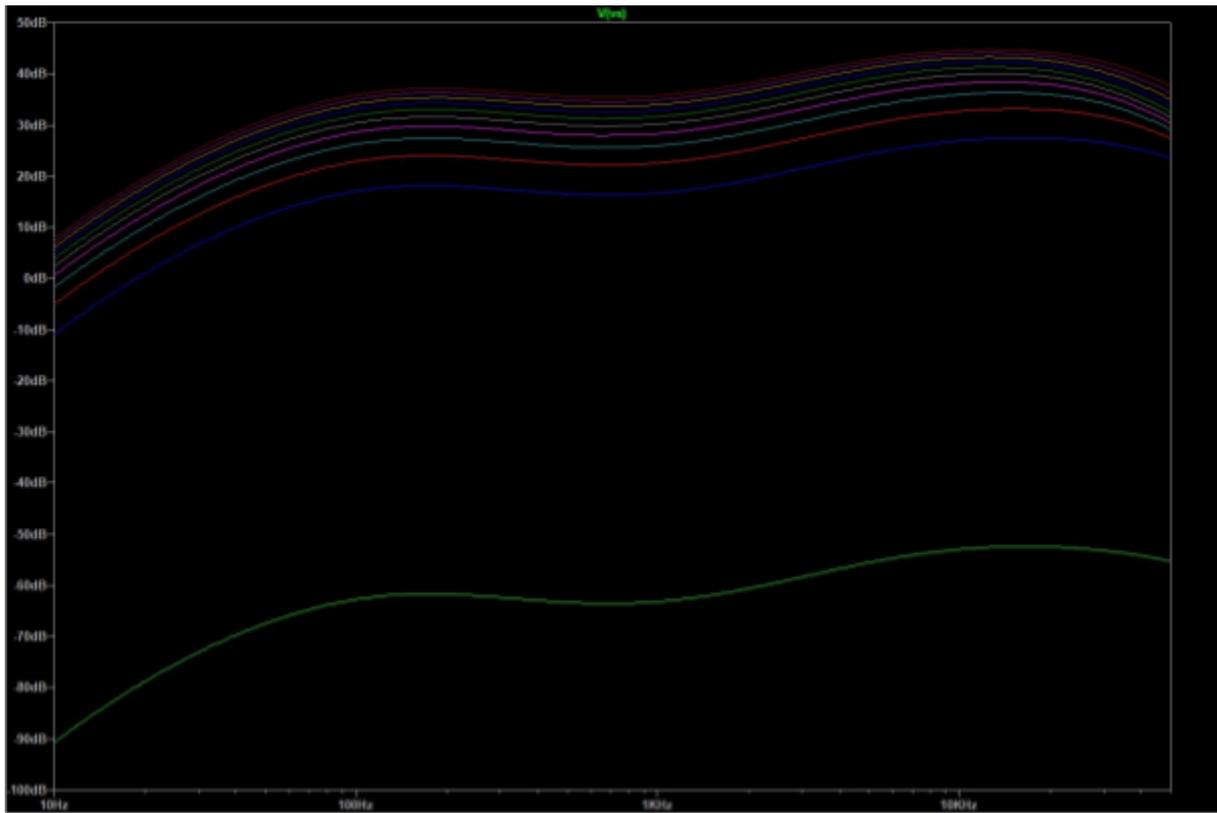
← more    recalculate ↻

tube type	12AX7 ▾
R <sub>L1</sub> (kΩ)	100
R <sub>L2</sub> (kΩ)	100
R <sub>K</sub> (ohms)	1200
R <sub>T</sub> (kΩ)	47
power amp grid resistor R <sub>G</sub> (kΩ)	440

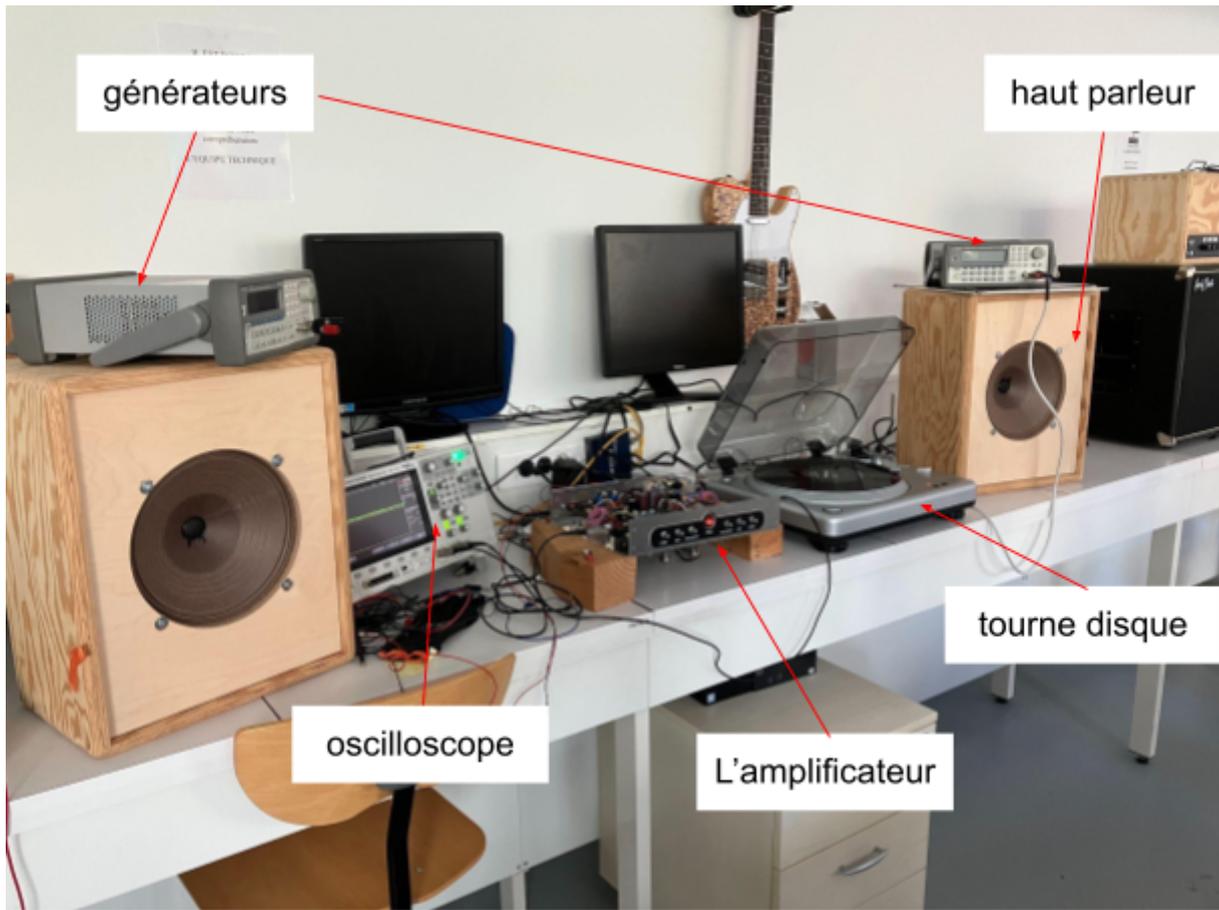
Annexe 2 : gains théoriques



Annexe 3 : Influence du potentiomètre de gain



Annexe 4 : Influence du potentiomètre de volume



Annexe 5 : Installation des tests