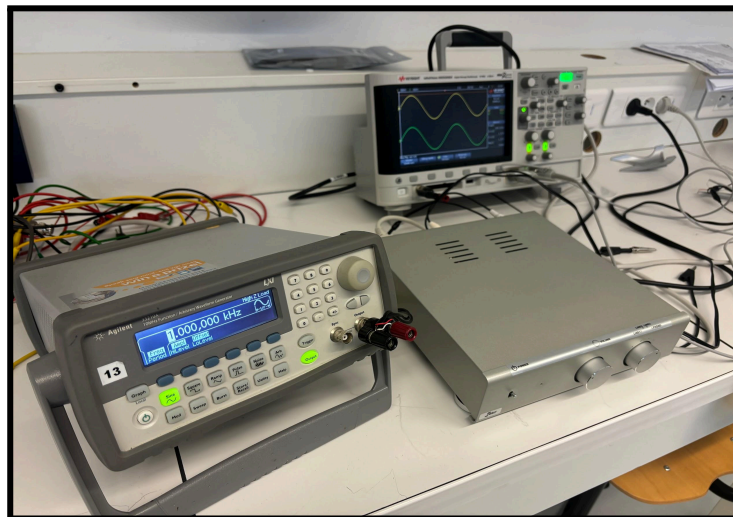


Projet de Physique P6
STPI/P6/2023-24

**Préampli à lampes et correcteur RIAA -
Simulation**



Etudiants :

Camille DAVRINCHE

Colin PUECH

Titouan DARRIGAN

Enseignant-responsable du projet :

Richard GRISEL

Date de remise du rapport : **14/06/2024**

Référence du projet : **STPI/P6/2023 – 2024**

Intitulé du projet : **Préamplificateur à lampes et correcteur RIAA - Simulation**

Type de projet : **simulation**

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

Ce projet consiste à étudier un modèle de préamplificateur à lampes par simulation numérique afin de comprendre le fonctionnement et le rôle de chaque partie qui le compose. De plus, ce projet nous permettra de comprendre le principe de l'égalisation RIAA, dans l'optique de l'amplification d'un signal audio provenant d'une platine vinyle.

Mots-clefs du projet (4 maxi) : **Electricité, Musique, simulation et Analyse**

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	6
1.1. Méthodologie	7
1.2. Caractéristique d'un Amplificateur	8
2. Études séparées de chaque étage	9
2.1. Réalisation du correcteur RIAA	9
2.2. Réalisation de l'anode commune	11
2.3. Réalisation de la cathode commune	13
3. Etude du montage anode-cathode	16
4. Montage final : étude des modes MM et MC	19
5. Comparaison simulation et montage réel	23
6. Conclusion	24
7. Annexes	25
8. Bibliographie à mettre à jour et donner les détails:	26

Remerciements :

Nous remercions notre professeur encadrant Richard Grisel pour nous avoir proposé ce sujet de projet ainsi que pour son accompagnement tout au long du projet, qui nous a permis de développer nos connaissances en électricité, ainsi que nos compétences à la fois dans ce domaine et en analyse numérique. Il a été à notre écoute et a su répondre à toutes nos questions pour nous permettre de mieux comprendre le projet ou pour nous aider lorsque nous rencontrons des problèmes.

Nous souhaitons également remercier toute l'équipe du service électronique et plus particulièrement Pascal Williams et Michael Jolly qui ont permis la mise en place du projet, notamment pour ce qui est de la partie réalisation.

Nous remercions l'INSA pour nous avoir donné l'opportunité de choisir parmi de nombreux projets et de travailler sur des sujets très intéressants.

Enfin nous remercions nos camarades du groupe s'occupant de la partie réalisation avec lesquels nous avons pu échanger tout au long du projet et travailler dans d'excellentes conditions.

Préampli à lampe et correcteur RIAA

1. Introduction

Le projet physique de P6 consiste à étudier en groupe un sujet proposé par un enseignant. Le sujet que nous avons choisi est étroitement lié à la conception et modélisation et s'intitule : Préampli à lampe et correcteur RIAA.

La mode du rétro a participé à créer une croissance significative des ventes de vinyle en France, avec un taux annuel moyen de ce marché estimé à 9 %. Cependant si vous faites tourner votre vinyle, seul, sans chaîne HI-FI, vous entendrez de manière presque imperceptible votre musique venant de la cellule phono. Pour rendre possible l'écoute de musique sur un vinyle, il est important d'être équipé d'un préamplificateur RIAA. C'est un appareil qui transforme le signal venant de la cellule phono en signal électrique qui sera traité par la suite par l'ampli et joué par les enceintes. C'est donc pour traiter cette courbe que les audiophiles ont besoin de ce préampli phono, afin d'obtenir en sortie un signal avec une courbe d'égalisation neutre. Cette courbe est essentielle pour permettre un stockage plus important d'information sur un disque.

La partie correcteur RIAA du préamplificateur phono joue un rôle crucial dans ce dispositif puisqu'elle assure la restitution sonore provenant du vinyle.

Cependant, l'union du préamplificateur et du correcteur RIAA représente un enjeu important en termes de simulation et de conception. Les préamplificateurs en raison de leur nature analogique nécessitent une modélisation précise pour capturer les nuances et le comportement sonore. Comment alors concevoir efficacement un tel modèle, en tenant compte de ces précision sonores et de la fidélité de la réponse en fréquence ?

Ce rapport a pour objectif de comprendre le fonctionnement, les défis technique, mais aussi de proposer une simulation à partir du modèle de préampli TU-8500, en l'analysant dans un premier temps, dans l'objectif de séparer les principaux composants de l'appareil pour les analysés individuellement, mais aussi d'assurer une répartition équitable des tâches. Puis reproduire ce modèle numériquement à l'aide de logiciel de modélisation comme LTSPICE tout en respectant les indications du constructeur pour assurer une qualité sonore optimale. Finalement, il est possible de vérifier la validité de notre modélisation numérique en comparant le modèle théorique du concepteur avec les valeurs réelles de l'amplificateur RIAA, mesurées en collaboration avec le groupe chargé de la réalisation du projet.

En abordant cette problématique, nous souhaitons apporter une meilleure compréhension des interactions entre ces composants et proposer un modèle le plus fidèle possible au modèle théorique, tout en apportant un regard critique de nos propres résultats.

1.1. Méthodologie

Premièrement, nous nous sommes tous renseignés sur les amplificateurs à lampe pour accumuler des connaissances personnelles sur le sujet afin de bien comprendre notre projet au sens général. Nous avons fait la découverte du logiciel de simulation LTSPICE afin de comprendre plus précisément le fonctionnement de l'amplificateur et faire sa modélisation.

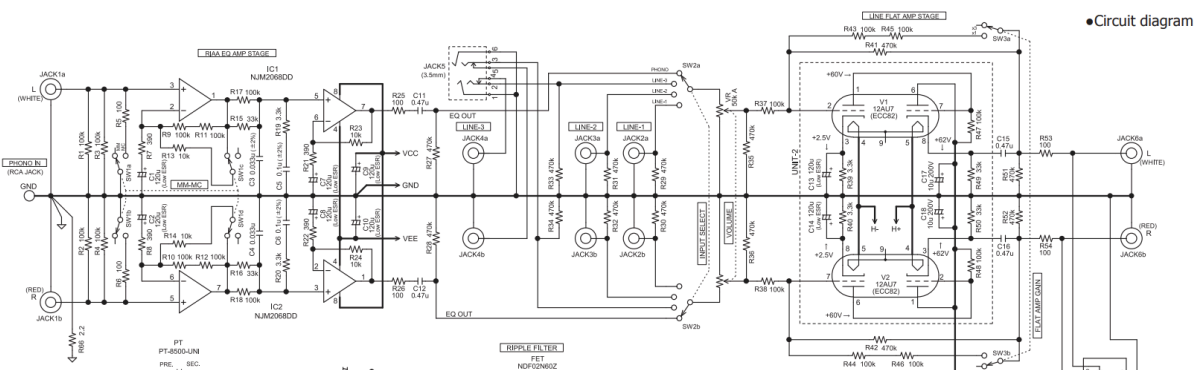
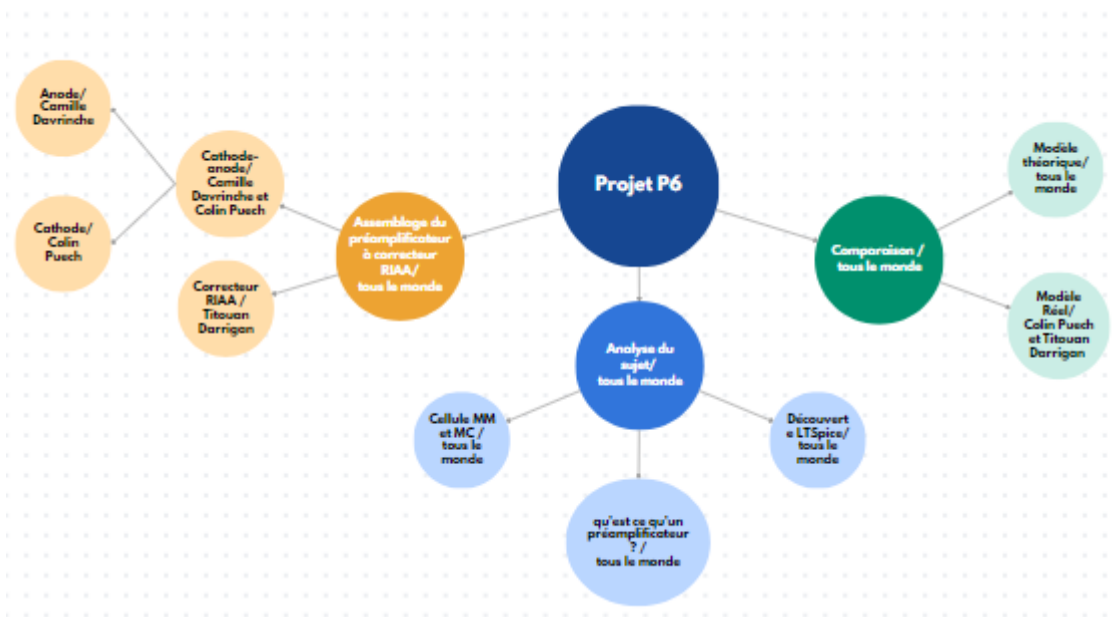


figure 1: Schéma du circuit

Nous avons dans l'annexe une représentation détaillée du diagramme du circuit. Pour faire la simulation d'un tel système, nous le séparons en deux grandes parties : le pré ampli et l'anode-cathode commune qui vont permettre d'amplifier. Lors de la modélisation des composants sur LTSPICE, qui sera faite dans un premier temps individuellement pour s'assurer que les modèles soient conformes à la théorie, pour procéder, on comparera leurs courbes de gain et leurs tensions de sortie dans le cas de la cathode commune et de l'anode commune. Il est important de mentionner qu'en raison de l'axe de symétrie, on s'attend à ce que la partie supérieure et inférieure soit identique, dans une perspective de simplifier la modélisation. Enfin, il est nécessaire de faire combiner toutes ces parties pour avoir l'assemblage de l'amplificateur RIAA. On adaptera le circuit en fonction des différents types de cellules phono. Il en existe deux : la cellule MC pour bobine mobile et la cellule MM pour "Moving magnet" en adaptant. Ces cellules phono vont influencer le gain, mais également la tension du signal. On essaiera de quantifier son influence.

On procédera à la dernière partie du projet qui consiste à vérifier nos valeurs avec celles obtenues expérimentalement. Pour procéder, on compare les tensions sur différents points du circuit.



1.2. Caractéristique d'un Amplificateur

Nous avons exposé le fonctionnement d'un Amplificateur, mais avant de procéder à la simulation, il est essentiel de comprendre son fonctionnement. En 1906, l'américain Lee De Forest a créé les premiers amplificateurs électroniques. Un amplificateur électronique offre la possibilité d'accroître la tension et l'intensité d'un flux électrique. L'amplification du signal est effectuée par le système électronique en utilisant l'alimentation électrique du système pour obtenir l'énergie requise. Un bon amplificateur ne modifie pas le signal en entrée, ce qui permet d'obtenir un signal en sortie identique et amplifié qui est utilisable par l'ensemble du système. Des amplificateurs sont présents dans tous les circuits électroniques.

La simulation de l'amplificateur que nous allons utiliser se découpe en 2 parties. La première partie représente la pré-amplification, il est essentiel d'avoir un préampli phono sur une platine vinyle afin d'amplifier le signal audio provenant de sa cellule phono. Un correcteur RIAA (Recording Industry Association of America) est un circuit de correction utilisé principalement dans les préamplificateurs de phono. Il applique une courbe d'égalisation standardisée pour compenser les modifications de fréquence appliquées lors de l'enregistrement des disques vinyles.

La seconde partie se nomme la Triode. La lampe électronique est employée afin d'amplifier les signaux électriques et de les amplifier. Le flux d'électrons entre la cathode et l'anode est contrôlé par la triode, qui utilise une grille de contrôle pour amplifier le signal d'entrée. L'intérêt majeur de cette disposition réside dans le fait qu'une légère variation de potentiel sur la grille entraîne une variation considérable du courant récolté par l'anode : c'est le principe de l'amplification. Il est alors possible d'ajuster et d'amplifier des paramètres, tels que le gain.

2. Études séparées de chaque étage

2.1. Réalisation du correcteur RIAA

Cette partie met donc en avant la simulation du correcteur RIAA. L'objectif de cette simulation est de vérifier la courbe d'égalisation RIAA du correcteur conçu, en montrant qu'il compense correctement les basses et hautes fréquences.

La première étape est de modéliser le circuit du correcteur RIAA sur LTSPICE. Deux configurations sont possibles : MM et MC. La cellule MM ou cellule à aimant mobile (moving magnet) correspond au dispositif le plus classique, présent sur la plupart des pré-amplificateurs. La cellule MC pour bobine mobile (moving coil) est quant à elle souvent associée à des dispositifs de meilleure qualité, plus coûteux. En réalité, ce qui différencie principalement ces deux montages, c'est la tension du signal d'entrée qui est comprise entre 2 et 10 mV en MM contre seulement 0,2 à 1 mV en MC. Cela a pour conséquence de rendre plus difficile le travail du préamplificateur pour maîtriser le signal et le préserver des bruits parasites en MC, ce qui nécessite un dispositif plus complexe.

Nous allons à présent observer de plus près en quoi consistent concrètement les différences de montage entre modes MM et MC et nous comparerons les performances de ces derniers au travers de mesures sur la simulation.

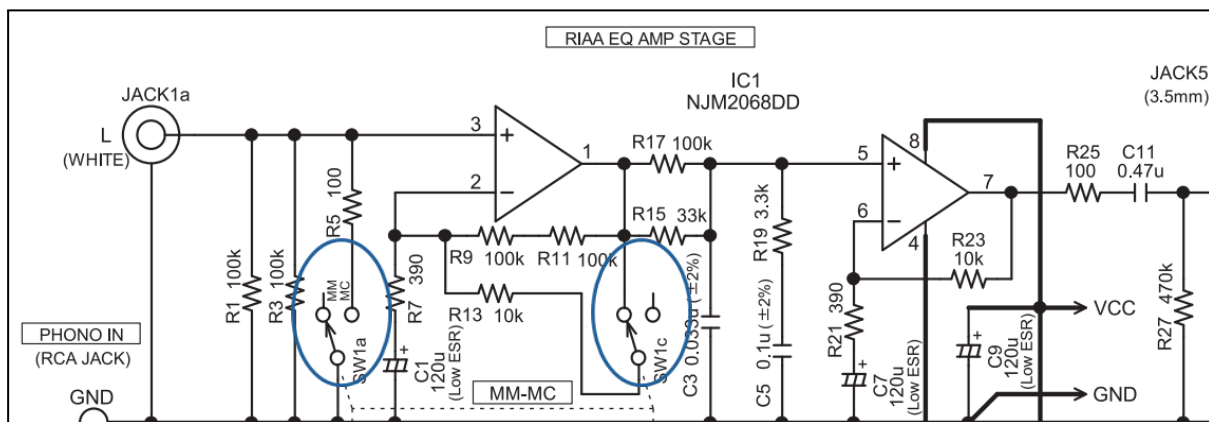


Figure 2 : Schéma du circuit à modéliser.

Comme on peut le voir sur le schéma du constructeur ci-dessus, la différence dans le montage de notre pré ampli réside dans l'interrupteur SW1a situé au milieu de la partie regroupant l'égalisation RIAA. Lorsque le switch est ouvert, l'ampli est en configuration MM et inversement lorsqu'il est fermé, le circuit complet correspond au mode MC.

Sur LTSpice, on a modélisé séparément les montages MM et MC, disponibles en annexe. Ce circuit comprend :

- Des amplificateurs opérationnels njm2068_s permettant d'amplifier des signaux électriques. Grâce à eux, un gain précis pourra être fourni au signal d'entrée, tout en inversant la phase si nécessaire.

Un réseau de résistance et de condensateurs (réseau RC) permettant de filtrer les signaux électriques selon leur fréquence. C'est ce réseau qui permet de reproduire la courbe d'égalisation RIAA.

Sur le haut du montage, on observe un circuit indépendant et plus petit qui correspond au circuit théorique. Son objectif est de servir de référence lors de la simulation. Il se compose de sources idéales de tension et de la fonction de transfert du circuit dans le domaine de Laplace. Elle décrit comment la tension de sortie (V_{out}) varie en fonction de la tension d'entrée (V_{in}), pour différentes valeurs de fréquence.

Ces deux circuits permettent ensuite de réaliser des analyses en régime sinusoïdal en balayant les fréquences de 20 Hz à 20 kHz, fréquences typiques de l'audio. On obtient ainsi deux courbes de gains en fonction de la fréquence. Les résultats montrent que le correcteur RIAA simulé (courbe verte) est en adéquation avec la théorie (courbe bleue). Cela signifie qu'il amplifie efficacement les basses fréquences tout en atténuant les hautes conformément aux attentes. Cependant, notre AO montre des limites dans les hautes fréquences audio, ce qui explique l'écart observé entre les deux courbes dans la configuration MC. Une alternative aurait été d'utiliser l'AO LT1115, réputé pour ses performances audio, mais il n'est malheureusement plus disponible chez les fabricants.

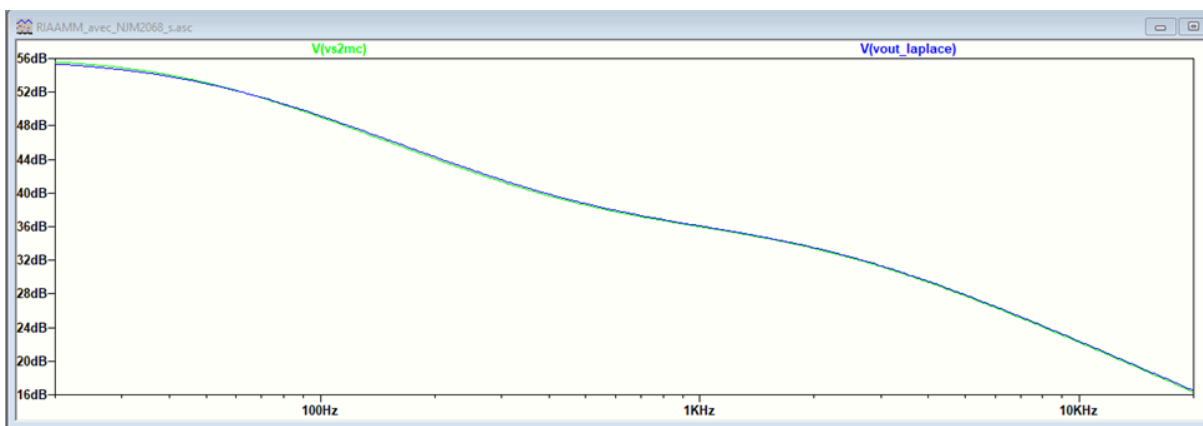


Figure 3: Courbe du gain en fonction de la fréquence pour le montage MM

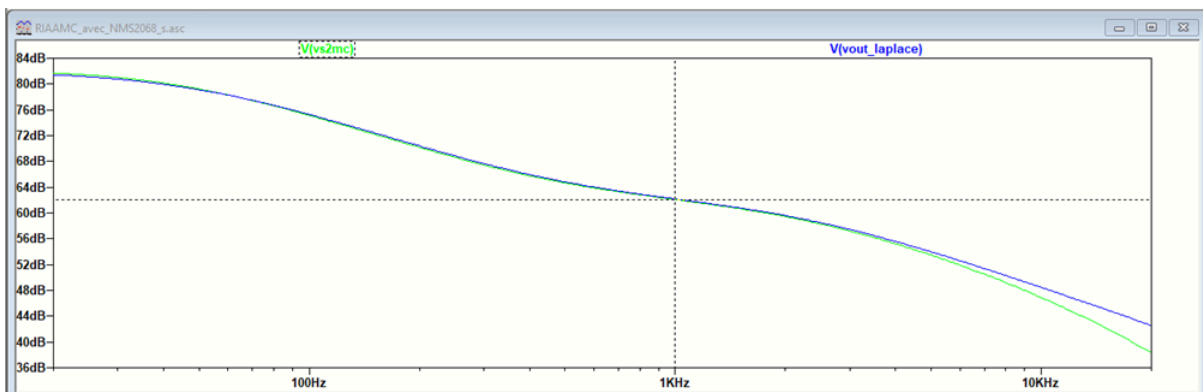


Figure 4: Courbe du gain en fonction de la fréquence pour le montage MC

2.2. Réalisation de l'anode commune

Nous passons à présent à la partie anode, pour ce faire, on s'inspire du schéma fourni par le constructeur. C'est-à-dire le squelette du montage, des valeurs de tensions et de résistances.

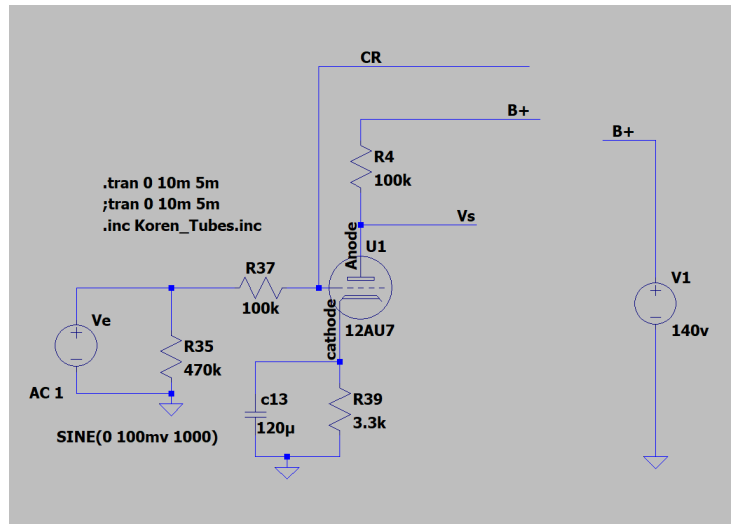


Figure 5 : schéma du circuit de l'anode commune sur LTSpice

Pour notre simulation de l'anode, on fera appel à la triode ECC82 qui correspond le mieux en termes de capacités aux modèles du constructeur qui sont des 12AU7 pour modéliser la cathode-anode commune. Pour simuler la partie pré amplification, on met un générateur à une tension estimée de 100 mV. Une fonction notée CR pour contre résistance est placée de façon à simuler la partie absente de la cathode et la partie qui reliera la cathode à l'anode. On paramètre les résistances selon les indications du constructeur.

On procède à l'Analyse transitoire à l'aide de la fonction (.tran) de LTSPICE on entre les paramètres de l'expérience, avant cela, on fait apparaître les détails du montage pour comparer :

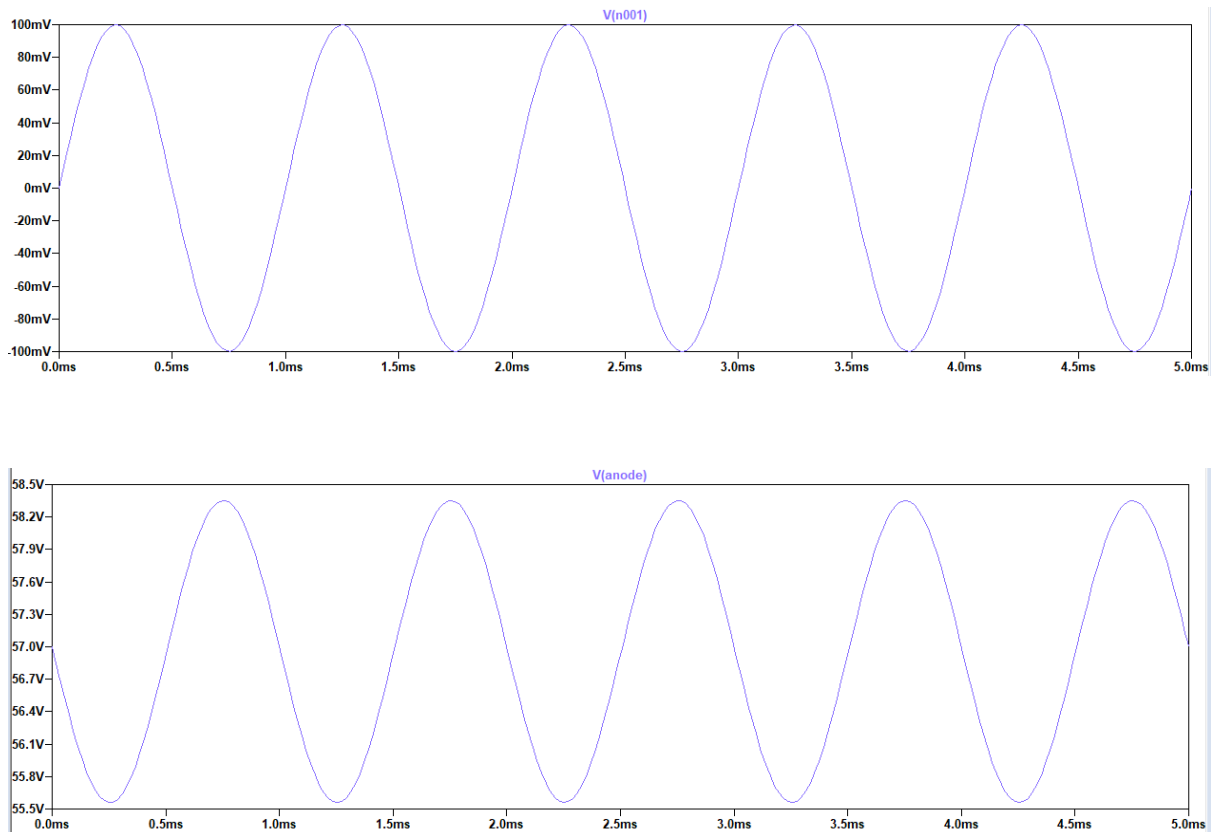
--- Operating Point ---

```

V(n001):    0      voltage
V(cr):      0.000100274 voltage
V(anode):   56.963  voltage
V(cathode): 2.74022  voltage
V(b+):      140    voltage
I(C13):     3.28826e-016 device_current
I(R4):      0.00083037 device_current
I(R39):     0.000830369 device_current
I(R37):     1.00274e-009 device_current
I(R35):     0      device_current
I(V1):      -0.00083037 device_current
I(Ve):      1.00274e-009 device_current
    
```

Figure 6: Tableau de donnée des différents composant du circuit

Ce tableau nous permet de déterminer la tension d'entrée et de sortie et de vérifier si notre simulation est correcte. On peut voir que la différence de tension entre les valeurs théoriques et de notre simulation est de 0.24 V pour la tension de la cathode. Ce problème pourrait être dû à une approximation qu'aurait faite le constructeur, ou bien de la simulation.



Figures 7 et 8 : analyses transitoires

La mesure dans la fenêtre de simulation se fait avec les curseurs : ils indiquent directement la différence de potentiel crête à crête pour chaque point. Le rapport de la tension de sortie à l'anode d'une lampe sur la tension d'entrée de celle-ci donnait ensuite le gain apporté par cette lampe. Le gain, c'est-à-dire le rapport entre la sortie et l'entrée qui est : $2,7/(199 \cdot 10^{-3}) = 13,98$. On en conclut que le signal est amplifié 14 fois par rapport à sa valeur initiale.

On procède à l'analyse des fréquences, on place les fréquences dans une gamme de fréquence comprenant toutes les fréquences audibles chez l'homme, entre 10 Hz et 50 kHz.

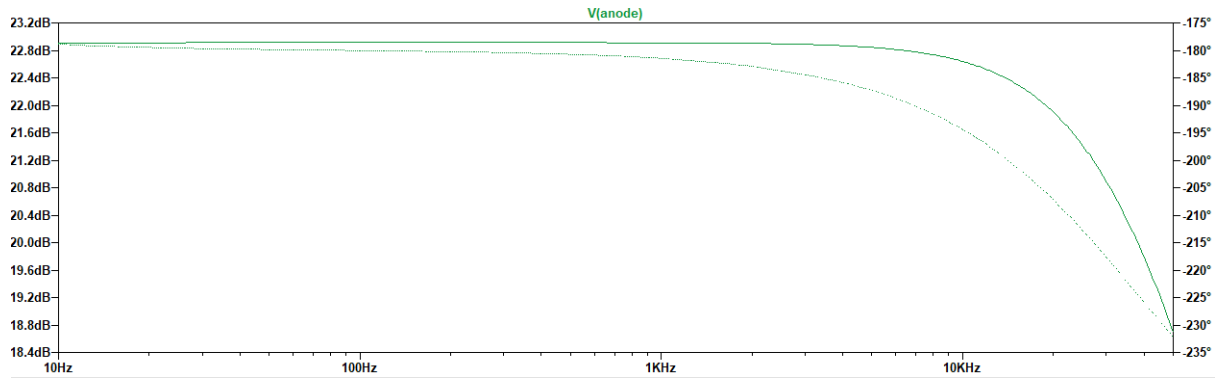


Figure 9: graphe du gain en Décibels selon la fréquence

On place le gain en décibel à 22,91 sur le graphe à 1kHz. On vérifie ce résultat mathématiquement à l'aide de la formule suivante :

$$20 \log (V_S/V_e) ,$$

Soit $20 \log (13,98) = 22,91$, on retrouve exactement le même résultat que celui retrouvé graphiquement.

De plus, en prenant la fréquence pour laquelle on atteint -3 dB de la bande passante On trouve 38 kHz ce qui est au-delà de l'audible. On en déduit qu'on a une perte en décibel seulement pour des fréquences plus élevées que 30 KHz ce qui est cohérent, ces fréquences n'étant pas dans l'audible, elles ne sont pas pertinentes à amplifier.

2.3. Réalisation de la cathode commune

Les lampes du préamplificateur se composent de deux triodes, une anode et une cathode. Nous allons à présent nous pencher sur le montage spécifique de la cathode.

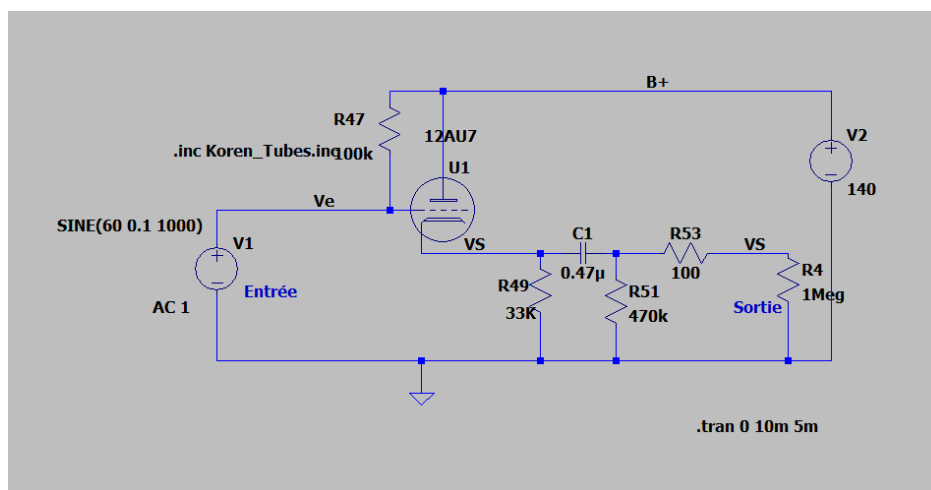


Figure 10 : schéma du circuit Itspice de la cathode seule

Dans le but d'étudier le comportement du circuit, nous avons reproduit le schéma de la partie spécifique à la cathode commune donné par le constructeur dans le logiciel LTSpice.

Étant donné que ce schéma ne représente qu'une partie incomplète du circuit, nous avons donc simulé le courant entrant dans le circuit provenant de l'anode par une source de courant fictive dans le logiciel. On a choisi une tension en entrée de 60 V pour correspondre aux indications sur le schéma du fournisseur.

Une fois, cela fait, nous avons pu réaliser plusieurs analyses différentes dans le logiciel :

Tout d'abord une analyse OP, donnant des valeurs numériques comme la valeur de la tension du signal d'entrée et de sortie. Pour une tension d'entrée de 60 V, on obtient une tension de sortie de 63,23 V.

```

--- Operating Point ---
V(vs) :      63.2286      voltage
V(ve) :      60         voltage
V(b+) :      140        voltage
V(vsc) :     9.5018e-012 voltage
V(n001) :    9.50085e-012 voltage
I(C1) :     -2.97174e-017 device_current
I(Rload) :   9.50085e-018 device_current
I(R53) :    -9.50085e-018 device_current
I(R51) :     2.02166e-017 device_current
I(R47) :     0.0008      device_current
I(R49) :     0.00191602 device_current
I(V2) :    -0.00271602 device_current
I(V1) :     0.000800001 device_current
Ix(u1:1) :   0.00191602 subckt_current
Ix(u1:2) :  -1.00322e-009 subckt_current
Ix(u1:3) :  -0.00191602 subckt_current

```

Figure 11 : résultats de l'analyse OP sur la cathode commune

On réalise ensuite une analyse transitoire. Ce type d'analyse nous permet d'observer le signal électrique en différents points du circuit. La tension du signal est représentée sur un graphique en fonction du temps en ms, on compare alors les signaux en entrée et en sortie du circuit. On obtient dans les deux cas des signaux sinusoïdaux (conformément au type de source de courant que nous avons choisi). On mesure la tension maximale et minimale, ce qui nous permet de calculer l'amplitude crête à crête du signal en entrée et en sortie. On trouve 199 mV CC en entrée et 184 mV CC en sortie.

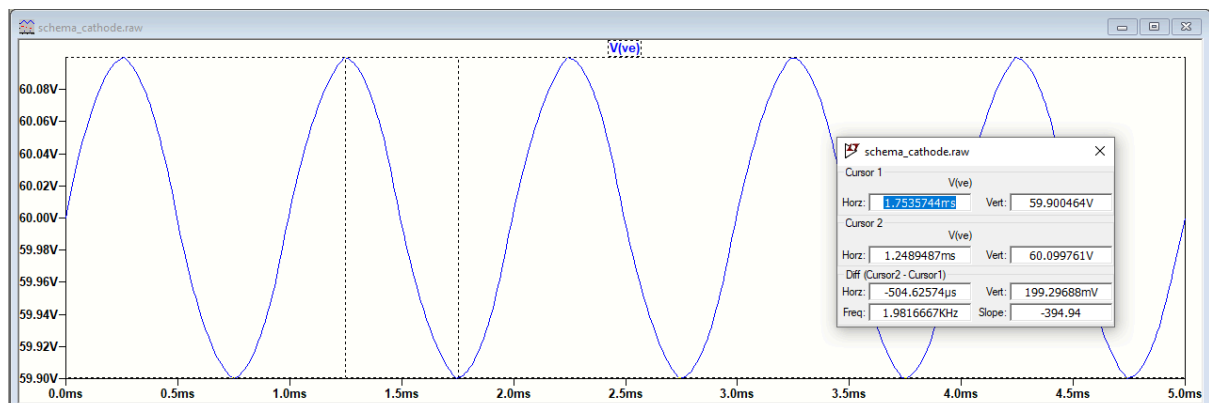


Figure 12 : Analyse transitoire du signal d'entrée

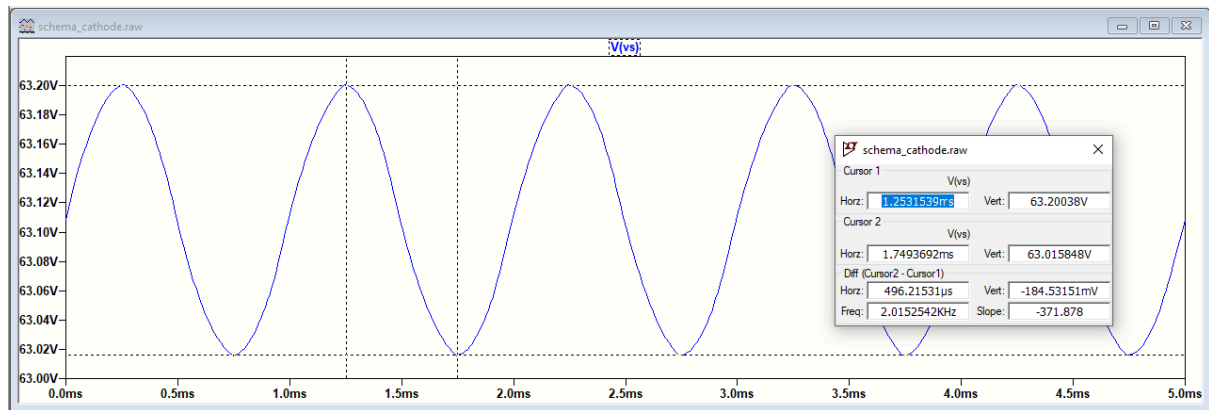


Figure 13 : Analyse transitoire du signal de sortie:

On en déduit un calcul du gain $G = V_s/V_e = 184/199 = 0,92$.

Cela signifie que le signal ressort de la cathode avec une amplitude qui se rapproche de 1 à celle qu'il y avait en entrée, bien que légèrement inférieure. La cathode n'a pas d'effet sur le gain.

Enfin, on réalise une analyse AC qui permet de visualiser le signal en fonction de la fréquence. On obtient deux graphes, le premier représentant le gain du signal en dB en fonction de la fréquence et le second représentant la tension de sortie en fonction de la fréquence. On choisit une plage de fréquence de 10 Hz à 150 Hz. On observe que la cathode commune agit comme un filtre passe-haut, coupant les fréquences situées en dessous de 100 Hz environ. Sur le graphe en dB, on peut regarder à partir de quelle fréquence le signal coupe la ligne de -3 dB, qui correspond comme on l'a expliqué dans la partie précédente à la limite d'audibilité du signal. On trouve alors que l'entièreté du spectre audible par l'Homme (20 Hz à 20 kHz) est au-dessus de -3 dB, ce qui signifie que la cathode commune n'entraîne pas de perte audible, ce qui est très important pour un système audio de haute qualité.

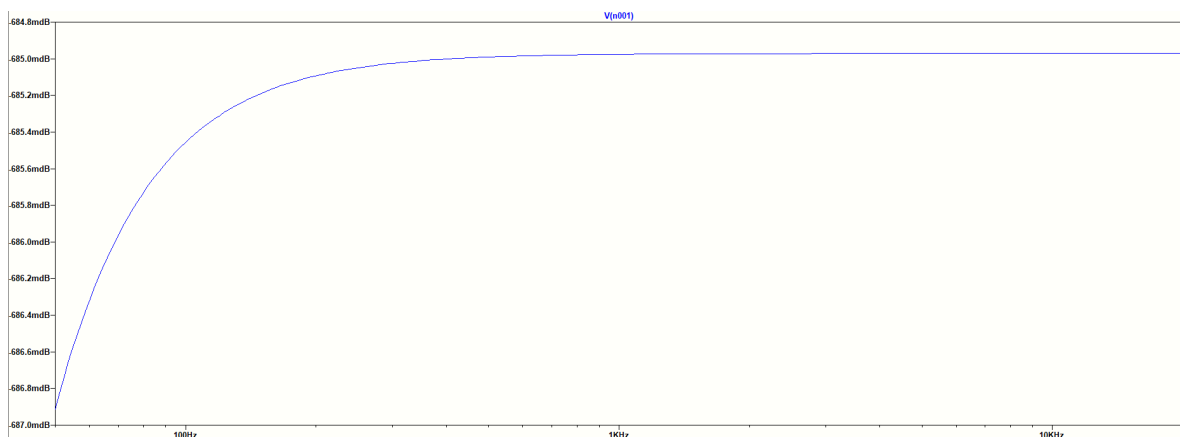


Figure 14 : analyse AC, graphe 1 : signal (dB) en fonction de la fréquence

Pour le second graphe, on choisit un affichage linéaire de la tension, comprise en 0 et 1V, ce qui nous permet de retrouver un gain de 0,92 comme calculé précédemment.

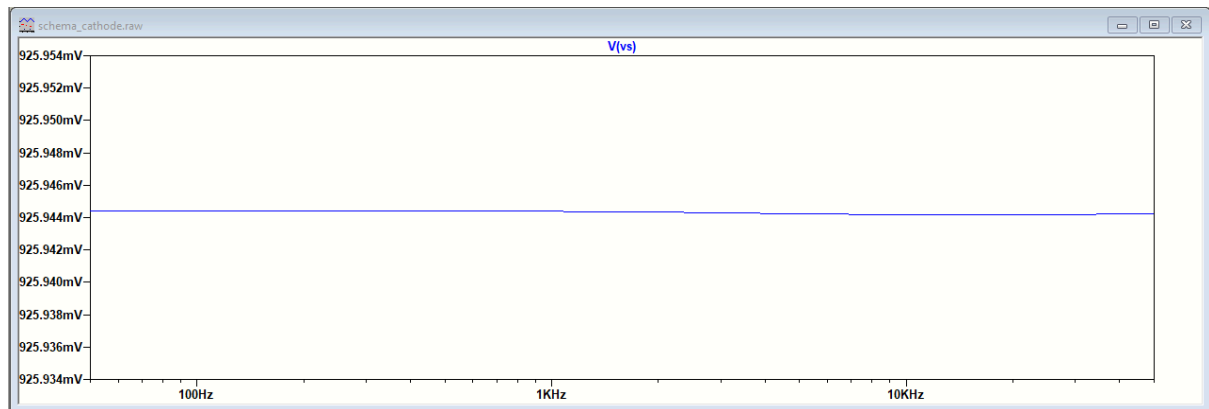


Figure 15 : analyse AC, graphe 2 : signal (mV) en fonction de la fréquence, affichage linéaire.

A présent que nous avons calculé la valeur du gain théorique, nous pouvons réunir les schémas de l'anode et la cathode.

3. Etude du montage anode-cathode

Lors des études précédentes, nous avons réalisé des mesures théoriques sur les circuits séparés de l'anode et de la cathode. Nous avons notamment calculé un gain théorique de 0,92 pour la cathode et de 13,98 pour l'anode. Nous allons à présent joindre bout à bout les circuits pour obtenir le circuit complet de la partie FLAT de l'amplificateur. L'objectif sera de mettre en évidence les différences de comportement au travers de calculs théoriques et de mesurer dans LTSpice en fonction des différents modes de l'amplificateur étudié.

Tout d'abord, il faut noter que lorsqu'on raccorde simplement les deux circuits séparés, on obtient un nouveau montage qui ne correspond pas tout à fait au circuit complet puisqu'il manque les résistances R 41, R 43 et R 45 (voir schéma montage). On appellera alors ce circuit intermédiaire obtenu circuit en boucle ouverte puisque celui-ci nous sera utile par la suite pour effectuer des calculs.

À partir des valeurs de gains des parties cathode et anode séparées, on peut calculer le gain dit en boucle ouverte ou GBO : $GBO = \text{Gain (anode)} * \text{Gain (cathode)} = 0,92 * 13,98 = 12,88$.

On complète ensuite le schéma dans le logiciel avec les contre résistances R 41, R 43 et R 45 qui permettent de créer une boucle dans le circuit afin de diminuer le gain de sortie. En

effet, même si on cherche à amplifier le signal, un gain de sortie de 12 reste bien trop élevé pour un préamplificateur.

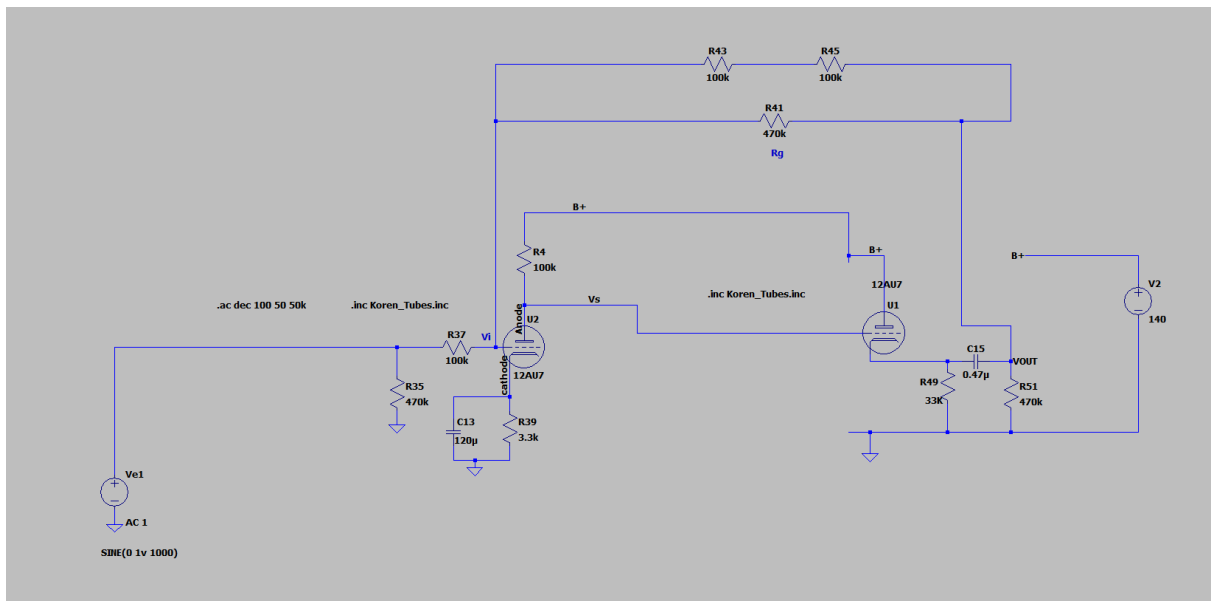


Figure 16 : schéma LTSpice du circuit anode - cathode

On peut alors calculer le gain théorique correspondant au circuit complet qu'on nommera Gain en boucle fermée (GBF).

Image des schémas GBF et GBO.

À noter que pour simplifier les calculs, on a regroupé tous les contres résistances sous une seule résistance équivalente notée RG. De plus, dans le montage de l'ampli TU-8500, on note la présence de l'interrupteur SW3a qui permet d'intégrer ou non les résistances R 43 et R 45 au circuit. Ainsi dans le premier mode, lorsque le switch est ouvert, seule la résistance R 41 est intégrée au circuit et donc $RG = R 41 = 470 \text{ KOhms}$, et dans le deuxième mode, R 43 et R 45 sont intégrées au circuit en parallèle de R 41 et ainsi, on trouve en appliquant les lois sur les résistances en série et en parallèle :

$$RG = \frac{(R43 + R45) \times R41}{R41 + R43 + R45} = \frac{(200000 \times 470000)}{200000 + 470000} = 140,30 \text{ K}\Omega$$

À partir du schéma ci-dessus, on peut écrire $GBF = V0/Ve$.

On peut alors écrire la formule de Millman appliquée au circuit schématisé et qui nous donne l'expression suivante:

$$Vi = \frac{\frac{Ve}{R37} + \frac{V0}{RG}}{\frac{1}{R37} + \frac{1}{RG}} = \frac{V0}{-GBO}$$

$$\Leftrightarrow -V0 \cdot \left(\frac{1}{GBO} + \frac{R37}{R37+RG} \right) = Ve \cdot \frac{RG}{RG+R37}$$

$$\Leftrightarrow -\frac{V0}{Ve} = \frac{\frac{RG}{RG+R37}}{\frac{1}{GBO} + \frac{R37}{R37+RG}}$$

On conserve le signe négatif devant la fraction qui est dû au fait qu'il s'agit d'un montage inverseur à cause de la contre-réaction. En conservant le signe négatif, on obtiendra des valeurs positives.

On réalise l'application numérique en remplaçant RG dans un premier cas 470K Ohms puis par 140,30 KOhms.

On trouve dans le cas où l'interrupteur SW3a serait ouvert $GBF = 3,26$ et dans le cas où il serait fermé, on trouve : $GBF = 1,18$.

Ces résultats sont proches de ceux mesurés par le groupe travaillant sur la partie montage qui avait mesuré un gain de 3,1 dans le premier cas et de 1,19 pour le second.

On retrouve également des valeurs de gain similaire en mesurant sur LTSpice la tension en sortie à 1kHz:

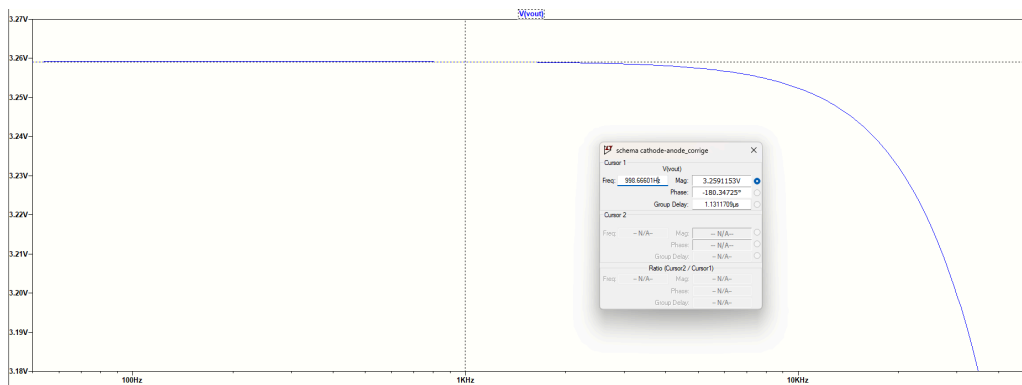


Figure 17 : analyse AC du signal de sortie, mode SW3a ouvert

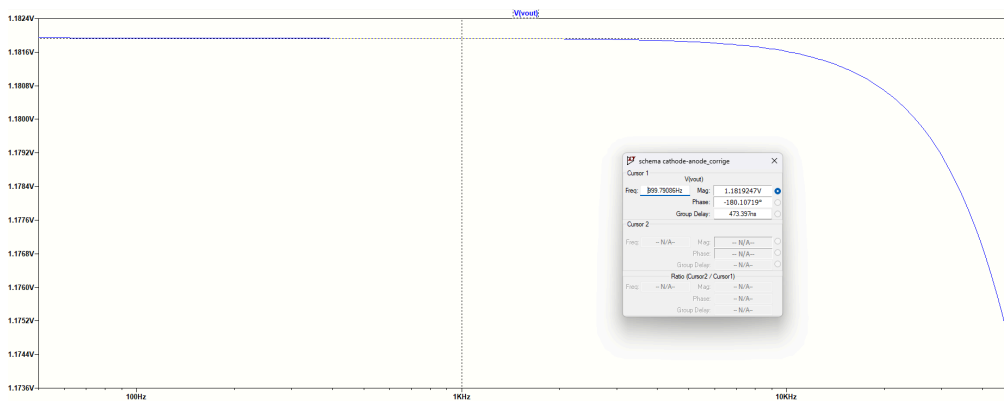


Figure 18 : analyse AC du signal de sortie, mode SW3a fermé

À partir de là, il reste à fusionner les schémas des circuits anode-cathode et la partie FLAT qui contient les amplis OP.

4. Montage final : étude des modes MM et MC

Après avoir réalisé séparément les montages du correcteur RIAA, de l'anode commune et de la cathode commune, il faut à présent fusionner ces schémas pour obtenir le montage final. Nous avons précédemment détaillé l'étape intermédiaire consistant à l'assemblage de la cathode avec l'anode. À présent, nous allons ajouter le montage du correcteur RIAA.

Nous avons mentionné dans la partie méthodologie que ce montage pourrait être réalisée en cellule phono MC, mais aussi en cellule MM, ce qui nous donne deux montages différents qui sont les suivants :

Comme nous l'avons expliqué, ces modes MM et MC nécessitent chacun une tension d'entrée différente, de 2 à 10 mV en MM et de 0,2 à 1 mV en MC.

Pour les mesures, on prend dans chaque cas une valeur de tension en entrée correspondant à la tension maximale en entrée pour chacun des montages comme expliqué précédemment.

Commençons par le mode MM :

On a donc choisi une tension d'entrée de 10 mV, et on mesure une tension intermédiaire à la sortie de la partie égalisation RIAA, juste avant les lampes, de 610 mV.

Image de la tension max post préamplificateur MM :

On mesure également la tension max en bout de circuit, après les lampes : on trouve 760 mV lorsque le switch SW3a est fermé (cas GBF = 1) et 2,0 V lorsqu'il est ouvert (cas GBF = 3).

On remarque également que le signal de sortie est en opposition de phase avec le signal à l'entrée du préamplificateur.

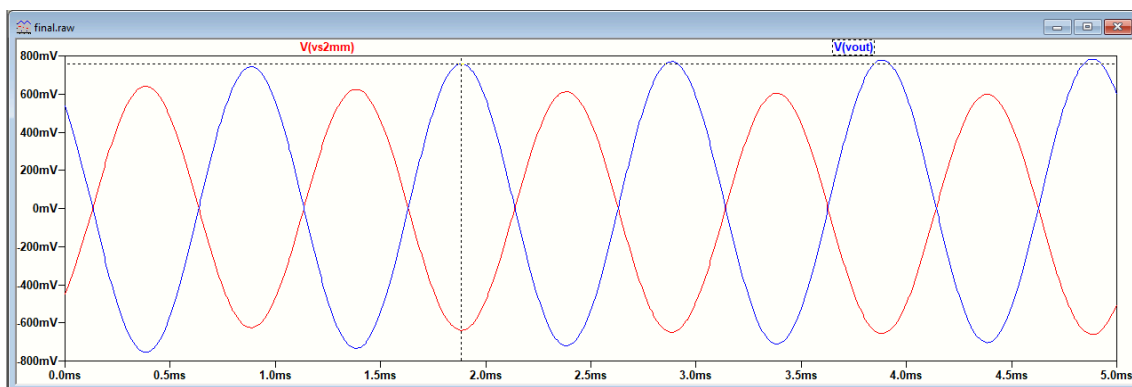


Figure 19 : tension max en sortie, mode MM, sw3a fermé

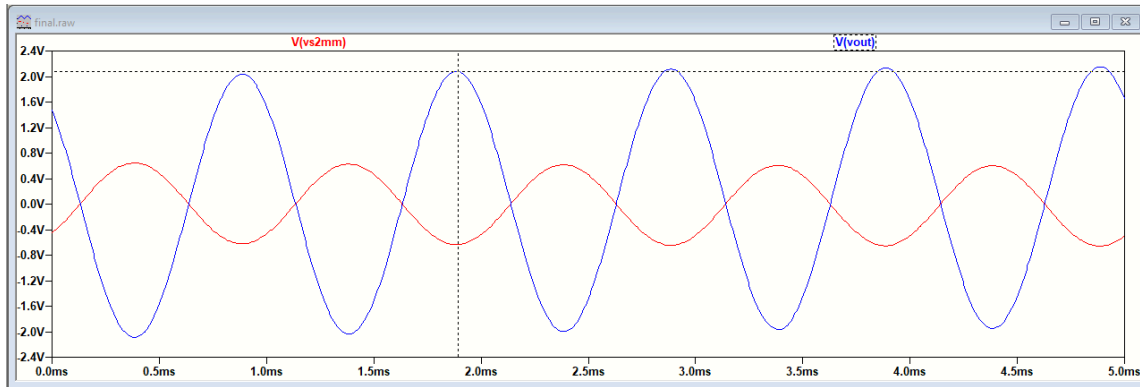


Figure 20 : tension max en sortie, mode MM, sw3a ouvert

Puis on réitère les mesures en mode MC :

En mode MC, on choisit donc une tension d'entrée maximale d'1 mV. On mesure alors une tension intermédiaire max de 1,23 V. Enfin, on mesure la tension max de sortie du signal et on trouve 1,53 V lorsque l'interrupteur SW3a est fermé et 4,26 V lorsqu'il est ouvert. Le signal de sortie est toujours en opposition de phase avec le signal d'entrée.

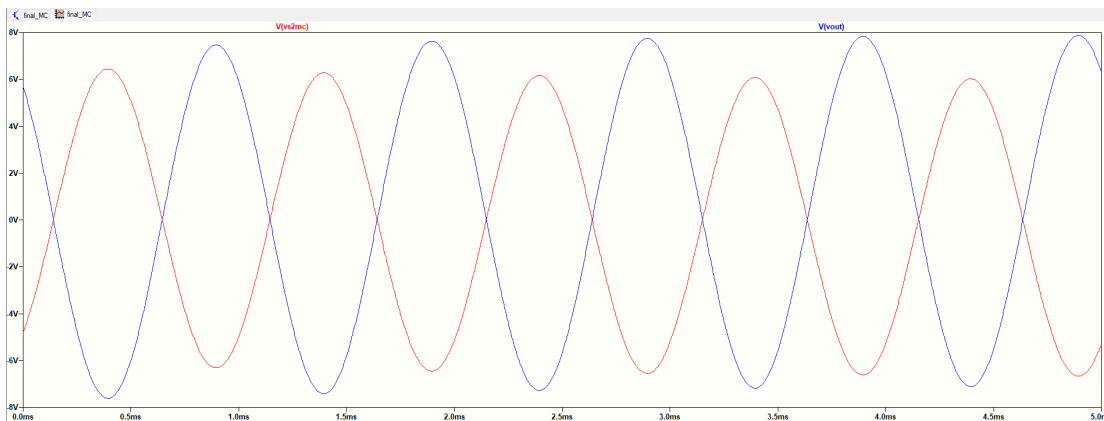


Figure 21 : tension max en sortie , mode MC, sw3a fermé

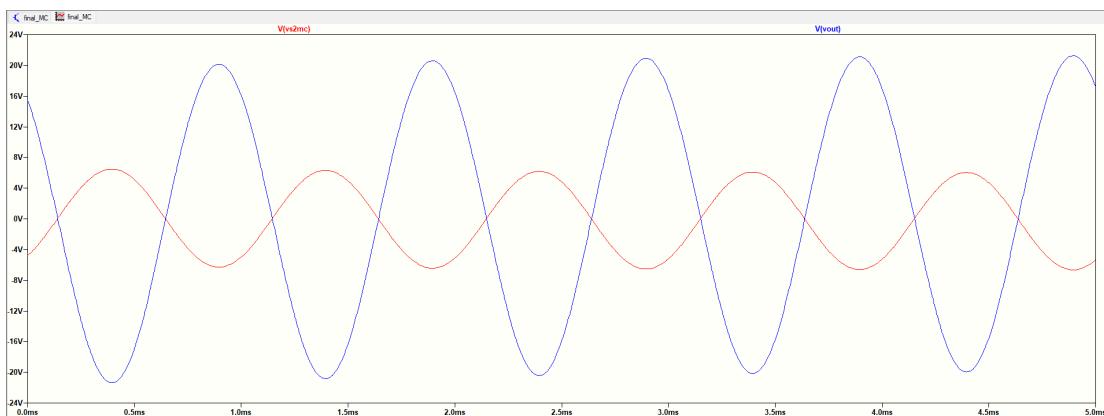


Figure 22 : tension max en sortie, mode MC, sw3a ouvert

On obtient alors que la tension max de sortie est environ 2 fois supérieure en mode MC par rapport au mode MM bien que la tension d'entrée soit 10 fois inférieure en mode MC. On a donc montré que le montage MC permet une amplification équivalente, voire supérieure à celle en mode MM, et ce, pour une tension d'entrée 10 fois moindre.

Enfin, grâce à une analyse AC, on peut visualiser les courbe de gain finale en fonction de la fréquence dans les 4 dispositions possibles:

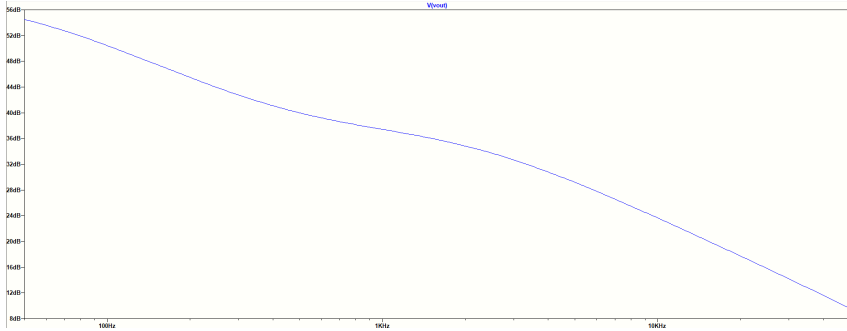


Figure 23 : analyse AC, mode MM, switch sw3a fermé

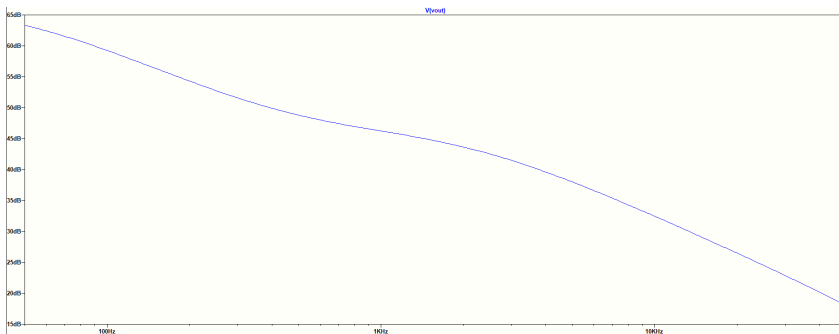


Figure 24 : analyse AC, mode MM, switch sw3a ouvert

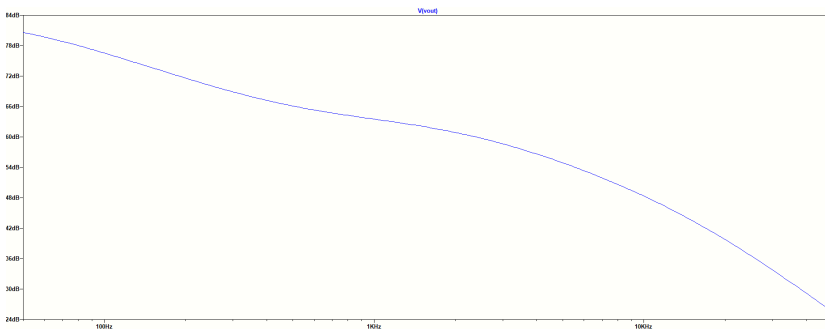


Figure 25 : mode MC, switch sw3a fermé

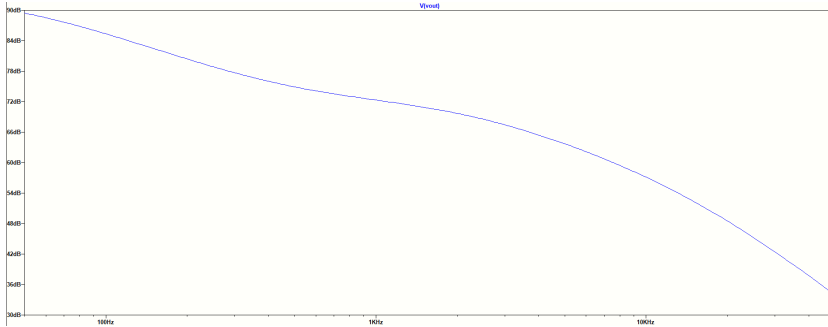


Figure 26 : mode MC, switch sw3a ouvert

On peut ainsi clairement observer que la courbe d'égalisation reste identique quel que soit le mode sélectionné, ce qui est normal puisque l'objectif reste dans tous les cas le même, c'est-à-dire, contrebalancer le déséquilibre entre les volumes des fréquences basses et aiguës sur les enregistrements vinyles. La principale différence réside dans le gain général de sortie. En effet, on peut observer que les combinaisons des modes MM et MC avec l'utilisation du switch sw3a offre 4 niveaux de gains de sortie différents, du moins au plus élevé : MM + sw3a fermé, MM + sw3a ouvert, MC + sw3a fermé, MC + sw3a ouvert.

Enfin, pour conclure l'étude du montage complet, on procède à une analyse FFT ou analyse harmonique qui nous permet de visualiser les harmoniques qui composent le signal en sortie.

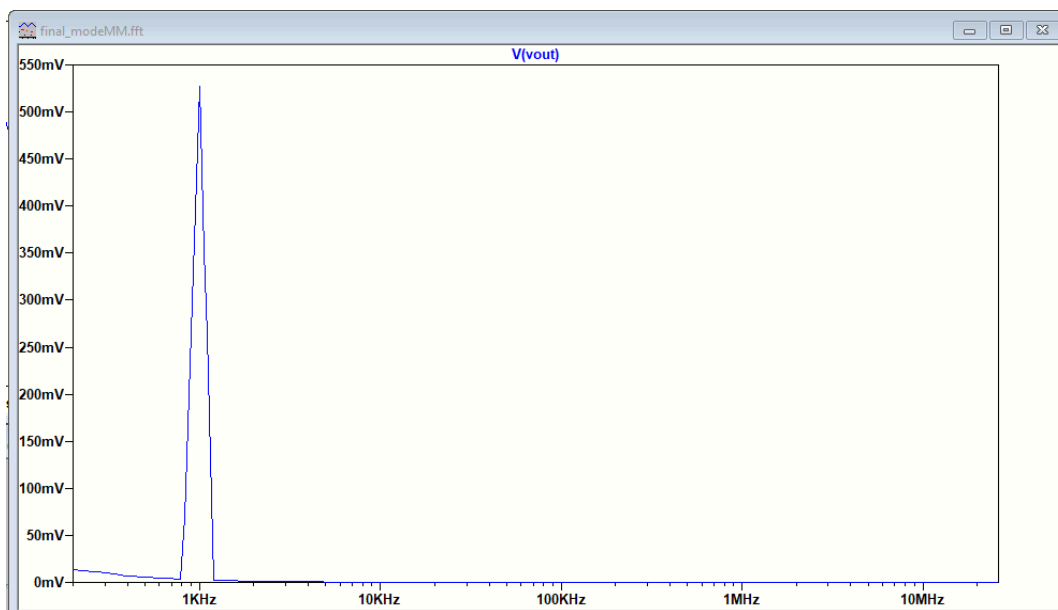


Figure 27 : analyse harmonique du signal de sortie en mode MM

On observe ici une unique harmonique à 1 KHz, ce qui est normal puisque notre signal d'entrée est un signal sinusoïdal à 1 KHz. L'absence d'harmoniques montre que le circuit n'affecte pas le signal d'entrée en ajoutant des harmoniques supplémentaires. Ce modèle de circuit possède une bonne fidélité de restitution du signal.

5. Comparaison simulation et montage réel

Il est important de confronter notre montage aux valeurs réellement obtenues au cours du projet. Pour procéder, le groupe montage du projet mesure différentes valeurs obtenues sur différentes parties de l'assemblage et reporte ces dernières dans un tableau. Nous comparons alors nos valeurs avec ces dernières.

Pour faire la comparaison, on va calculer des valeurs de gain sur les montages complets en MM et MC, que l'on comparera aux valeurs mesurées sur le circuit. Précisons que par la suite, on prendra le circuit avec le switch sw3a fermé.

En mode MC, on prend en entrée un signal sinusoïdal de valeur $V_{max} = 1 \text{ mV}$ soit une amplitude crête à crête de 2mV. Après avoir réalisé une analyse transitoire, on mesure une amplitude crête à crête en sortie de 2,98V.

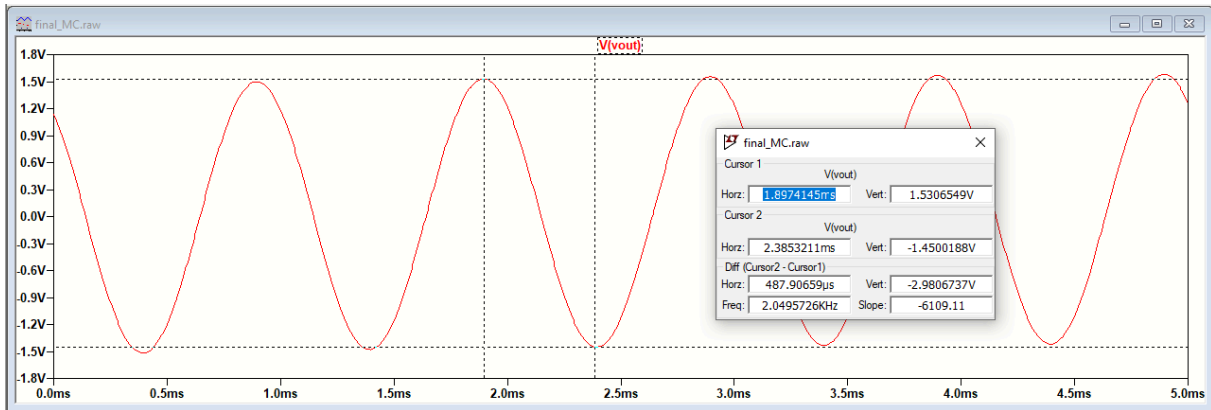


Figure 28 : tension cc de sortie, mode MC, sw3a fermé

On calcule donc le gain total pour le circuit complet : $G(MC) = v_s/v_e = 2,98/0,002 = 1490$

On réitère le processus en mode MM en choisissant $V_{max,entrée} = 10 \text{ mV}$, ce qui donne une tension d'entrée crête à crête de 20mV.

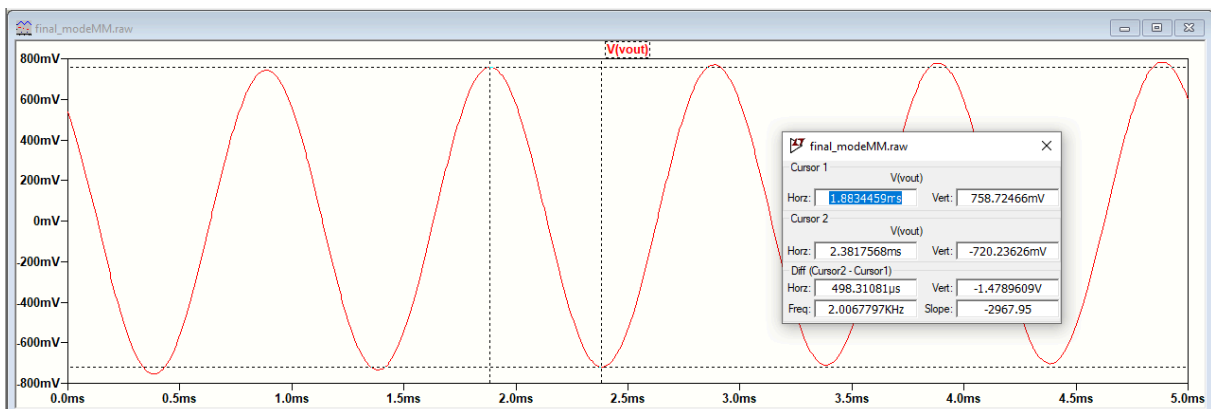


Figure 29 : tension CC de sortie, mode MM , sw3a

On mesure une amplitude de sortie crête à crête de 1,48V. Cela donne un gain crête à crête de $G(MM) = 1,48/0,02 = 74$

En comparaison, le groupe travaillant sur la partie application et montage avait mesuré sur l'oscilloscope $G(MC) = 20,9/0.02 = 1045$ et $G(MM) = 1.57/0.02 = 78.5$.

On a donc une marge d'erreur relative de presque 30% sur la mesure de $G(MC)$, et de 6% sur la mesure de $G(MM)$. On peut donc conclure que le modèle théorique ne correspond pas tout à fait à la réalité observée, mais donne des résultats cohérents en termes d'ordres de grandeur.

Enfin, on observe qu'on a un rapport de 13,5 entre $G(MC)$ et $G(MM)$, supérieur à 10, ce qui est donc cohérent.

6. Conclusion

Nous avons construit l'amplificateur associé à partir d'une simulation pour comparer les résultats théoriques et expérimentaux obtenus. Le projet comprend donc une partie Analyse théorique et une partie simulation. Pour ce qui est de la partie analytique, nous avons étudié les diverses parties de l'amplificateur et effectué des recherches sur celui-ci afin de comprendre le fonctionnement de chacune de ces parties et leur utilité dans l'objectif d'amplifier un signal audio.

Ce projet nous a également permis de comprendre le principe de l'égalisation RIAA, son histoire et son intérêt pour l'amplification de signaux d'une platine vinyle afin de compenser le déficit de volume sur les basses fréquences à l'enregistrement.

Enfin, ce projet nous a permis d'approfondir plusieurs axes et de compléter nos connaissances en électricité que nous avons en partie découvertes l'année dernière.

Ce projet nous a donné l'occasion de travailler en équipe sur un sujet qui nous a intéressés, l'apprentissage de l'électronique, mais aussi sur la réalisation d'un projet global. Chaque partie de la simulation étant indépendante, la communication était un axe important dans ce projet, pour finaliser l'assemblage de l'amplificateur. C'est ainsi que nous avons amélioré notre pratique de travail d'équipe en structurant les tâches et en rédigeant le rapport. Chaque session offrait l'occasion d'apprendre de nouvelles méthodes comme le logiciel LTSpice, mais aussi l'analyse des résultats bruts mesurés à l'oscilloscope et au multimètre. Il a été possible pour chacun de compléter les connaissances des autres et de rassembler les différentes parties de l'amplificateur. Nous avons également constaté que plusieurs secteurs rentraient dans ce projet, comme l'électronique, la simulation, l'influence du son, et que cela nous permettait d'élargir nos perspectives scientifiques. L'amplification du son peut être améliorée par la réalisation d'un amplificateur à transistor et par la comparaison de ses performances avec le Fender champ ou constituer un futur projet.

7. Annexes

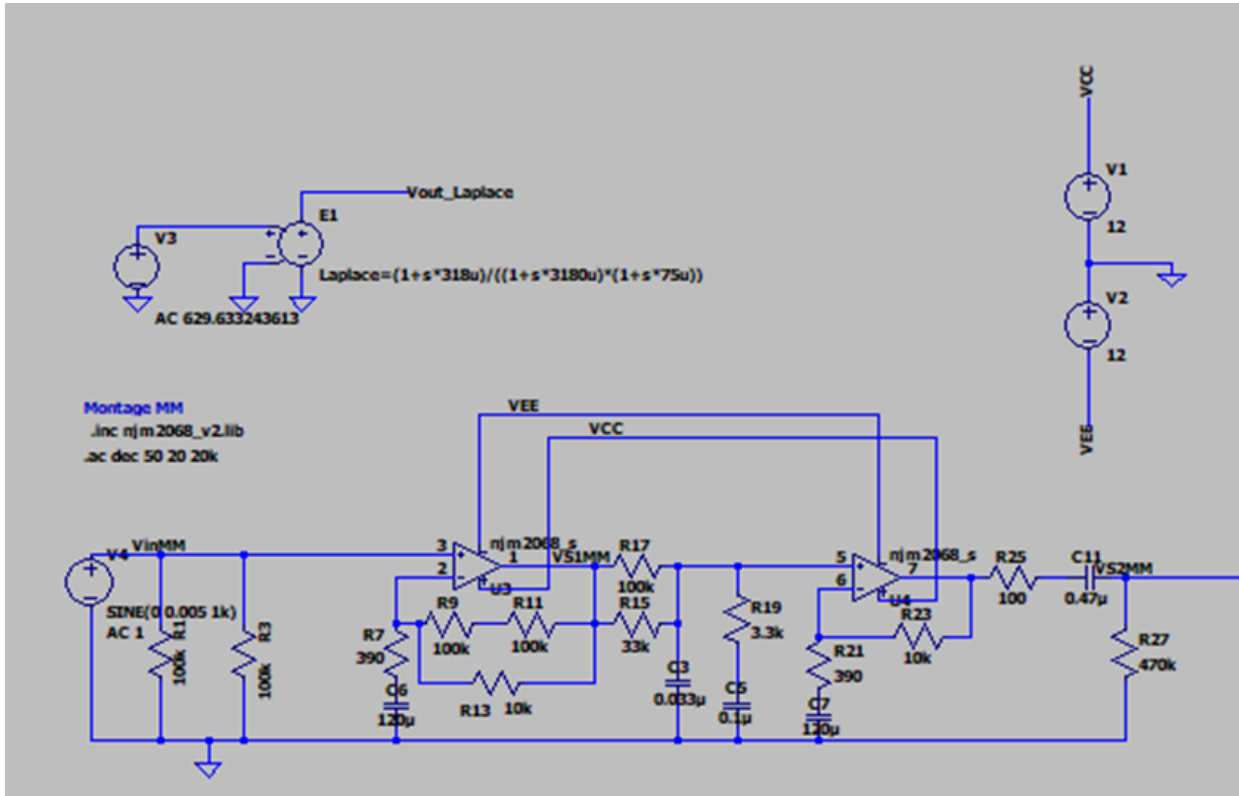


Figure 30 : Montage MM sur LTSPICE

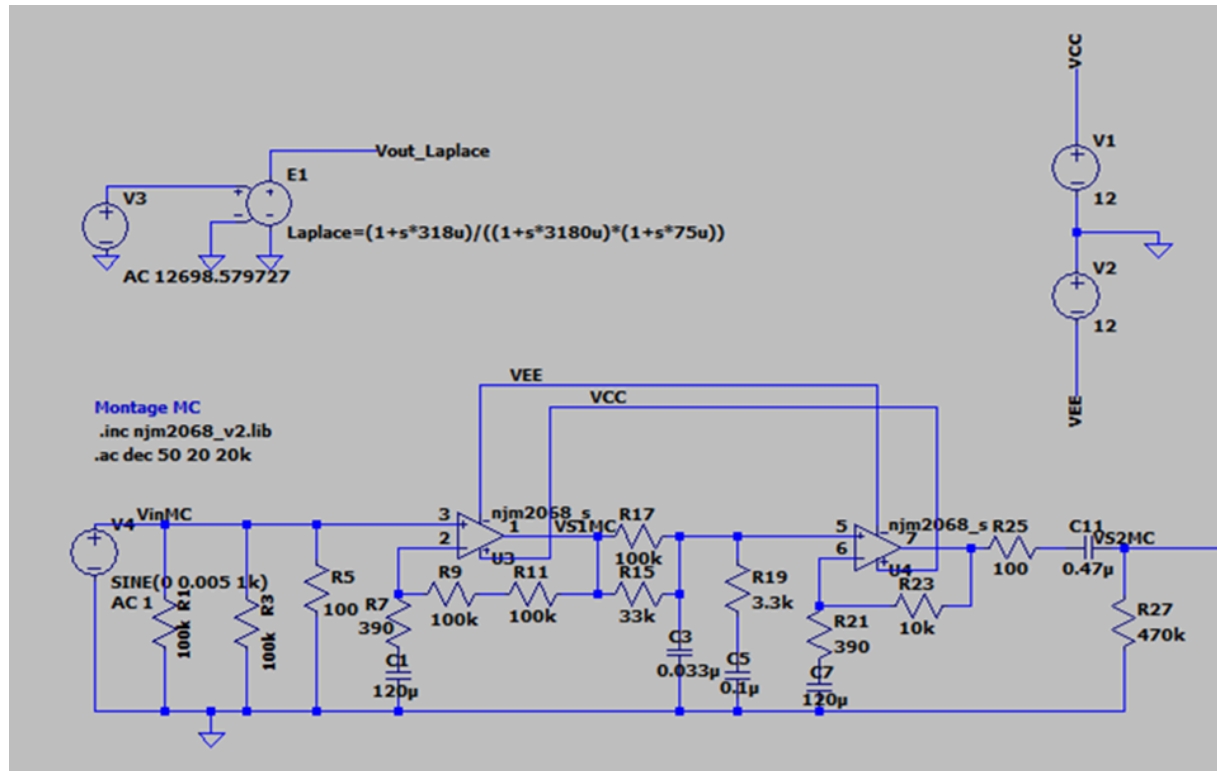


Figure 31 : Montage MC sur LTSPICE

8. **Bibliographie :**

- Article, « Préamplificateur phono (RIAA) : comment ça marche, et comment choisir ? », publié le 17 juillet 2018 par Nicanor Haon.

(10 pages)

<https://www.on-mag.fr/index.php/topaudio/actualites-news/18195-preamplificateur-phono-riaa-comment-ca-marche-et-comment-choisir-oui-on-fait-toujours-le-meme-titre>

- Site de vente en ligne spécialisé dans les appareil pour audiophile, avec des articles comme « Comment lire les caractéristiques techniques d'une cellule phono ». Ce site permet de comparer différents modèles de préamplificateur.

[https://www.son-video.com/guide/comment-lire-les-caracteristiques-techniques-dune-cellule-phono`](https://www.son-video.com/guide/comment-lire-les-caracteristiques-techniques-dune-cellule-phono)

- Cathode Bypass Capacitor Calculator, logiciel permettant de calculer le gain d'une cathode, en utilisant la formule de F. Langford-Smith. (1 page)

<https://www.ampbooks.com/mobile/amplifier-calculators/cathode-capacitor/>

-Tutoriel du logiciel LTSPICE, de la modélisation d'un circuit sur LTSPICE à la modélisation, publié par LEnsE. (15 pages)

<https://lense.institutoptique.fr/mine/ltspice-saisir-un-schema/>

-Extrait de cours de simulation sur LTSPICE « Apprentissage par projets à l'INSA ROUEN-NORMANDIE : Etude, réalisation et simulation d'amplificateurs « vintage » à lampes », publié par Richard Grisel en 2018.

(38 pages)

<https://www.j3ea.org/articles/j3ea/abs/2018/01/j3ea180002/j3ea180002.html>

-La notice du préampli en anglais, « Tube Preamp kit Tu-8500 », elle donne le détail des schéma, des valeurs théoriques comme le gain. Publié par Elkit en 2015.

(16 pages)

https://kerlee.com/blog/wp-content/uploads/2020/07/TU8500_English_manual_02_revised_1.pdf

-Article, « Le préampli phono : l'élément indispensable d'une platine vinyle ». Elle donne les différences entre le mode MM et MC et explique l'intérêt d'un correcteur RIAA. Publié par noir-et-blanc.

<https://www.noir-et-blanc.com/vinyle/accessoires-vinyle/preamplificateurs-phono.html#category-bottom-description>

-Cours de P3, sur l'électricité notamment les passe-haut, passe-bas mais aussi sur les calcul de gain, notion qu'on retrouve dans notre rapport, STPI 1, INSA ROUEN 2023.