

Amplificateur audio à lampes (saison 2)



Étudiants :

Etienne BOUR
Alix ANNERAUD

Mohamad IRANI
Manuel BROCHET

Enseignant-responsable du projet :
Richard GRISEL

Date de remise du rapport : 17/06/2023

Référence du projet : STPI/P6/2023 – 042

Intitulé du projet : Amplificateur audio à lampes

Type de projet : expérimental, électronique, modélisation

Objectifs du projet : Le but du projet est la fabrication d'un amplificateur audio à lampes opérationnel. Pour cela, nous devons mener à bien son montage, ainsi que les différents tests. De plus, nous souhaitons une simulation de l'amplificateur sur le logiciel LTSpice, afin de pouvoir comparer les résultats théoriques et expérimentaux. Dans son ensemble, le projet a pour objectif de nous faire monter en compétences dans différents domaines : l'électronique, la simulation de systèmes complexes, le travail en équipe et l'application concrète de nos connaissances théoriques. En finalité, nous espérons pouvoir écouter de la musique avec l'amplificateur que nous avons construit.

Mots-clefs du projet : *Simulation, montage, test, électronique.*

Remerciements

Avant de commencer, nous souhaiterions remercier l'INSA Rouen Normandie de nous offrir la possibilité, de part ses infrastructures et ses financements, de participer à ce projet.

Nous remercions également Monsieur Richard Grisel, notre enseignant encadrant, qui nous a guidés et permis d'arriver à l'aboutissement de l'amplificateur audio à lampes.

Finalement, nous tenons à remercier le service du laboratoire d'électronique : Pascal WILLIAMS, Helene RADE et Michael JOLLY qui nous ont accompagnés et ont répondu à nos questions tout au long du projet.

Table des matières

1	Introduction	6
2	Méthodologie	7
2.1	Répartition des tâches	8
2.2	Déroulement d'une séance	8
3	Principes de fonctionnement	9
3.1	Fonctionnement des différents composants	9
3.1.1	Les triodes	9
3.1.2	Les condensateurs	10
3.1.3	Les potentiomètres	11
3.2	Les différentes classes d'amplificateurs	11
3.2.1	Classe A	11
3.2.2	Classe B	11
3.2.3	Classe AB	12
3.2.4	Classe D	12
3.3	Fonctionnement de l'amplificateur	13
4	Tâches réalisées	15
4.1	Soudure des composants sur les cartes	15
4.2	Montage	16
4.3	Câblage	16
4.4	Particularités remarquées lors du montage	17
4.4.1	Masse en étoile	17
4.4.2	Problèmes rencontrés	18
5	Simulation et tests	19
5.1	Simulation et résultats théoriques	19
5.2	Tests et mesures	19
5.3	Tests qualitatifs	21
6	Conclusion	22
6.1	Apports personnels du projet	22
6.1.1	Etienne	22
6.1.2	Manuel	22
6.1.3	Alix	22
6.1.4	Mohamad	23
6.2	Conclusions et perspectives	23

7 Bibliographie	24
Articles	24
Figures	24
Videos	24
8 Annexes	25

Introduction

Nous sommes quatre étudiants (Manuel, Alix, Mohamad et Etienne) en seconde année du cursus STPI de l'INSA de Rouen Normandie. Dans le cadre de nos études, nous avons pu effectuer un projet de groupe. Plusieurs sujets nous ont alors été proposés, et nous avons opté pour la fabrication d'un amplificateur audio à lampes. En effet, nous sommes tous les quatre passionnés de musique et d'électronique, ce projet nous est donc apparu comme une évidence.

Tout d'abord, parlons un peu de l'histoire de l'amplificateur audio à lampes. Dans les années 30, le guitariste George Beauchamp a l'idée d'équiper sa guitare de microphone, et d'en intensifier le signal grâce à un amplificateur. Les premiers amplificateurs pour guitares sont commercialisés en 1935 par la marque Gibson. Ils sont une révolution dans le domaine de la musique, et vont façonner le paysage musical pour les années à venir. On peut même affirmer qu'ils sont l'un des piliers des musiques actuelles d'aujourd'hui.

En effet, depuis les années 50, la guitare électrique occupe une place prédominante dans la musique populaire. Elle est notamment démocratisée par des musiciens tels que Jimmy Hendrix et Elvis Presley, et par des groupes comme les Beatles. La guitare électrique (et donc l'amplificateur à lampes) arrive ensuite au centre de la quasi-totalité de la musique écoutée par le grand public grâce à l'avènement de la musique rock. Elle commence avec des sonorités blues et rock'n'roll, avec des groupes comme The Doors ou Queen, pour finir avec des sons toujours plus forts et saturés, dans les mains de Kurt Cobain ou encore Tom Morrelo. De nombreux genres se créent autour de l'instrument comme le heavy metal, le hard rock, le punk ou le funk.

Cependant, la popularité de la guitare électrique baisse drastiquement dans les années 2000, avec l'arrivée de la musique assistée par ordinateur et du rap. Les amplificateurs sont donc utilisés de manière différente (pour diffuser de la musique pré-enregistrée par exemple). Il est important de noter qu'à partir de ces années-là, l'amplificateur à lampes a de sérieux concurrents : l'amplificateur à transistors et, plus tard, l'amplificateur à modélisation. De nos jours, l'amplificateur à lampes et la guitare électrique n'ont plus la place d'honneur qu'ils occupaient avant. Néanmoins, ils restent des incontournables de la musique actuelle, et regagne petit à petit en popularité grâce notamment aux réseaux sociaux, avec des musiciens tels que Mateus Asato ou Ichika Nito.

Dans ce rapport, nous allons vous présenter la méthodologie que nous avons utilisé tout au long du projet. Puis, nous expliquerons le fonctionnement général de l'amplificateur. Par la suite, nous présenterons le travail réalisé durant ce semestre, ainsi que nos résultats. Enfin, nous ferons un court bilan sur ce projet, avec nos perspectives et ce que nous avons appris en travaillant sur cet amplificateur.

Méthodologie

Dans cette partie, nous allons présenter l'organisation du projet, qui nous a permis de répartir les tâches de manière efficace, afin de terminer dans les délais impartis.

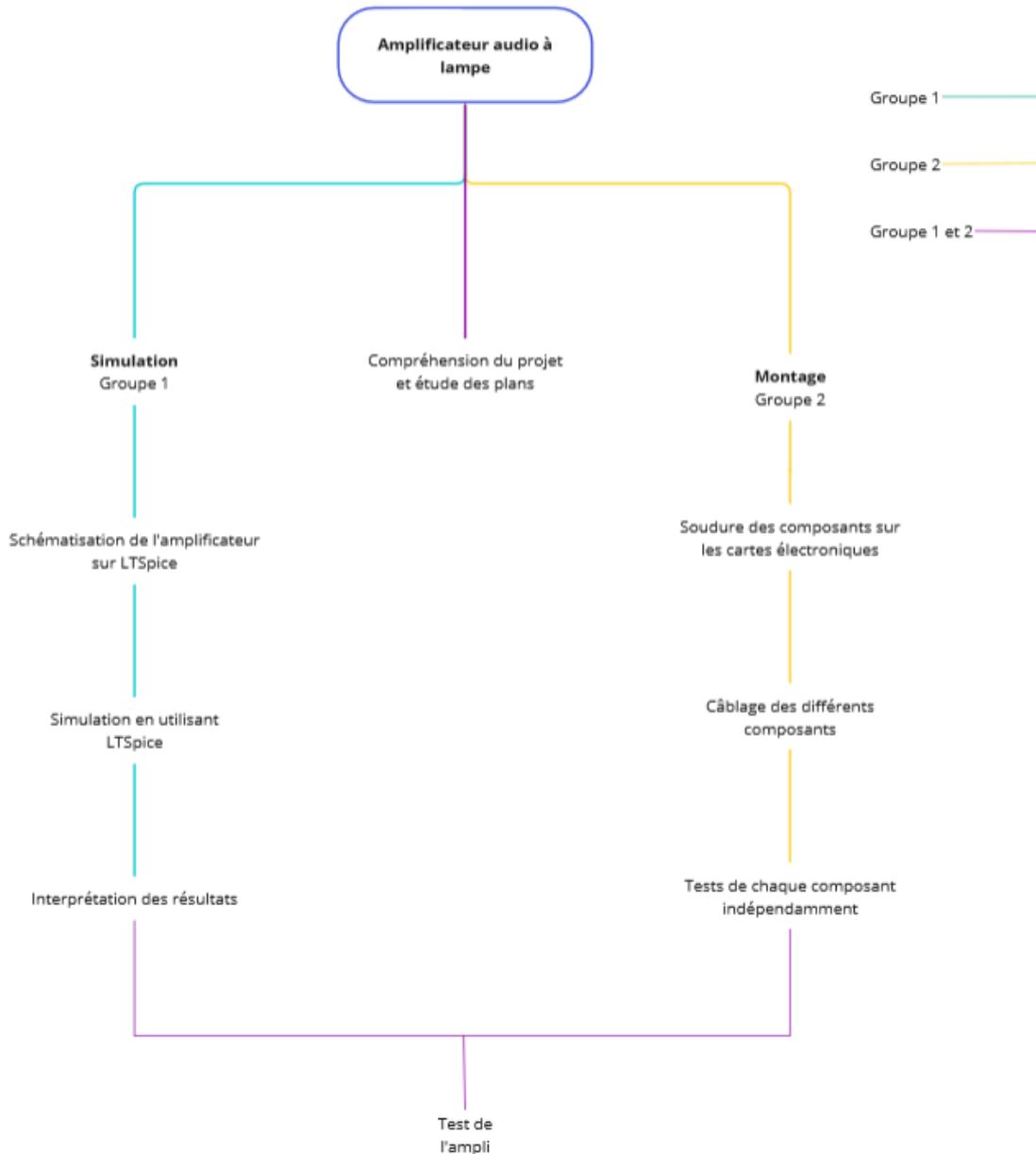


FIGURE 2.1 – Organigramme du projet.

2.1 Répartition des tâches

Pour mener ce projet à bien, nous nous sommes séparés en deux groupes distincts. Le premier groupe (composé de Maelys, Mathis, Irina et Vincent) travaillait sur la simulation de l'amplificateur et les calculs théoriques. Le second groupe, le nôtre, travaillait sur le montage de l'amplificateur. Les deux groupes fonctionnaient indépendamment, ce qui facilitait grandement l'organisation. Comme on peut se l'imaginer, il est compliqué de travailler à huit sur une même et unique tâche. La perte de temps est conséquente et le résultat n'est pas meilleur qu'en ayant travaillé en plus petites équipes.

Pour aller plus loin dans l'organisation mise en place au sein du groupe, nous avons formé deux nouvelles sous-équipes. Une des tâches principales était le montage de l'amplificateur (entendons par là soudure et câblage des composants). En effet, il a fallu souder en continu sur toutes les séances pour faire avancer efficacement la construction. Nous avons donc en permanence au moins deux personnes à l'atelier qui se chargeaient de cela.

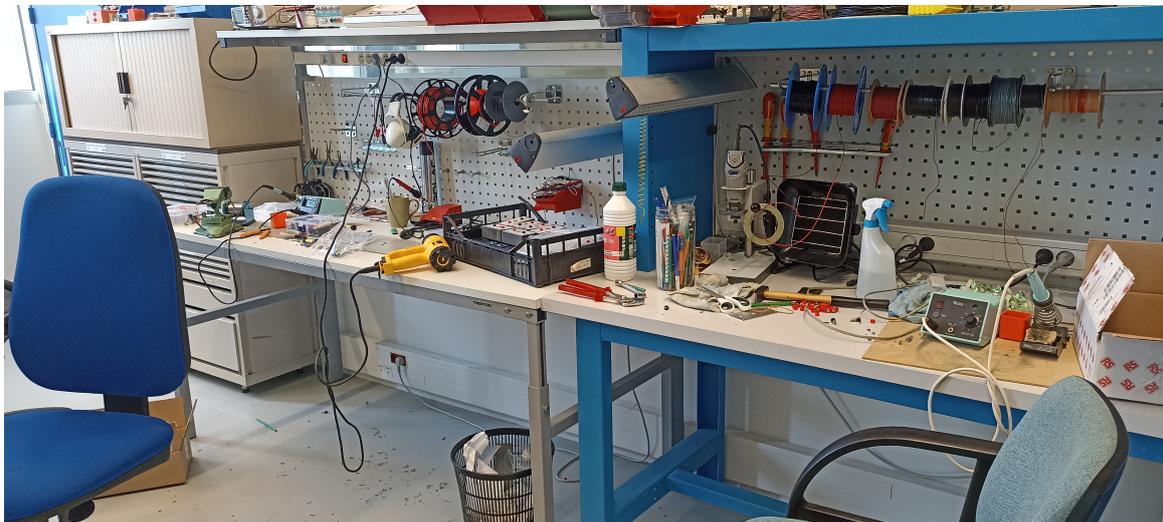


FIGURE 2.2 – Photographie de l'atelier de soudure.

Les autres s'occupaient alors d'écrire le rapport et d'effectuer les différentes tâches annexes (tout de même essentielles pour garantir un avancement continu du projet). Ainsi, fonctionner en parallèle les uns des autres nous a permis de faire avancer efficacement le projet.

2.2 Déroulement d'une séance

De manière générale, les séances se déroulaient de la manière suivante : une fois arrivés au laboratoire d'électronique, nous nous concertions afin de revoir l'avancement du projet, puis nous déterminions les objectifs du jour afin d'en déduire les tâches à effectuer. Nous nous séparions alors en deux groupes : un pour l'assemblage de l'amplificateur et l'autre pour les activités secondaires type documentation ou rédaction du rapport.

Bien souvent, lorsque la séance touchait à sa fin, les tâches entreprises n'étaient pas terminées. Or, les remettre à la semaine suivante n'était pas envisageable car nous souhaitions progresser au maximum sur le projet. De plus, certaines opérations critiques ne peuvent pas être mises en pause. Ainsi, nous restions en général plus de temps que prévu au laboratoire, étant donné que la majorité des personnes du groupe n'avait pas d'impératifs après le créneau de P6.

Principes de fonctionnement

3.1 Fonctionnement des différents composants

Tout d'abord, nous allons introduire les principaux composants utilisés dans cet amplificateur. Ce chapitre est nécessaire pour comprendre ensuite son fonctionnement (section 3.3).

3.1.1 Les triodes

Au début du 20^{ème} siècle, l'un des principaux défis en électronique était l'amplification. La radio et le téléphone venaient d'être inventés, mais leur portée était limitée par le manque de matériel fiable pouvant accroître la puissance des signaux faibles (provenant notamment de microphones). À l'époque, la seule méthode d'amplification était le relais, qui ne pouvait alors qu'amplifier des signaux numériques de faible fréquence (pour les télégraphes par exemple).

Cependant, une découverte hasardeuse de Thomas EDISON a révolutionné le monde de l'amplification. Ce dernier a remarqué qu'au cours de la vie d'une ampoule, le verre se noircissait d'un seul côté du bulbe. Cela est dû à l'émission thermoionique produite par le filament. En effet, lorsque la température d'un métal augmente, la chaleur donne suffisamment d'énergie aux électrons présents dans celui-ci pour qu'ils puissent surmonter la barrière de potentiel et s'échapper dans le vide. Ce phénomène, bien que découvert 27 ans plus tôt par Frederick GUTHERIE, a été popularisé par EDISON.

Dans notre cas, le filament métallique en tungstène est traversé par un courant électrique, ce qui augmente sa température, permettant donc aux électrons d'être éjectés dans le vide de l'ampoule. Cependant, dû à une différence de potentiel entre les fils qui mènent au filament, les électrons étaient attirés et accélérés vers le fil chargé positivement. Ces derniers possédant une vitesse élevée, ils évitaient alors le fil et venaient s'écraser contre la paroi en verre. Ces impacts répétés généraient ainsi un noircissement localisé sur le bulbe du côté du fil chargé positivement. Ce phénomène n'était observé que dans le cas d'un courant continu. Effectivement, en courant alternatif, les deux côtés du bulbe étaient noircis.

En 1904, John Ambrose FLEMING dépose un brevet concernant un dispositif similaire à l'ampoule d'EDISON, mais à la différence que celle-ci possédait, en plus du filament, une plaque métallique servant d'électrode (figure 3.1). En chargeant la plaque positivement par rapport au filament, les électrons sont accélérés vers cette électrode, créant ainsi un courant électrique. Mais si cette plaque était légèrement négative par rapport au filament, elle repoussait les électrons, et aucun courant ne circulait. Étant donné que seul le filament était alimenté, les électrons ne peuvent circuler que du filament vers la plaque, et non l'inverse. Ce dispositif fut nommé diode. Le filament a alors pris le nom de cathode et la plaque métallique, celui d'anode. Cette dernière devint une des pierres angulaires de l'électronique, permettant notamment de faire du redressement de courant alternatif en courant continu.[13]

Deux ans plus tard, Lee DE FOREST, de la même manière que FLEMING, ajoute une autre électrode à l'ampoule d'EDISON (figure 3.2). La différence entre les deux est que celle-ci n'a pas une forme de plaque, mais de grille, positionnée entre le filament et la lame métallique. Ainsi, de manière analogue à la diode, si une différence de potentiel entre l'anode et

la cathode est appliquée, le courant passera uniquement si la tension de la grille est positive par rapport au filament. Si on module la tension de la grille, on module donc également le courant passant de la cathode à l'anode. Cette invention se révèle particulièrement pertinente pour l'époque car elle a permis de faire ce que le relais ne pouvait pas accomplir : amplifier des signaux analogiques complexes.

Par la suite, des améliorations ont été apportées à la conception des triodes et des diodes pour accroître leur efficacité. La grille et la plaque sont devenues des cylindres, disposés successivement de manière concentrique autour du filament. Actuellement, les triodes et diodes à vides ne sont quasiment plus utilisés en électronique. Ils ont été remplacés par les transistors et diodes à semi-conducteur (germanium, silicium, gallium), qui offrent une efficacité énergétique bien supérieure pour un coût et un encombrement réduit. [10]

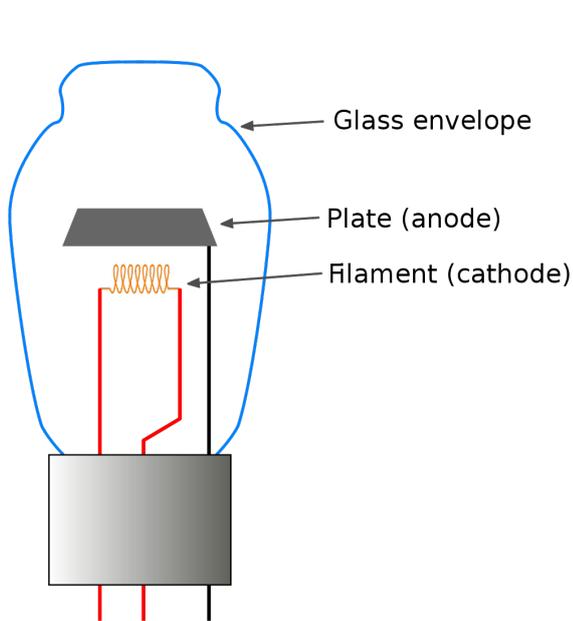


FIGURE 3.1 – Schéma d'une diode à vide.
Source [4]

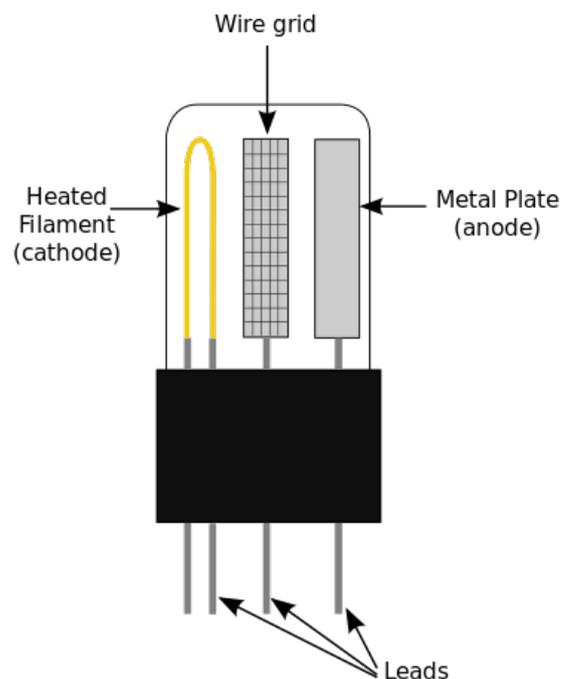


FIGURE 3.2 – Schéma d'une triode.
Source [8]

Dans notre amplificateur, nous utilisons des diodes à semi-conducteurs. Elles servent à redresser la tension fournie par l'alimentation, et sont donc indispensables au bon fonctionnement de l'amplificateur.

3.1.2 Les condensateurs

Un condensateur est un composant électronique passif utilisé pour stocker de l'énergie électrique sous forme de charges. Il est composé de deux plaques conductrices séparées par un matériau isolant (aussi appelé diélectrique). Comme vu en cours d'électromagnétisme, le fonctionnement d'un condensateur repose sur les principes de base de l'électrostatique.

Les principales caractéristiques d'un condensateur sont les suivantes :

- Sa capacité : elle est exprimée en farad (F) et détermine sa capacité à stocker une charge électrique. Elle dépend de la surface des plaques, de la distance qui les sépare et du matériau diélectrique utilisé.
- Son impédance en série équivalente : il s'agit de l'inductance et de la résistance interne d'un condensateur. Elle vient influencer ses performances, notamment à des

fréquences élevées.

Il existe de nombreux types de condensateurs différents, cependant ils peuvent être regroupés en deux familles distinctes :

- Les condensateurs polarisés : ils ont une polarité spécifique et doivent être connectés dans le bon sens, sous peine de destruction du composant. Les technologies de condensateurs polarisés sont les condensateurs électrolytiques ou au tantale.
- Les condensateurs non polarisés : par opposition au condensateurs polarisés, les condensateurs non polarisés peuvent être connectés dans n'importe quel sens. Les technologies de condensateurs qui ne sont pas polarisés sont les condensateurs céramiques, film et au mica.

En fonction du besoin, une technologie particulière est choisie afin de respecter certaines caractéristiques et/ou diminuer les coûts.[3]

Nous avons utilisé plusieurs types de condensateurs dans notre amplificateur. Leur rôle sera explicité dans la partie "Fonctionnement de l'amplificateur".

3.1.3 Les potentiomètres

Tout comme le condensateur, le potentiomètre est un composant passif. Il est également appelé résistance variable, car comme son nom l'indique, il s'agit uniquement d'une piste résistive sur laquelle se déplace un curseur. De cette manière, il se comporte comme un pont diviseur de tension, sur lequel il est possible de faire varier les résistances entre le curseur et les bornes en actionnant ce dernier. Par ailleurs, il est intéressant de noter que certains de nos potentiomètres ont une évolution logarithmique de leur résistance, et non linéaire. Cela est dû à la perception logarithmique du volume sonore par l'oreille humaine (au même titre que l'utilisation des décibels). Ainsi, le réglage du son semblera être linéaire pour l'utilisateur.[6]

3.2 Les différentes classes d'amplificateurs

Il existe plusieurs schémas génériques pour réaliser des étages d'amplification, ils sont répartis en ce que l'on appelle des "classes". Dans le domaine de l'audio, seulement certaines classes d'amplificateurs sont utilisées : A, B, AB et D (source [2] et [5]). Nous allons donc détailler leurs particularités afin d'expliquer le fonctionnement de notre amplificateur.

3.2.1 Classe A

Les amplificateurs de classe A sont les plus rudimentaires, mais aussi les plus fidèles. Ils emploient un transistor bipolaire qui se charge de l'intégralité de la modulation du signal. Une résistance de tirage est alors mise sur la broche de contrôle du transistor afin de le polariser et de forcer son fonctionnement dans sa région active. Cette dernière, contrairement à la région de saturation, entraîne des pertes significatives (chute de tension entre l'entrée et la sortie du transistor). De plus, le transistor fonctionne en permanence, même en l'absence de signal d'entrée (à cause de la résistance de tirage), augmentant d'autant plus les pertes énergétiques. Le rendement de cette classe est d'environ 25%. Pour des applications à forte puissance, il faudra prévoir des dispositifs de refroidissement pour dissiper les 75% restants de la puissance absorbée.

3.2.2 Classe B

La classe B est assez similaire à la classe A, à la différence qu'elle utilise deux transistors bipolaires (NPN et PNP) non polarisés (sans résistance de tirage) qui se chargent respecti-

vement de chaque moitié du signal (configuration push-pull). Grossièrement, un transistor sera responsable de pousser le haut-parleur vers l'avant, tandis que l'autre le tirera vers l'arrière, afin de restituer le signal. Chaque transistor fonctionne alors seulement pendant la moitié du cycle du signal. Cette configuration permet d'atteindre un meilleur rendement (environ 60 %), car les transistors ne conduisent pas en absence de signal. Cependant, ce montage introduit des distorsions liées au temps de commutation de chaque transistor. En effet, le passage de la région de coupure à la région active nécessite un certain délai. Celui-ci augmente d'autant plus que le signal à une amplitude faible.

3.2.3 Classe AB

L'amplificateur de classe AB, comme son nom l'indique, est un compromis entre les deux classes détaillées précédemment. Sa topologie diffère de la classe B uniquement par une polarisation des transistors faibles. Cette classe permet d'avoir un comportement similaire à la classe A pour les signaux de faible amplitude, et à l'inverse, un comportement similaire à la classe B pour les signaux à forte amplitude. On bénéficie alors du rendement de l'amplificateur de classe B, tout en limitant la distorsion harmonique pour les signaux à faible amplitude. Dans cette configuration, on peut espérer un rendement avoisinant les 50%.

3.2.4 Classe D

L'un des désavantages des classes mentionnées précédemment est leur rendement relativement faible, principalement lié à l'utilisation des transistors dans leur région active. La classe D vient alors proposer une alternative, en convertissant le signal analogique en un signal à modulation de largeur d'impulsions (MLI). A partir d'un signal d'échantillonnage triangulaire, le signal analogique est alors découpé (généralement à l'aide d'un comparateur), et l'amplitude du signal est alors restituée en longueur d'une impulsion. Une faible amplitude entraînera une courte impulsion et inversement pour une amplitude forte (voir figure 3.3).

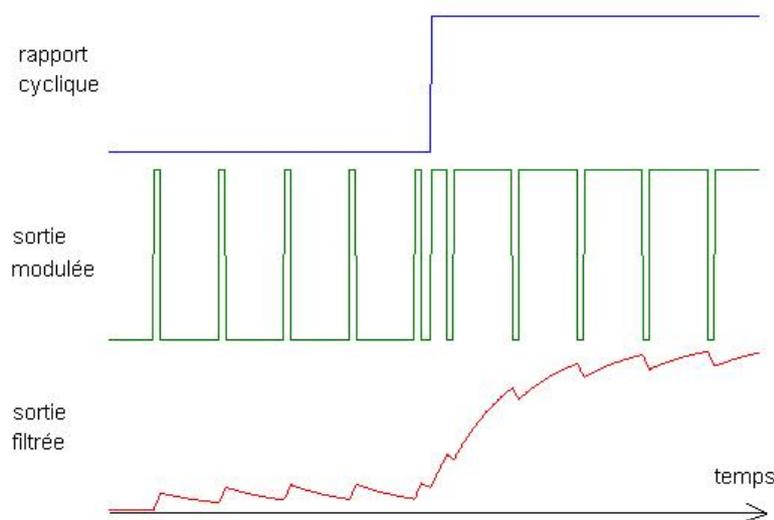


FIGURE 3.3 – Conversion d'un signal en un signal à modulation de largeur d'impulsion.

Avec un filtrage adéquat en sortie de l'amplificateur, on retrouve la forme amplifiée du signal initial. Cependant, la conversion du signal analogique en signal à MLI entraîne une

perte d'information. Dans le domaine de l'audio, cela est peu perceptible au vu des faibles fréquences des signaux d'entrée (au maximum de 20 kHz).

Cette technique permet ainsi d'exploiter les transistors d'amplification uniquement dans leur région de saturation ou de coupure, à la façon d'interrupteurs. Si on ajoute à cela le remplacement des transistors bipolaires par des transistors à effet de champ, ou MOSFET, qui sont plus adéquats pour ce genre de situation. Le rendement de ce type d'amplificateur peut alors approcher les 100%.

Cette classe d'amplificateurs et ses dérivées (classe H), sont les plus utilisées dans les appareils audio, car ils présentent beaucoup d'avantages et sont de nos jours peu coûteux à fabriquer grâce à l'apparition de puces intégrant toutes les fonctionnalités nécessaires à ce genre d'amplification.

3.3 Fonctionnement de l'amplificateur

Nous allons maintenant décrire le principe de fonctionnement général de notre amplificateur. Afin d'imager nos propos, nous avons créé un schéma fonctionnel de l'amplificateur (figure 8.2).

Tout d'abord, afin d'alimenter nos cartes d'amplification, l'amplificateur a besoin de deux tensions :

- 6,3 V alternatif : cette tension provient directement du transformateur primaire qui abaisse simplement celle du secteur. Elle servira ensuite au chauffage des filaments des triodes.
- 200 V continu : cette tension provient également du transformateur. Néanmoins, elle est d'abord convertie en courant continu par la carte d'alimentation avant d'être utilisée par les cartes d'amplification.

Le principe de fonctionnement de la carte d'alimentation est simple (voir figure 8.3). La tension alternative est d'abord redressée par un pont de diodes (4 diodes en série) afin d'obtenir une tension positive. Ensuite, la tension est stabilisée par des condensateurs électrolytiques car ils offrent une grande capacité et une tension nominale élevée. C'est important pour stabiliser de forts courants et de fortes tensions. Des petits condensateurs céramiques sont également présents sur la carte afin de filtrer le bruit présent sur le secteur. Il est en effet très important que cette tension soit stable et sans bruit, car elle sert ensuite pour l'amplification. L'alimentation est protégée par deux fusibles, permettant ainsi d'éviter des accidents en cas de court-circuits. Il ne sont cependant pas suffisants pour protéger l'amplificateur lui-même en cas de problème (le temps de coupure est trop long).

Par la suite, concernant la partie d'amplification (voir figure 8.4), le son provient des connecteurs d'entrée (prise jack et RCA) et passe par un premier filtrage effectué par des condensateurs céramiques, permettant d'éliminer dès le début toute composante continue (ajout volontaire de notre part, non prévu par le constructeur). Le signal est ensuite amené aux deux cartes d'amplification par des câbles blindés¹ afin d'éviter d'induire des bruits extérieurs dans le signal, qui est déjà de faible amplitude.

Une fois sur les cartes d'amplification, le signal va alors passer par trois étages d'amplification, ainsi que du filtrage, dans l'ordre suivant :

1. Un premier étage de classe A, permet d'amplifier le signal pour le filtrage avec un fort gain, mais à une faible puissance (pré-amplification).
2. Un étage de filtrage, qui est réglé par l'utilisateur avec les potentiomètres "bass" et "treble". On y retrouve des circuits passe-haut et passe-bas d'ordre 1 (RC) permettant

1. Câbles dont les fils de signaux sont entourés d'une feuille métallique connectée à la masse.

d'écarter les fréquences aux extrémités du spectre audio (de 0 à 20 kHz). Ce sont des condensateurs céramiques qui ont été utilisés car ils offrent une faible impédance en série et une grande précision. Cela est important pour avoir une réponse en fréquence élevée, et donc éviter les distorsions du signal.

3. Un second étage d'amplification de classe AB permet de ré-amplifier le signal (qui a perdu du gain dans le filtrage) de manière différentielle. C'est à dire qu'une partie du signal est inversée par rapport à l'autre. Cela sera utile au dernier étage d'amplification.
4. Un dernier étage de classe AB amplifie toujours le signal de manière différentielle. Ce dernier permet avant tout d'alimenter les haut-parleurs en puissance (gain moyen, mais forte puissance).

Une fois l'étape d'amplification effectuée, le signal passe par les transformateurs de sortie (gauche et droite). Ils permettent d'abaisser la tension de sortie des cartes amplificatrices (305 volts au minimum avec la composante continue). Il y a également une rétro-action à la sortie du transformateur vers les cartes d'amplification qui fait varier la polarisation du deuxième étage d'amplification. Cela permet d'éviter une saturation prématurée du signal. Celui-ci est restitué au niveau des différents connecteurs et borniers de sortie de l'amplificateur.

Tâches réalisées

Dans ce chapitre, nous allons vous présenter le travail que nous avons réalisé durant ce projet. Deux groupes y travaillaient, nous avons donc divisé les tâches à accomplir en deux grandes parties : la simulation et les calculs théoriques, ainsi que le montage de l'amplificateur audio à lampes.

L'amplificateur que nous devons monter est constitué de plusieurs cartes électroniques, de dizaines de composants ainsi que de câbles. Afin d'éviter les pertes de temps et de limiter les éventuelles erreurs, il était nécessaire d'effectuer le montage de l'amplificateur dans un certain ordre.

4.1 Soudure des composants sur les cartes

Pour commencer, nous avons trié les composants électroniques en fonction de leurs valeurs et de leurs emplacements sur les différentes cartes électroniques ou le châssis. Nous avons utilisé du ruban adhésif pour les maintenir sur une feuille, sur laquelle était inscrite la nomenclature des composants, ainsi que leur valeur associée.

Comme la plupart des personnes du groupe étaient novices en brasage à l'étain, nous avons suivi une courte formation auprès de Pascal WILLIAMS, le responsable du laboratoire physique, qui nous a accompagnés tout au long du projet. La brasure (communément appelée soudure) consiste à connecter les composants sur les cartes et/ou fils à l'aide d'un métal d'apport (ici de l'étain). Une fois fondu (entre 200°C et 400°C), puis déposé sur une piste traversé par un composant, il assurera le maintien mécanique et la connexion électrique de ce dernier.

En général, la soudure se faisait uniquement au verso du circuit imprimé, le recto étant occupé par les composants. Cependant, comme certains d'entre eux subissaient de forts courants, nous avons également dû les souder au recto. Une fois le composant soudé, on devait alors couper les pâtes métalliques au bord de la soudure (à 1-2 mm du circuit imprimé). Certains composants n'étant pas évidents à positionner (généralement ceux possédant beaucoup de broches), la soudure se faisait alors en deux parties : on soude d'abord une broche pour positionner le composant, puis une fois le placement vérifié et éventuellement corrigé, on soude le reste des broches.

Des erreurs ont parfois été commises : mauvais composant, sens inversé, etc. Pour les corriger, il fallait alors dessouder le composant concerné. Pour ce faire nous avons utilisé une pompe à dessouder. Le principe de cet outil consiste à aspirer l'étain (fondu) par succion. Par ailleurs, nous devons également faire attention aux soudures sèches, résultant généralement d'un manque d'étain ou de temps de chauffe. Ces dernières n'assurent pas une connexion électrique correcte avec le composant, ajoutant une résistance parasite. C'est une problématique dans les cas de faibles tensions et/ou de courants forts. L'apparence de ces dernières est reconnaissable par leur aspect granuleux, leur manque de brillance et d'éventuelles fissures.

La soudure des composants se faisait des plus petits (par exemple les résistances ou les condensateurs céramiques) aux plus grands composants (par exemple les condensateurs électrolytiques ou encore les connecteurs des lampes). Ainsi, le recouvrement de certains

composants par d'autres ne présentait pas de problèmes pour la soudure. Pour savoir où était placé chaque composant, nous avons à notre disposition des plans, fournis par le fabricant (voir figure 8.5).

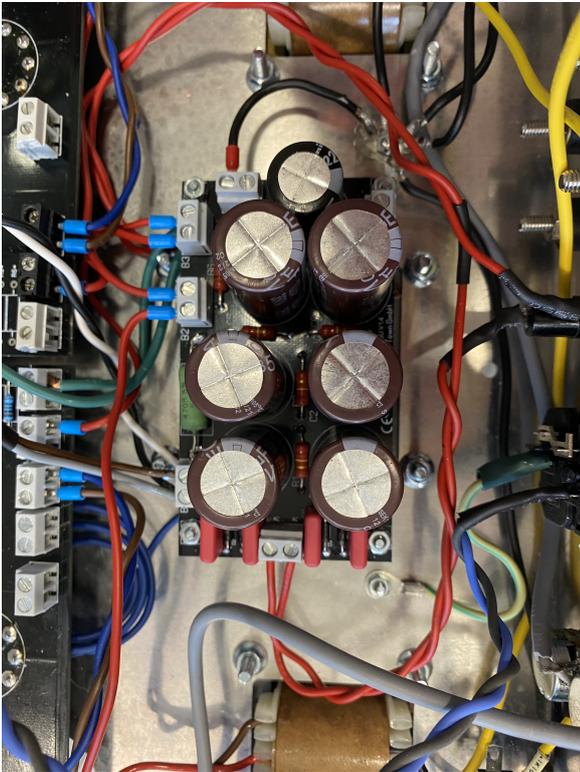


FIGURE 4.1 – Photographie de la carte d'alimentation

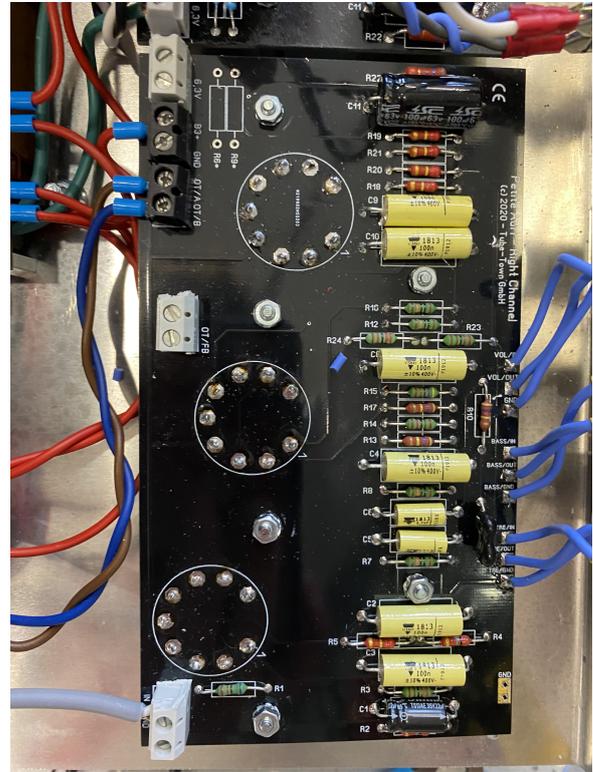


FIGURE 4.2 – Photographie d'une des deux cartes d'amplification

4.2 Montage

Une fois la soudure des cartes effectuée, nous avons procédé au montage de tous les composants sur le châssis de l'amplificateur. Nous avons opéré dans l'ordre suivant, qui nous semblait être le plus simple et le plus efficace (voir figure 8.5) :

1. Transformateurs
2. Carte d'alimentation
3. Cartes d'amplification
4. Connecteurs
5. Potentiomètres

4.3 Câblage

Le câblage de l'amplificateur n'était pas la tâche la plus simple de ce projet. En effet, l'encombrement des différents composants dans le châssis ne nous laissait qu'une marge de manoeuvre limitée pour souder et les câbler entre eux. Si on ajoute à cela la fragilité des composants ainsi que le placement complexe des broches de certains composants, il fallait alors opérer avec une minutie et précision.

Ainsi, nous avons procédé dans l'ordre suivant pour le câblage (voir figure 8.5) :

1. Secteur (connecteur, interrupteur, mise à la terre et fusible) vers le transformateur primaire.
2. Transformateur primaire vers la carte d'alimentation (fusible) et les cartes d'amplification (6,3 V CA).
3. Carte d'alimentation vers les cartes d'amplification (200 V CC).
4. Connecteurs d'entrée (avec condensateurs de filtrage) vers les potentiomètres de volume.
5. Potentiomètres de volume vers les cartes d'amplification
6. Mise à la masse (sur la masse en étoile).
7. Potentiomètres de filtrage.
8. Cartes d'amplification vers les transformateurs de sortie.
9. Transformateurs de sortie vers les connecteurs de sortie.

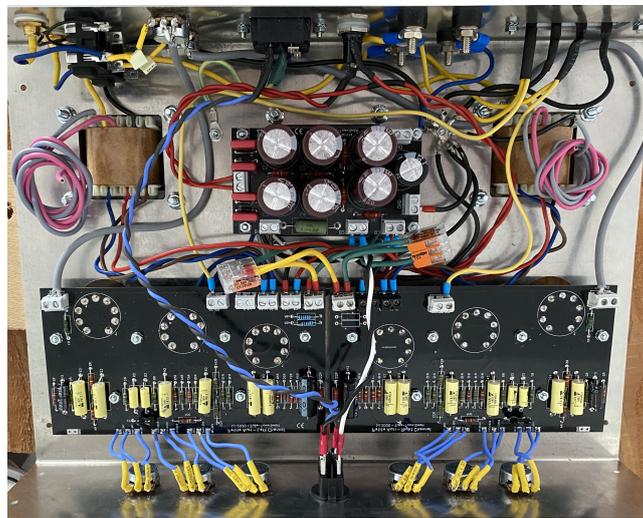


FIGURE 4.3 – Photographie de l'amplificateur une fois le câblage terminé.

4.4 Particularités remarquées lors du montage

Que ce soit sur la fonction d'un composant ou simplement sur une incohérence entre le plan et la réalité, nous avons été amenés à nous poser de nombreuses questions lors du montage de l'amplificateur.

4.4.1 Masse en étoile

Un détail dans le plan de l'amplificateur qui a attiré notre attention est le "starground", en français : la masse en étoile. Cette dernière est reliée au châssis de l'appareil par une vis (au même titre que la terre, figure 4.4). D'après l'expérience personnelle de certains membres du groupe, et confirmation par des recherches internet, nous avons pu arriver à une explication pour cette particularité.

En effet, les amplificateurs transportent des signaux analogiques (parfois de faible tension) très sensibles au bruit. Or, lorsque l'on se met à faire des boucles de masses, des courants de masses apparaissent à cause des différents potentiels créés par les résistances internes, bien que faibles, des fils reliant les points de masse. Ces courants de masse peuvent alors provoquer du bruit dans les alimentations et le transport des signaux.

C'est un problème très présent dans le monde de l'audio, car c'est un phénomène directement perceptible à l'écoute. Pour pallier à cette difficulté, il est recommandé de faire en sorte que les masses de chacun des composants soient reliées directement à une seule et même masse, formant ainsi une étoile. De cette manière, on évite de créer malencontreusement des boucles de masses. Néanmoins, ce problème peut persister lorsque l'on connecte d'autres appareils à l'amplificateur, car une boucle de masse peut se créer par l'intermédiaire des différentes masses partagées et l'alimentation secteur. [9]



FIGURE 4.4 – Photo de la masse en étoile.

4.4.2 Problèmes rencontrés

Malgré les informations que le plan contenait, plusieurs ambiguïtés étaient présentes, il y avait parfois même une absence totale d'indications. Cela nous a conduit à devoir prendre des initiatives et à trouver diverses solutions pour résoudre les problèmes rencontrés.

L'un des premiers problèmes concerne la façon dont il fallait connecter les câbles aux composants. Évidemment, il faut assurer un câblage sûr et encastré dans ces derniers. Nous rencontrons cependant un problème lié à l'espace disponible dans les borniers des cartes électroniques où se positionnent les câbles. Effectivement, ceux dont nous disposions étaient des câbles relativement fins, et donc impossibles à insérer dans les trous dédiés en assurant un encastrement rigide.

Pour y remédier, nous nous sommes munis de cosses que nous avons placées sur les extrémités des fils à l'aide de pinces à sertir. De cette manière, les câbles étaient bien insérés dans les composants et ne risquaient pas de se détacher. Cependant, les cosses dont nous disposions n'étaient pas compatibles avec tous les composants, notamment les potentiomètres et les entrées/sorties de l'amplificateur. Cela nous a obligé à souder les câbles directement sur les bornes femelles de ces composants. Par souci de sécurité, nous avons placé de la gaine thermique à l'emplacement des soudures.

Nous avons rencontré un autre problème lors de la fixation des potentiomètres à la structure de l'amplificateur. Ceux-ci possédaient un surplus de matière permettant normalement de les fixer dans une position particulière grâce à un emplacement prévu à cet effet. Néanmoins, la structure ne possédait pas d'encoches dédiées au bon positionnement des potentiomètres. Nous avons tout d'abord pensé à limer cet excédent de matière, mais nous nous sommes vite rendu compte que cela prenait beaucoup de temps, la surface à limer étant difficilement accessible. Finalement, nous avons décidé de le retirer en utilisant simplement une pince coupante.

Simulation et tests

5.1 Simulation et résultats théoriques

La partie simulation et calcul théorique a été réalisée par le groupe 1 (saison 1) du projet. Nous n'allons donc en faire qu'un court résumé ici.

L'objectif était donc de faire une simulation de l'amplificateur sur LTSpice, un logiciel de simulation de circuits électroniques. Cette simulation a permis de déterminer le gain de l'amplificateur et de trouver la tension maximale d'entrée avant saturation de l'amplificateur. Cela nous a également permis de comparer lors des tests, les tensions mesurées en différents points afin d'identifier d'éventuels dysfonctionnements ainsi que leur localisation.

Les membres du premier groupe ont donc reproduit le plan électrique du circuit d'amplification (figure 8.4) sur le logiciel.

Cela leur a permis de faire des analyses sur les signaux d'entrée et de sortie. Grâce à une analyse transitoire¹ et à une analyse séquentielle², ils sont arrivés à la conclusion que le gain de l'amplificateur était de 39 dB. De plus, la tension maximale que l'on peut mettre en entrée, sans s'attendre à une saturation du signal de sortie, est de 175 mV pour une fréquence de 1000 Hz.

5.2 Tests et mesures

Une fois l'assemblage de l'amplificateur terminé, nous avons procédé à des tests sur chaque partie de l'amplificateur.

Tout d'abord, nous avons réalisé le test de la carte d'alimentation à vide en mesurant les différentes tensions qu'elle est supposée produire (tableau 5.1). Ces tensions ont été mesurées au multimètre, il s'agit donc de la tension efficace. Nous les avons ensuite comparées avec celles indiquées sur le plan. Par ailleurs, ce dernier indique que l'intervalle de tolérance est de $\pm 10\%$ (figure 8.4). Nous avons ensuite alimenté successivement les cartes d'amplification, d'abord sans les triodes, afin de vérifier qu'aucune surchauffe n'avait lieu et pour vérifier certaines tensions. Bien évidemment une partie des tensions à vide (sans les tubes) était en dehors de l'intervalle de tolérance. Cependant, cela n'était pas problématique tant que les tensions restaient raisonnablement éloignées des tensions de référence (jugement effectué de manière subjective). En effet, les tensions indiquées sur le plan étaient celles en charge et, de manière générale, il n'est pas rare que les tensions à vide d'un appareil électronique soient plus élevées que dans la théorie.

Une fois que nous étions assurés que les tensions d'alimentation étaient correctes, nous avons injecté un signal sinusoïdal (50 mV crête-crête / 1 kHz) dans les deux entrées (gauche et droite) à l'aide de deux générateurs basse fréquence. Par la suite, nous avons procédé à des mesures de tension crête à crête grâce à l'oscilloscope entre chaque étage d'amplification et de filtrage (tableau 5.2). Nous avons parfois dû avoir recours à une atténuation de 10 :1 (réduction de la tension par un facteur 10) avec la sonde de l'oscilloscope car la tension était

1. Analyse où le signal d'entrée n'est pas constant, on fait varier ses différents paramètres [7]

2. Analyse où les données sont étudiées au fur et à mesure, elle s'arrête quand une condition est remplie

[1]

Emplacement		Valeurs mesurées (V)		Valeurs théoriques (V)	Delta	
Composant	Broche	Gauche	Droit		Gauche	Droit
Carte d'alimentation	B1	334,000	334,000	-	-	-
Carte d'amplification	B3	306,700	306,700	303,000	1,22 %	1,22 %
Transformateur secondaire	B2	311,600	311,600	308,000	1,17 %	1,17 %
EF86	Broche 1	122,600	114,500	100,000	22,60 %	14,50 %
	Broche 3	2,300	2,390	2,500	-8,00 %	-4,40 %
	Broche 6	115,200	108,600	99,000	16,36 %	9,70 %
ECC83	Broche 1	238,000	236,700	230,000	3,48 %	2,91 %
	Broche 6	246,000	244,000	230,000	6,96 %	6,09 %
	Broches 3 et 8	63,800	65,700	68,000	-6,18 %	-3,38 %
ECC99	Broche 1	310,000	310,700	305,000	1,64 %	1,87 %
	Broche 6	310,000	310,700	305,000	1,64 %	1,87 %
	Broches 3 et 8	11,190	11,760	11,000	1,73 %	1,73 %

TABLE 5.1 – Tableau des tensions mesurées sur les points d'alimentation.

trop élevée pour être mesurée. Nous les avons donc comparé avec celles simulées. Cela nous a permis de détecter certains problèmes, notamment une lampe défectueuse et un mauvais câblage. Comme on peut le remarquer, les tensions ne correspondent pas avec celles de la simulation. Cependant, elles suivent une évolution logique par rapport au plan électrique. Cela est probablement dû à l'utilisation de composants légèrement différents dans la partie simulation, notamment concernant les triodes. Effectivement, les ECC99 et ECC83 ont été remplacé par un 12AX7. De plus, les triodes sont des pièces relativement fragiles et sensibles aux décharges électrostatiques (pouvant être induites par les mains). Elles ont pu être endommagées lors de leur transport, manipulation ou même en sortie d'usine. N'ayant plus assez de temps à notre disposition, nous n'avons pas pu approfondir nos recherches pour trouver une solution à ce problème. Il aurait tout de même été intéressant d'avoir des résultats corrélés entre la simulation et les mesures.

Emplacement		Valeurs mesurées (V)		Valeurs simulation (V)	Delta	
Composant	Broche	Gauche	Droit		Gauche	Droit
Entrée		0,05	0,05	0,05	0,00 %	0,00 %
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 %

TABLE 5.2 – Tableau des tensions mesurées à différents étages d'amplification.

5.3 Tests qualitatifs

En dehors des mesures, nous avons aussi effectué des tests audio sur l'amplificateur en utilisant comme entrée une platine vinyle et par la suite, une guitare et une basse électriques. Bien que nous ne soyons pas des mélomanes confirmés nous avons remarqué plusieurs caractéristiques propres à cet amplificateur.

Concernant la sonorité aux tests avec les instruments, nos musiciens ont ressenti une réelle différence par rapport aux amplificateurs à modélisations (amplificateurs qui transforment le signal analogique en signal numérique avant de l'amplifier) qu'il utilisent régulièrement. Le son paraît plus vivant, avec quelques imperfections, mais c'est ce qui lui donne cette couleur si unique et agréable à l'oreille. Il faut tout de même préciser que nous n'avons pas monté un amplificateur spécifié pour la guitare, mais un amplificateur audio plus général. Effectivement, les amplificateurs de guitare sont spécialisés dans le spectre audio de la guitare, ce qui n'est pas le cas ici.

Les amplificateurs à tube sont connus pour produire une certaine distorsion harmonique. En effet, le son semble être légèrement plus chaleureux (vintage) comparé à d'autres appareils (enceinte bluetooth, chaîne Hi-Fi, etc). Bien que cette déformation du son puisse être considéré comme un défaut de manière factuelle, c'est en général apprécié de l'oreille humaine et cela fait la particularité de cet amplificateur.

Finalement, les amplificateurs de classe AB offrent généralement un contrôle précis et une réponse dynamique rapide, ce qui est apprécié pour la reproduction audio fidèle. En effet, nous avons monté des potentiomètres sur l'amplificateur permettant de contrôler sur le son. Ceux-ci permettent de gérer les taux d'aigus et de graves, ainsi que le volume sur les parties droite et gauche de l'amplificateur.

Conclusion

6.1 Apports personnels du projet

6.1.1 Etienne

J'ai découvert grâce à ce projet le derrière des coulisses, comme on pourrait l'appeler, des musiques dites actuelles (ayant recours à des amplificateurs). Je suis effectivement passionné de musique, que ce soit simplement pour en écouter ou derrière mon kit de batterie. Le montage de cet amplificateur audio à lampes m'a donc appris le fondement de ce que j'écoute depuis maintenant des années. De plus, le travail de groupe demande également un développement certain de ses capacités de communication et d'organisation. Finalement, question pratique, j'ai appris à utiliser le brasage à l'étain ainsi que les étapes à mettre en œuvre pour arriver à la fabrication d'un système électronique complexe fonctionnel. De plus, n'ayant aucune connaissance en LaTeX, l'écriture de ce rapport m'a beaucoup apporté dans ce domaine.

6.1.2 Manuel

En tant que guitariste, ce projet me tenait tout particulièrement à cœur. En effet, j'ai passé plusieurs centaines d'heures à jouer sur mon propre amplificateur. J'ai donc beaucoup aimé avoir une idée de comment sont construites ces fabuleuses machines. Ce projet m'a aussi apporté beaucoup dans plusieurs domaines. En effet, j'ai pu acquérir des connaissances en électronique et en acoustique (sur l'analyse du son notamment). J'ai aussi travaillé sur des compétences très pratiques comme la soudure et le travail en équipe. Enfin, j'ai aussi pu expérimenter le travail sur un projet scientifique, avec les rapports, l'organisation et les réunions qui vont avec. Ce fut très instructif et enrichissant, et je remercie tous les membres de mon groupe pour avoir fait cela avec moi. Bravo à nous !

6.1.3 Alix

Je suis personnellement passionné d'informatique et d'électronique. J'ai déjà eu affaire à des amplificateurs (audio ou plus généralement de signaux) pour différents projets personnels. Ainsi, le principe de fonctionnement d'un amplificateur n'était pas nouveau pour moi. Cependant, l'utilisation de triodes l'était. En effet, je ne connaissais cette technologie que de nom. Lors de ce projet, j'ai ainsi pu découvrir l'histoire de la triode, ainsi que le cheminement qu'il a ensuite fallu pour arriver au transistor à semi-conducteur. Par ailleurs, c'est la première fois que l'on pratique de l'électronique de manière concrète à l'INSA. Ce projet m'a ainsi permis de gagner en rigueur. Il m'a également apporté des connaissances dans le domaine de l'électronique, sur des sujets que je maîtrisais mal auparavant à cause d'incompréhensions. Finalement, je peux dire que ce projet a été très intéressant pour moi, aussi bien en terme d'apprentissage que d'intérêt personnel.

6.1.4 Mohamad

Cela fait maintenant longtemps que je suis fasciné et intrigué par le fonctionnement d'un amplificateur audio. En effet, je manipule régulièrement de tels amplificateurs depuis que j'ai commencé à jouer de la basse électrique. Le problème était que, à chaque fois qu'un amplificateur ne fonctionnait plus, je me mettais à le démonter et à l'examiner sans même savoir à quoi j'avais affaire. Ceci dégradait bien évidemment encore plus l'amplificateur, le rendant donc bon à jeter. Ce projet m'a permis de comprendre le fonctionnement d'un amplificateur ainsi que le but de chaque composant, ce qui me sera bien pratique pour le futur. De plus, le travail manuel d'assemblage était très intéressant et rempli de défis tout au long du projet, ce qui nous a poussé à mettre en avant nos compétences de travail en groupe et de résolution de problèmes.

6.2 Conclusions et perspectives

L'intérêt du projet résidait dans la construction d'un amplificateur audio à lampes, cela dans l'objectif de ne pas briser la "chaîne" du signal analogique. En effet, de l'enregistrement jusqu'à la restitution, en passant par l'amplification, le signal n'a subi aucune conversion. En comparaison, les amplificateurs présents dans les équipements domestiques (classes D et H) utilisent massivement l'échantillonnage afin d'optimiser le rendement de l'amplificateur et son coût de fabrication.

Concernant les aptitudes que le projet nous a permis de développer, que ce soit sur le plan organisationnel ou sur celui de nos capacités, le projet P6 nous a permis de grandir. Comme nous l'expliquions au début de ce rapport, notre choix s'était porté initialement sur ce projet pour son côté expérimental. Effectivement, il nous a permis de mettre en pratique nos cours sur l'électrocinétique (P3) et l'électromagnétique (P5). Nous avons donc appris à braser, suivre un plan complexe et parfois improviser pour mener à bien ce projet.

D'autre part, l'expérience d'un projet de groupe est toujours extrêmement enrichissante. En effet, il a fallu s'organiser et effectuer une répartition correcte des tâches pour pouvoir avancer efficacement. Seulement, une bonne distribution des opérations n'est pas suffisante. Il faut aussi (peut-être même surtout) une capacité de communication très développée avec les autres membres du groupe. Heureusement, nous nous connaissions pour la plupart d'entre nous et n'avons rencontré aucun problème à ce niveau là. Les seules difficultés auxquelles nous avons dû faire face lors du montage de l'amplificateur ont justement été surmontées en mettant en commun nos connaissances et notre créativité.

Finalement, nous sommes arrivés à monter un amplificateur audio à lampes fonctionnel à partir des composants de base de l'électronique. L'aboutissement de ce projet a été très gratifiant, et cela pour chacun de nous.

Pour aller plus loin dans ce projet, nous aurions aimé avoir le temps et les moyens nécessaires pour pouvoir fabriquer un amplificateur de classe D. Effectivement, dans un souci de conscience écologique, réaliser un outil qui possède des performances similaires, pour un rendement énergétique proche de 100% au lieu de 78,5% est bien plus intéressant.

Bien que les triodes offrent une signature musicale particulière et un timbre unique au son, nous aurions aussi pu réaliser le montage de l'amplificateur avec des transistors. Effectivement, ceux-ci sont plus simples d'utilisation que des lampes et bien moins coûteux. Ce sont des critères que nous prendrions en compte si nous étions amenés à réaliser un amplificateur de classe D dans le futur.

Bibliographie

Articles

- [1] *Analyse séquentielle*. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_s%C3%A9quentielle. (consulté le 15/06/2023).
- [2] *Classes de fonctionnement d'un amplificateur électronique*. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Classes_de_fonctionnement_d'un_amplificateur_%C3%A9lectronique. (consulté le 11/06/2023).
- [3] *Condensateur*. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Condensateur>. (consulté le 08/06/2023).
- [6] *Potentiomètre*. URL : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiom%C3%A8tre>. (consulté le 08/06/2023).
- [7] *Régime transitoire*. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gime_transitoire. (consulté le 15/06/2023).
- [9] Cadence PCB SOLUTIONS. *What Is a Star Ground Layout and Why Do You Need It?* 2020. URL : <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-what-is-a-star-ground-layout-and-why-do-you-need-it>. (consulté le 07/06/2023).
- [10] *Triode*. URL : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Triode_\(%C3%A9lectronique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Triode_(%C3%A9lectronique)). (consulté le 11/06/2023).

Figures

- [4] Walter DVORAK. *Schéma de diode à vide*. 2010. URL : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diode_vacuum_tube.svg. (consulté le 11/06/2023).
- [8] RIFLEMANN. *Schéma de triode*. 2007. URL : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Triode.svg?uselang=fr>. (consulté le 10/06/2023).
- [11] *TT Petite Auri Layout*. 2020. URL : https://www.tube-town.net/cms/userfiles/downloads/tt-petita_lay.pdf. (consulté le 07/06/2023).
- [12] *TT Petite Auri PSU*. 2020. URL : https://www.tube-town.net/cms/userfiles/downloads/tt-petita_schem.pdf. (consulté le 07/06/2023).

Videos

- [5] Incroyables EXPÉRIENCES. *TOUT savoir sur les amplificateurs audio!* URL : https://www.youtube.com/watch?v=bRGRYZX_AT4. (consulté le 11/06/2023).
- [13] VERITASIAM. *Why The First Computers Were Made Out Of Light Bulbs*. 2023. URL : https://www.youtube.com/watch?v=FU_YFpFdqqA. (consulté le 07/06/2023).

Annexes

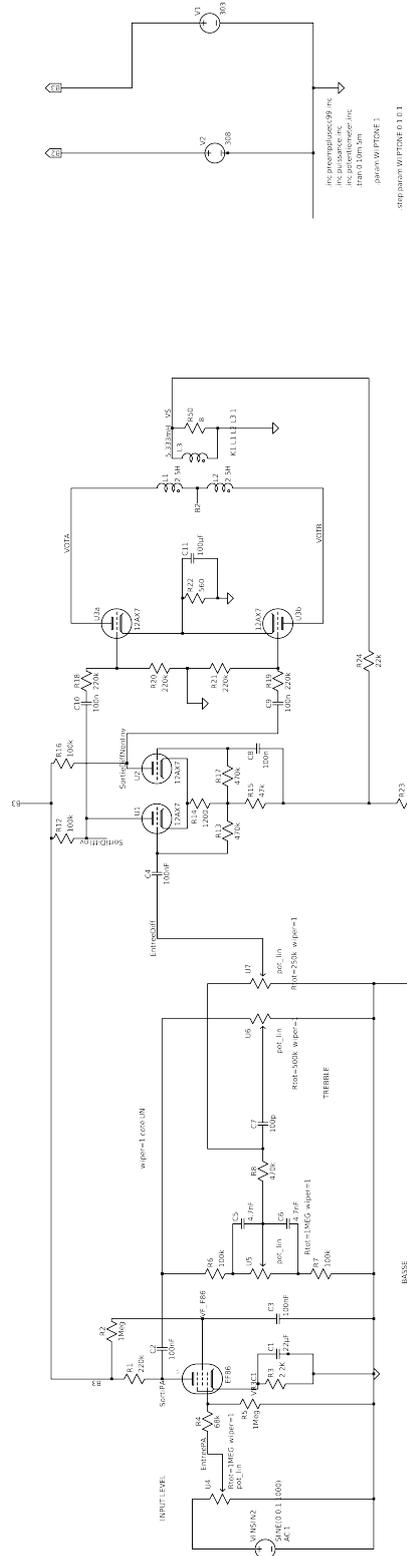


FIGURE 8.1 – Schéma complet de l'amplificateur sur LTSpice.

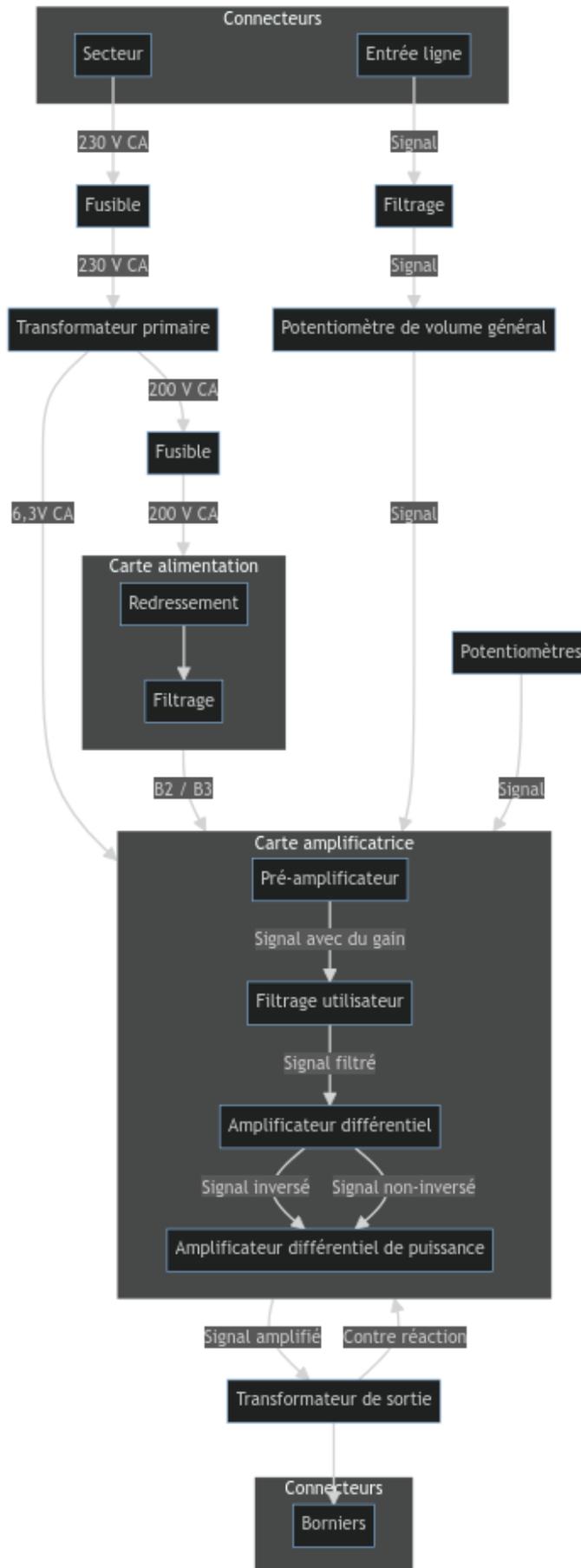


FIGURE 8.2 – Schéma du principe de fonctionnement de l'amplificateur (un seule côté d'amplification).

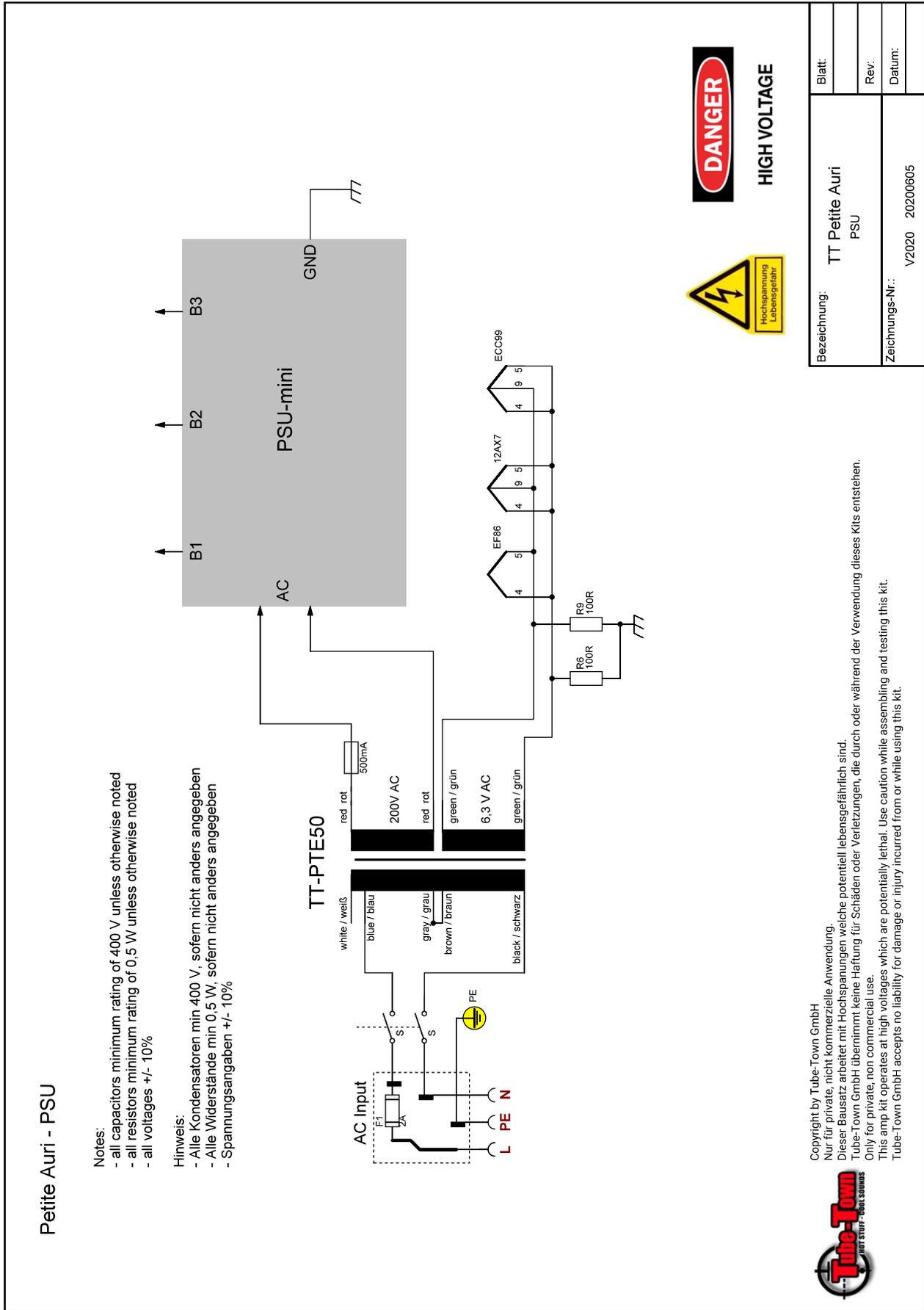


FIGURE 8.3 – Plan électrique de l'alimentation. Source [12]

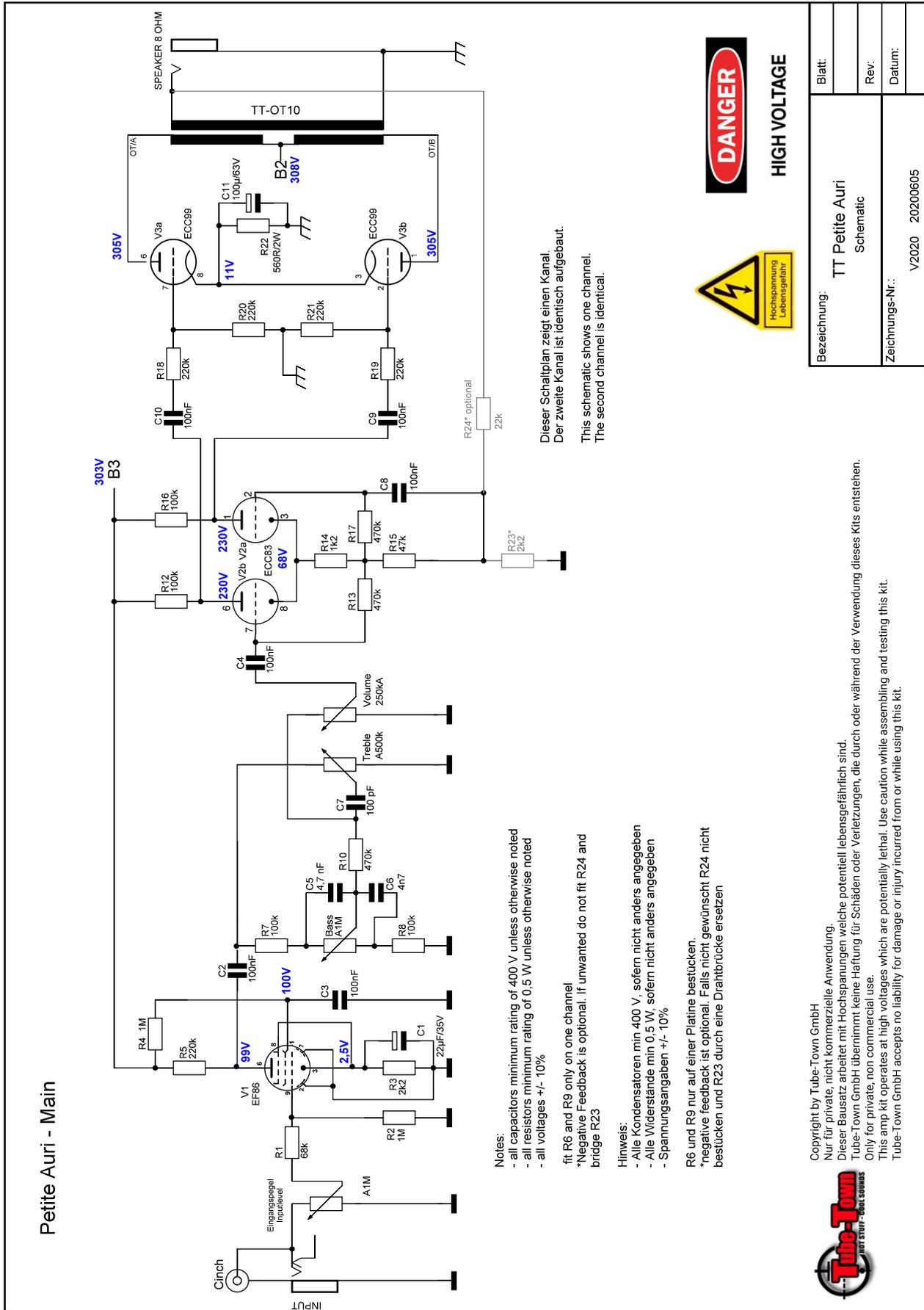
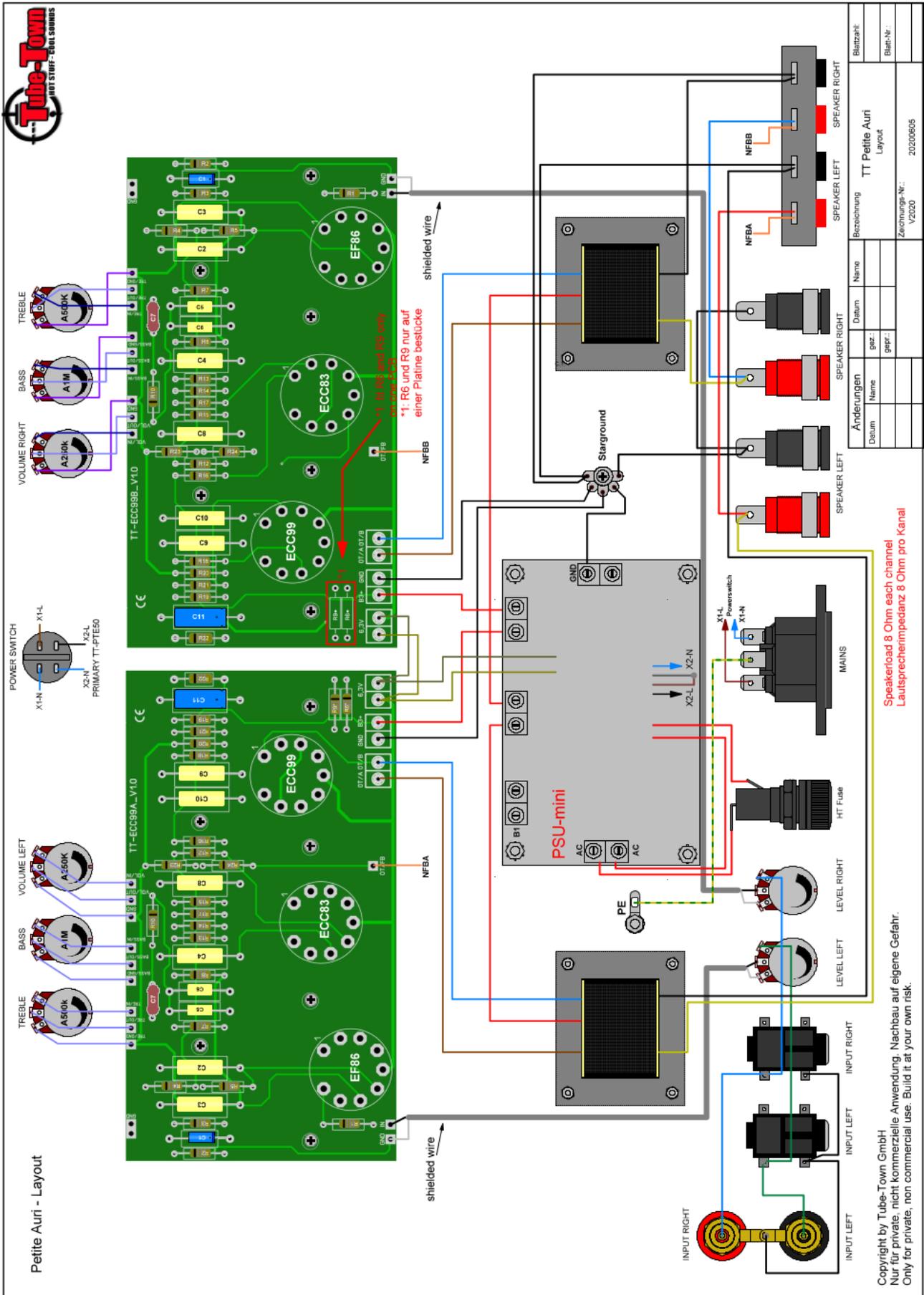


FIGURE 8.4 – Plan électrique d’une carte d’amplification. Source [12]



Änderungen		Name		Datum		Bezeichnung		Blattzahl:	
Datum	gez.	Datum	gez.	Datum	gez.	Datum	gez.	Datum	gez.

Änderungen		Name		Datum		Bezeichnung		Blattzahl:	
Datum	gez.	Datum	gez.	Datum	gez.	Datum	gez.	Datum	gez.

FIGURE 8.5 – Plan général de l’amplificateur. Attention au transformateur primaire qui est masqué par la carte d’alimentation. Source [11]