



Université de Toulon

UFR SCIENCES ET TECHNIQUES
SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR



Laboratoire IM2NP
TUTEUR : HERVÉ BARTHELEMY

Compte-rendu Projet Personnel de Recherche

GAËL ROSTANG

24 Juin 2025

Table des matières

Remerciements	5
Introduction	7
Logiciels utilisés	9
1 Étude du circuit sur LTspice	11
1.1 Paires différentielles	11
1.2 Paires Sziklai	11
1.3 Amplification en courant	12
1.4 Cellule de Boucherot	13
1.5 Alimentation	13
1.6 Condensateurs de découplage	13
2 Conception sur KiCAD	15
2.1 Schéma	15
2.2 Attribution des empreintes	15
2.3 Agencement et routage	16
2.4 Dernières touches	16
Conclusion	19
Annexes	21
Sources	31

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. HERVÉ BARTHELEMY du laboratoire IM2NP, mon tuteur tout au long de ce projet de fin d'année, et qui m'avait déjà accompagné l'an dernier pour la même occasion. Sa capacité à répondre à mes questions a grandement facilité l'avancement du PPR.

Je souhaite également remercier MME. GLORIA FACCANONI pour l'aide précieuse qu'elle a apporté par son enseignement des bases de \LaTeX et sa disponibilité tout au long de la Licence Renforcée.

Tout ceci est sans oublier le support moral de mes amis qui se reconnaîtront, pendant et avant cette Licence SI, sans qui je ne serais sans doute pas là.

Introduction

Cette année, mon projet de recherche est la réalisation d'un amplificateur audio analogique sur circuit imprimé.

C'est la continuité du projet de l'an dernier où j'avais réalisé un préamplificateur (Fig.2.1), élément qui sert à amplifier la tension d'un signal à la source afin d'augmenter son ratio signal-bruit (SNR en anglais) lors de la transmission.

La différence est qu'un amplificateur sert à alimenter une charge (généralement un haut-parleur ou plus). Son utilité est donc de délivrer un courant important en sortie.

Mon expérience en électronique est limitée, et ma formation de Sciences pour l'Ingénieur n'est en aucun cas suffisante pour concevoir de A à Z un amplificateur. Pour cette raison, je suis parti d'un circuit prototype réalisé sur LTspice par mon tuteur.

La moitié du temps investi dans ce PPR aura été de comprendre le fonctionnement de ce prototype, et l'autre moitié à réaliser le PCB correspondant et ses révisions mineures.

Logiciels utilisés

Au long de ce PPR, je me suis servi majoritairement de deux logiciels : LTspice 24.1.9 et KiCAD 9.0.2.

Le premier permet de réaliser et tester des circuits électroniques, d'où son nom (SPICE : *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis*). Il est disponible sous Windows et MacOS, et fonctionne parfaitement sous Linux à travers Wine/[Winetricks](#).

Le second est un logiciel de CAO dédié à la conception de circuits imprimés (appelés PCB en anglais, pour *Printed Circuit Boards*). KiCAD est publié sous toutes les plateformes, ce qui inclut les [package managers](#) des distributions les plus communes.

1 Étude du circuit sur LTspice

Pour rappel, le schéma le plus basique d'**amplificateur non-inverseur** consiste en un AOP (Amplificateur OPérationnel), un signal sur l'entrée non-inverseuse, avec un rebouclage (*feedback* en anglais) relié à la masse sur l'entrée inverseuse.

Pour un AOP parfait, le courant est nul en entrée et illimité en sortie. C'est ce comportement que l'on essaie de répliquer avec notre circuit en 3 étages.

Le gain en tension du circuit est quasi-proportionnel au ratio des résistances de feedback :

$$\text{Gain} := \frac{V_{\text{OUT}}}{V_{\text{IN}}} = 1 + \frac{R_{F2}}{R_{F1}}$$

Sur le schéma LTspice original, ce gain est de $1 + \frac{45}{1.573} \approx 1 + 28.6 \approx 30$.

1.1 Paires différentielles

Directement à gauche de l'entrée "IN" qui est au centre, on distingue deux paires symétriques, dites différentielles. Un exemple simplifié est visible [ici](#).

Prenons la paire formée par deux transistors NPN sur le **schéma complet**. Leurs deux branches sont jointes à une résistance : une source de courant suffisamment peu variable pour être supposée parfaite.

Si l'un des transistors est davantage passant, le courant dans sa branche augmente, ce qui diminue le courant dans l'autre branche afin de maintenir une somme constante.

Ainsi, la tension au collecteur d'un transistor descend, et monte à l'autre.

Ce système de vases communicants, **particulièrement prononcé lorsqu'on déconnecte les paires différentielles du reste du circuit**, couplé avec des résistances différentes dans les deux branches permet de moduler l'amplitude du signal différentiel et de décaler sa composante continue.

Dans le cas du nœud Z1 (en bleu sur Fig.2.7), on rapproche cette composante de 15 V.

Pour l'autre paire différentielle, on descend le nœud Z2 (en rouge sur Fig.2.7) vers -15 V.

Ces signaux Z1 et Z2 vont ensuite commander leur propre étage d'amplification en tension à travers des paires Sziklai.

1.2 Paires Sziklai

Pour rappel, les transistors tout comme les diodes ne deviennent passants qu'à partir d'un certain seuil de tension. Si l'on veut amplifier un signal sans le déformer, il faut lui ajouter une composante continue supérieure à ce seuil. C'est ce que l'on appelle la polarisation.

Quiconque ayant étudié un minimum d'électronique a de bonnes chances d'avoir déjà rencontré des paires **Darlington**. Ce sont deux transistors de même type mis en cascade. L'avantage d'un tel montage est que son gain, généralement noté β ou h_{FE} est le produit des gains des deux transistors.

Le désavantage est que puisque les transistors sont de même type, leur cascade demande une double polarisation ($\approx 1.2\text{ V}$), ce qui condamne une plus grande gamme de tensions d'entrée.

Le hongrois George Sziklai a pensé à utiliser des transistors de polarité opposée, ce qui ne nécessite qu'une simple polarisation ($\approx 0.6\text{ V}$).

Ainsi, un NPN suivi d'un PNP fonctionne exactement comme un seul NPN de plus grand gain, d'où l'utilité en amplification de tension.

C'est le cas du montage de droite sur la Fig.2.8.

À cet étage, on est passé de quelques millivolts à plusieurs volts.

Il reste à compléter l'amplification en tension avec des transistors de puissance pour ne pas voir cette tension s'écrouler lorsqu'une charge est connectée en sortie "OUT".

1.3 Amplification en courant

Cette partie est fondamentale à un amplificateur en tension, dont le but est de garder une tension constante, peu importe l'impédance de la charge.

Le courant passant dans la dernière branche des paires Sziklai formée par Q7 et Q8 (se référer à Fig.2.9) commande les transistors de puissance Q9 et Q10.

Puisqu'un transistor ne peut être passant que dans un sens, chacun se charge de sa partie du signal : le PNP Q9 **pousse** le courant sortant positif depuis le rail $+15\text{ V}$ et le NPN Q10 **tire** le courant sortant négatif vers le rail -15 V .

C'est ce que l'on appelle une configuration **push-pull**.

Toujours Fig.2.9, la résistance R_N entre les bases des transistors Q7 et Q8 joue sur la polarisation des transistors de puissance en rapprochant plus ou moins les tensions des nœuds Z3 et Z4.

Si l'on ne rapproche pas assez ces nœuds, Q9 et Q10 seront largement au-delà de leur point de polarisation et continuellement passants. En conséquence, un courant très important circulera dans leur branche. La différence de ces courants donnera un signal de sortie parfait, mais les composants de puissance vont chauffer plus que nécessaire. On aura recréé un amplificateur de classe A, les plus gourmands en électricité et réservés à des circuits refroidis en conséquence.

Au contraire, si Z3 et Z4 sont rapprochés trop, voire en court-circuit, chaque transistor ne fera passer que le strict minimum de courant. Le signal de sortie sera atténué et subira une distorsion proche du point 0 V.

Ce phénomène est communément appelé *zero-crossing distortion*. Ce cas est similaire à des amplificateurs de classe B : les plus efficaces énergétiquement parmi les analogiques, mais leur qualité audio est médiocre.

Le *sweet spot* est quand on veille à mener Q9 et Q10 juste au-dessus de leur point de polarisation pour profiter du meilleur des deux mondes : les amplificateurs de classe AB.

La **comparaison** résume les trois cas de figure possibles.

Note : les tensions encadrées en bas de cette capture représentent V_{R_N} . La résistance R_N polarise les deux transistors en même temps, d'où le double "diode drop" (nom couramment donné à la chute de tension de $\approx 0.6\text{ V}$).

Il sera utile de surveiller le courant moyen via un ampèremètre afin de rester dans le régime de fonctionnement AB.

Dans le circuit final, V_{R_N} correspond à la mise en série d'une résistance et d'un potentiomètre. Cette addition permet de corriger le courant affiché par l'ampèremètre sans changer les composants.

1.4 Cellule de Boucherot

On en a maintenant fini avec la structure équivalente à l'AOP, mais il reste encore d'autres éléments importants au circuit.

En sortie, on retrouve ce que l'on appelle une cellule de Boucherot, ou réseau Zobel.

Ce montage résistance + condensateur en série sert à compenser l'impédance de la charge lorsque la fréquence du signal augmente.

En effet, un haut-parleur est assimilable à une bobine de faible résistance R et de réactance $jL\omega$. Cette dernière composante est proportionnelle à la fréquence et son augmentation peut induire des instabilités dans la boucle de retour. Sans correction, la marge de phase de cette boucle diminue et pourrait produire des artéfacts lors de régimes transitoires brutaux.

La cellule de Boucherot est un type de filtre passe-bas qui se débarrasse de ces hautes fréquences afin de ne pas endommager les composants. Sa présence ne modifie pas l'audio puisque sa fréquence de coupure est bien au-delà du domaine audible.

1.5 Alimentation

Pour des raisons de disponibilité du matériel à l'université, nous avons décidé d'alimenter le circuit en $\pm 15\text{ V}$.

Les alimentations $\pm 15\text{ V}$ ou deux $0 \rightarrow 15\text{ V}$ tête à tête sont faciles à mettre en place et ne nécessitent pas de solution sur mesure.

1.6 Condensateurs de découplage

Sur chaque rail de l'alimentation $\pm 15\text{ V}$, deux condensateurs sont reliés à la masse. Leur rôle est de garantir une tension stable aux bornes des transistors lorsque ceux-ci changent d'état rapidement et auraient tendance à faire onduler la tension.

Le gros condensateur électrolytique peut stabiliser la tension longtemps mais répond lentement. Le minuscule condensateur céramique a une inductance interne bien plus faible et est capable de compenser les plus petites variations de tension, au prix d'une capacité plus faible.

1 Étude du circuit sur LTspice

À l'ère des composants montés en surface (CMS en français, SMD en anglais), on est capable de fabriquer des condensateurs d'une capacité suffisante avec la taille et la réponse des plus petits. Mais avoir un couple comme ici est resté une solution plus rentable, vu le coût supérieur des micro-composants de précision.

2 Conception sur KiCAD

2.1 Schéma

Sur KiCAD, la première étape est de **redessiner le circuit**.

Il n'y a pas de compatibilité entre les deux logiciels, donc pas possibilité de convertir le schéma LTspice en *KiCAD schematic*. En théorie, on pourrait s'affranchir de LTspice si seulement la modélisation était visée. Dans ce cas on perdrait la capacité de simuler le circuit pour étudier son fonctionnement.

Ce raccourci est dangereux à prendre puisque KiCAD vérifie seulement si des principes de conception (détaillés plus bas) sont respectés, mais n'assure pas le bon fonctionnement de la carte.

C'est ici la dernière étape où l'on peut modifier les caractéristiques électriques du circuit.

Les transistors de puissance sont remplacés par des terminaux à vis similaires à ceux en entrée/sortie/alimentation, ce qui permettra de raccorder différents composants par câblage externe.

Ainsi, on pourra expérimenter avec d'autres transistors de puissance, et ajouter un ampèremètre en série avec un collecteur afin de surveiller le courant dans cette branche principale.

De la même manière, la résistance de feedback est échangée pour un terminal, ce qui permettra de la changer et ainsi faire varier le gain global du circuit.

On pourrait aussi imaginer utiliser une résistance variable à la place de R_{F2} pour agir sur le volume, mais c'est une fonction déjà endossée par le préamplificateur.

Lorsque le document *schematic* est terminé, on se sert de l'ERC (*Electrical Rules Checker*). C'est un algorithme qui vérifie si tous les principes de conception électrique sont vérifiés pour éviter :

- les courts-circuits,
- les oublis d'alimentation,
- les connections flottantes (pistes non-connectées),
- l'incompatibilité des sous-réseaux (comme une sortie qui alimente une sortie),
- des composants sans référence,
- ...et d'autres erreurs de conception.

2.2 Attribution des empreintes

Le résultat d'un projet sous KiCAD n'est pas le circuit complet mais le PCB sur lequel seront soudés les composants. Une fois que l'on est sûr du design du circuit, on peut

passer à l'attribution des empreintes.

Pour résumer, les empreintes sont les emplacements des composants.

Elles décrivent sa taille, les soudures de ses différentes broches au circuit, les perçages s'il y en a, et des marquages esthétiques.

Selon ces critères, il faut **manuellement** décider quelle empreinte doit être assignée à quel composant du schéma.

C'est à ce moment qu'on va se poser la question de la disponibilité des composants sur des sites marchands tels que Mouser ou **Farnell** afin de ne pas attribuer l'empreinte d'un élément introuvable.

J'en ai profité pour créer une

2.3 Agencement et routage

Une fois les empreintes soigneusement choisies, on peut passer au *PCB editor*, où se passera l'agencement des composants et leur routage.

C'est la dernière étape importante qui déterminera la forme du PCB. Elle consiste à placer tous les éléments tels qu'ils le seront sur le circuit physique, puis les relier pour former le schéma dessiné au début.

Faire naître d'un amas informe d'empreintes une carte qui peut être fabriquée en usine est de mon point de vue la partie la plus divertissante et satisfaisante de tout le projet.

J'ai commencé par distribuer les **composants désordonnés** en pensant à :

- disposer les terminaux à l'extérieur pour des branchements faciles,
- minimiser le nombre de croisements pour éviter les connections passerelles,
- espacer les composants pour ne pas gêner lors du procédé de soudure,
- garder les pistes transportant les signaux pour limiter les perturbations,
- former une structure qui ressemble au *schematic*.

Ensuite vient le routage. Les composants doivent être reliés par des pistes d'une taille adéquate.

Les largeurs minima des pistes et des vias (connections entre les couches) peuvent être calculées avec les **outils** fournis dans KiCAD.

Les signaux en entrée ont les plus petites pistes, et les transistors de puissance sont reliés aux rails d'alimentation par les plus grosses afin d'accommoder le courant plus important qui les traverse.

2.4 Dernières touches

Une fois le routage fait, on peut procéder aux derniers détails du circuit :

- définir les bords de la carte,
- créer un *ground plane* (plan de masse) avec la deuxième couche de la carte où relier toutes les connexions à la masse, ce qui limite le nombre de pistes et rend le circuit plus propre,

- arrondir les coudes formés par les pistes afin d'éviter les effets de réflexion qui apparaissent en hautes fréquences,
- ajouter des *teardrops* (chanfreins qui prennent la forme d'une larme) aux connections pour la même raison et faciliter le processus de gravure,
- ajouter des éléments graphiques tels que des symboles, des notes ou le nom des contributeurs.

La dernière manipulation à faire est exécuter le DRC (*Design Rules Checker*) du *PCB designer*, qui vérifie les bêtises qu'on a pu commettre sur le PCB, un peu comme l'ERC pour le *schematic*.

Finalement, il n'y a plus qu'à **contempler le résultat** des heures de travail acharné.

Conclusion

Bien qu'étudier en détail le fonctionnement du modèle LTspice fourni n'était pas nécessaire à l'achèvement du projet, j'ai trouvé cette expérience très enrichissante. Elle m'a permis d'explorer de nouveaux montages et pratiques dans un domaine qui, de par ma formation, m'étaient quasiment inconnus.

La conception du circuit imprimé n'était pas une première grâce au projet de L1, mais la complexité additionnelle et davantage d'expérience sur KiCAD ont rendu ce PPR tout aussi intéressant.

L'amplificateur est prêt à être exporté, fabriqué, assemblé et testé en conditions réelles. Il est prévu d'adapter un radiateur de récupération pour dissiper la chaleur des transistors de puissance, puis de fabriquer un boîtier pour l'accueillir si le fonctionnement du montage est satisfaisant.

En attendant, on peut déjà l'**observer** ! Cette vue est un rendu 3D en ray-tracing du circuit.

Annexes

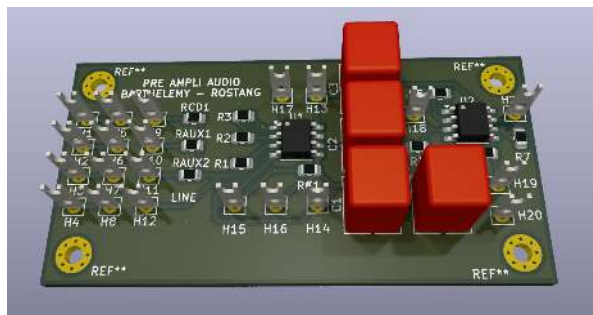
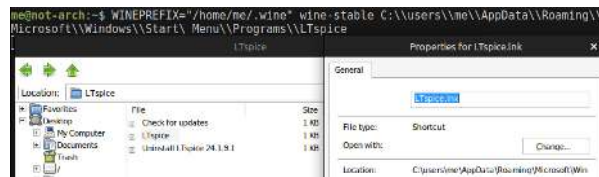


FIGURE 2.1 – Préamplificateur réalisé à l'occasion du PPR 2024



(a) LTspice installé sous Winetricks



(b) KiCAD installé avec apt

FIGURE 2.2 – Installations de LTspice et KiCAD sous Linux

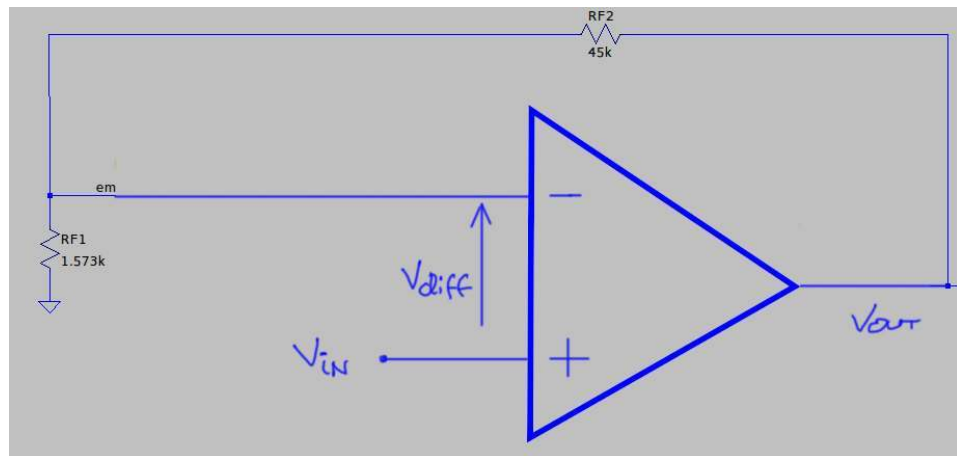


FIGURE 2.3 – Schéma de principe d'un amplificateur avec AOP

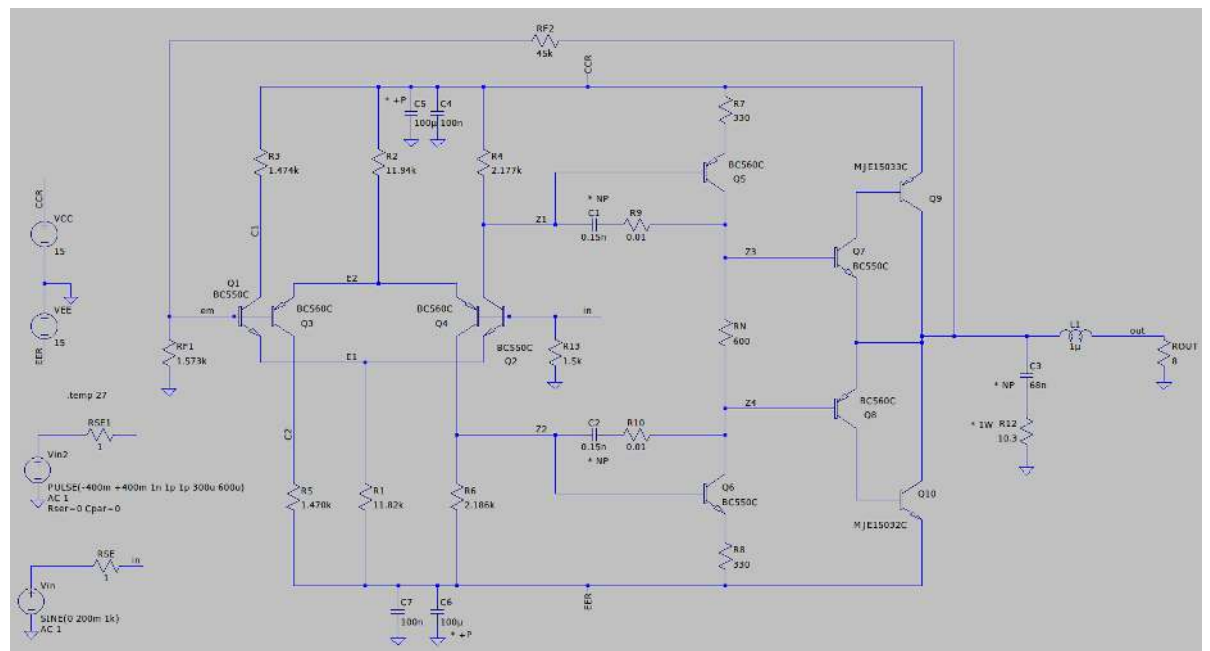


FIGURE 2.4 – Circuit complet sur LTspice

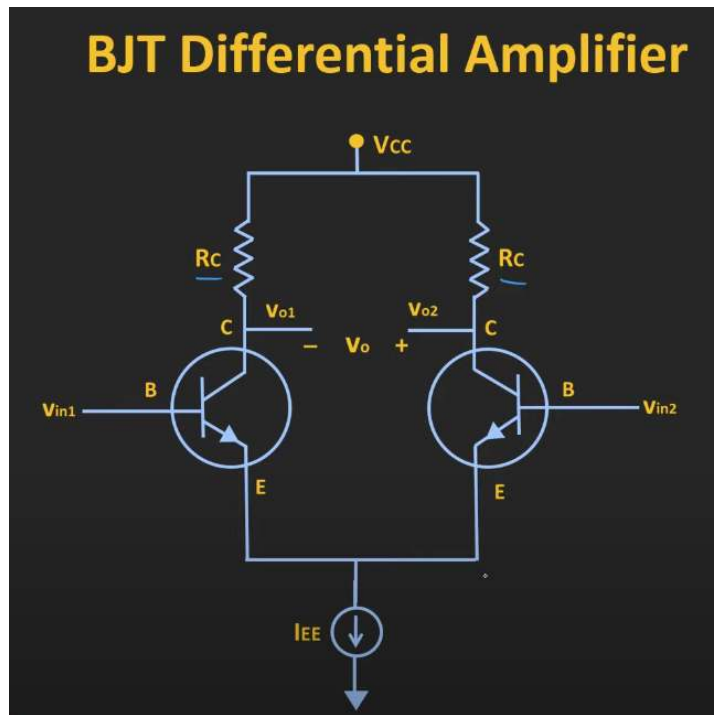


FIGURE 2.5 – Illustration d'une paire différentielle

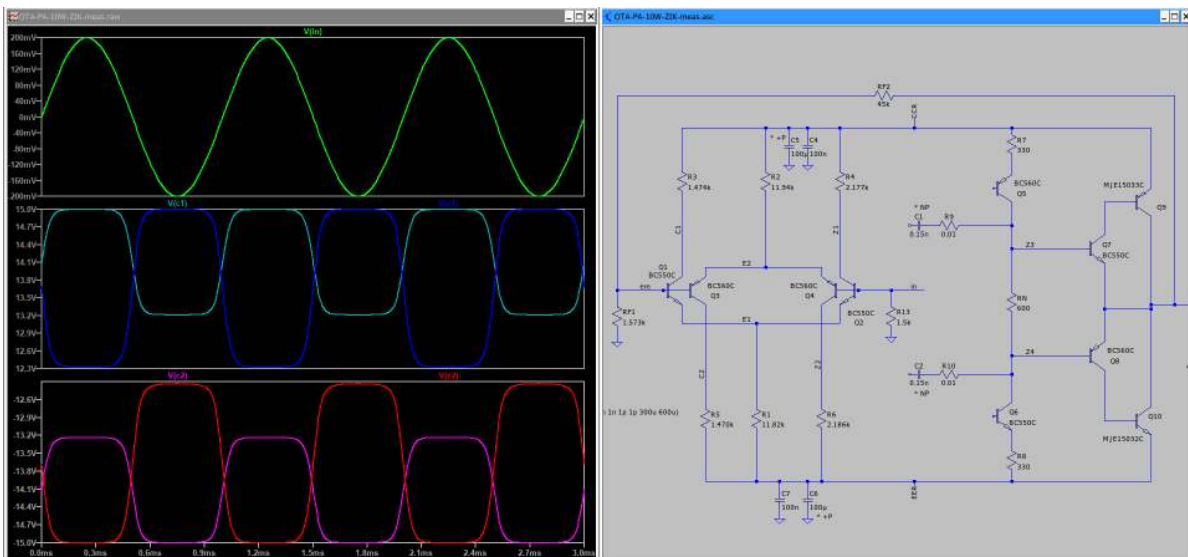


FIGURE 2.6 – Variation des tensions en sortie des paires différentielles dans le circuit ouvert

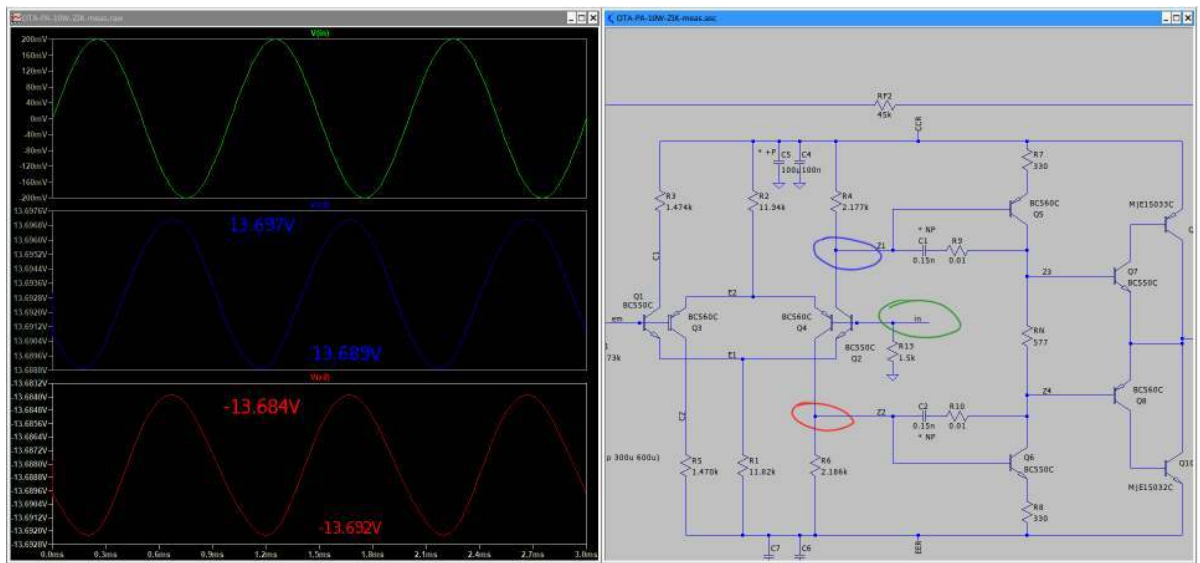


FIGURE 2.7 – Focus sur les tensions des nœuds Z1 et Z2

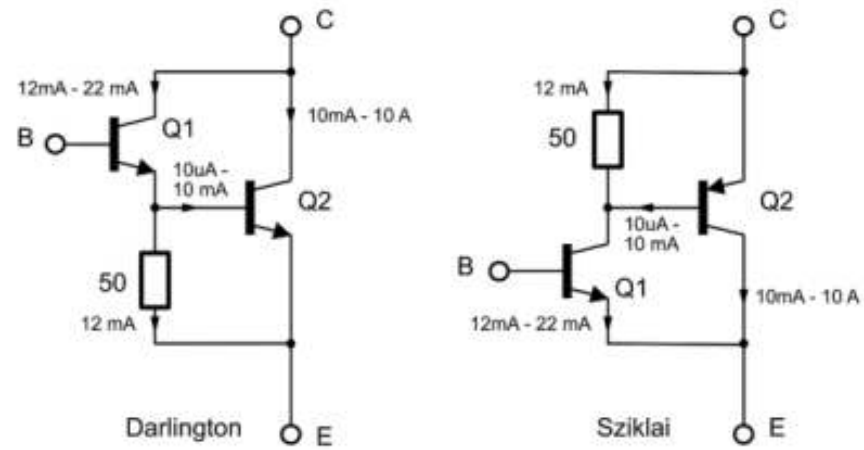


FIGURE 2.8 – Comparaison des paires Darlington et Sziklai

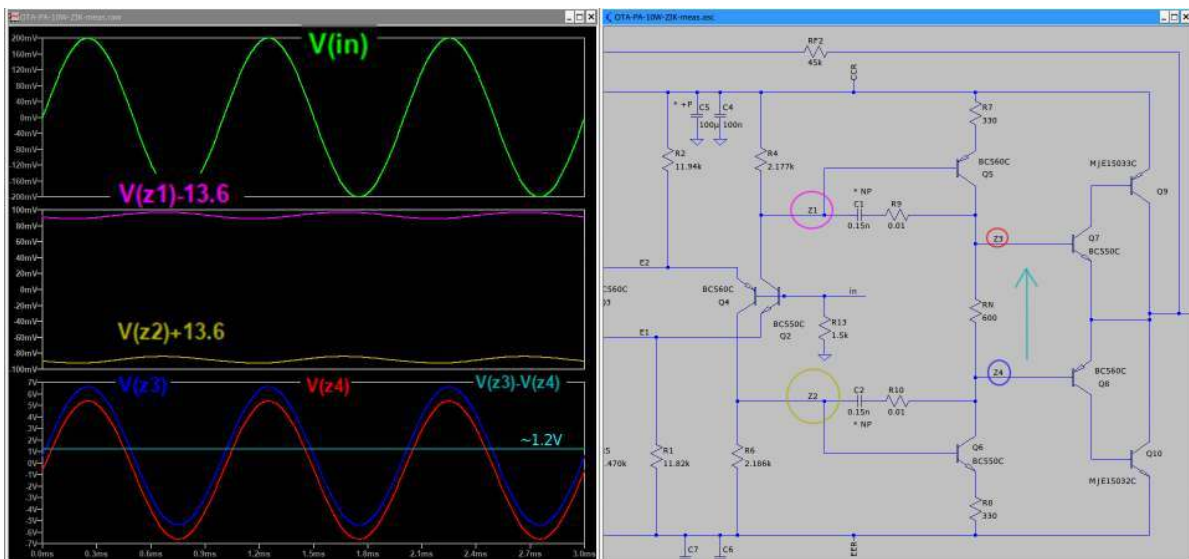


FIGURE 2.9 – Tensions Z1 à Z4, et en cyan la tension aux bornes de la résistance R_N
Le décalage de 13.6 V est purement esthétique afin de voir les sinusoïdes sur le même graphe

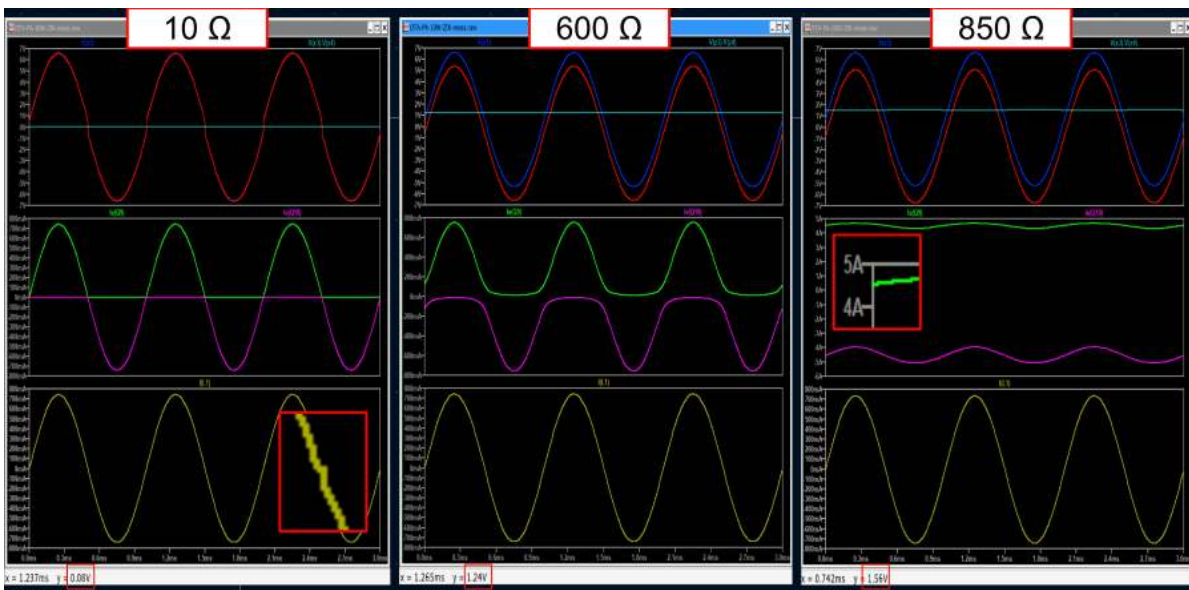


FIGURE 2.10 – Apparence des courants dans la branche de puissance pour différentes valeurs de R_N

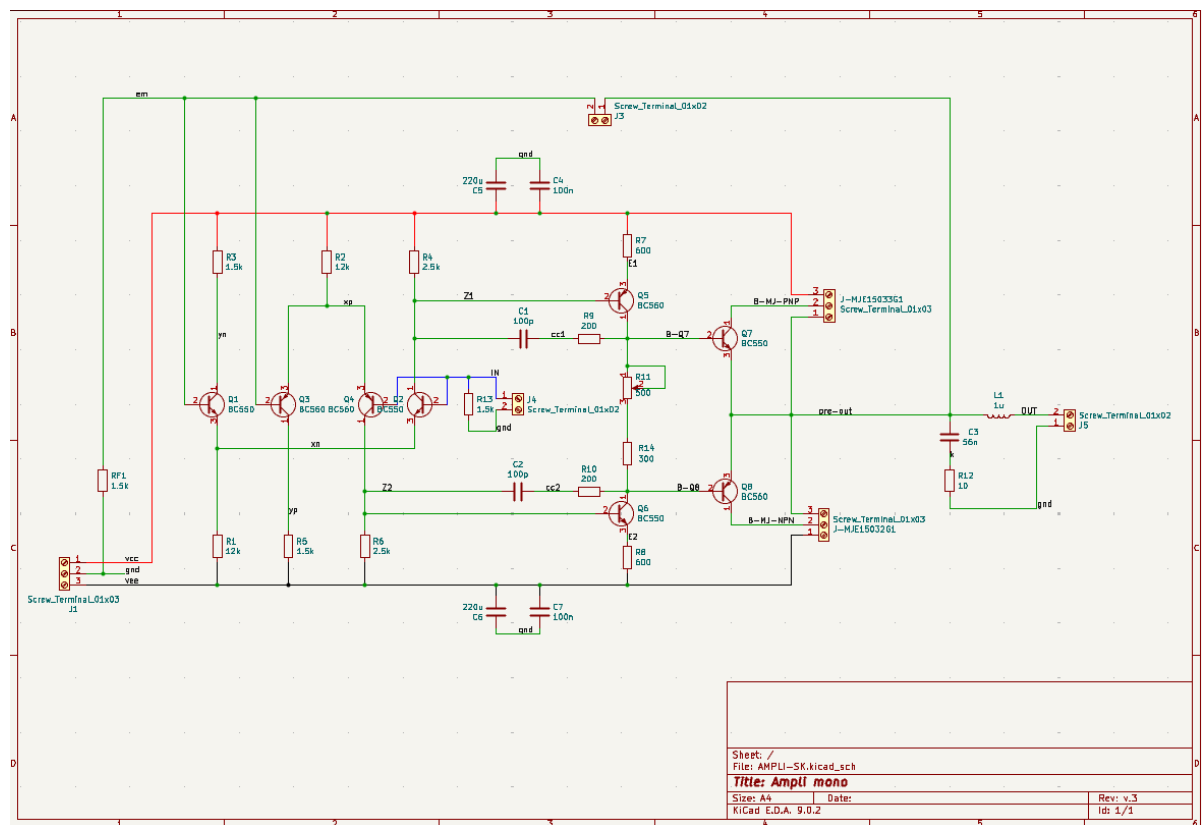
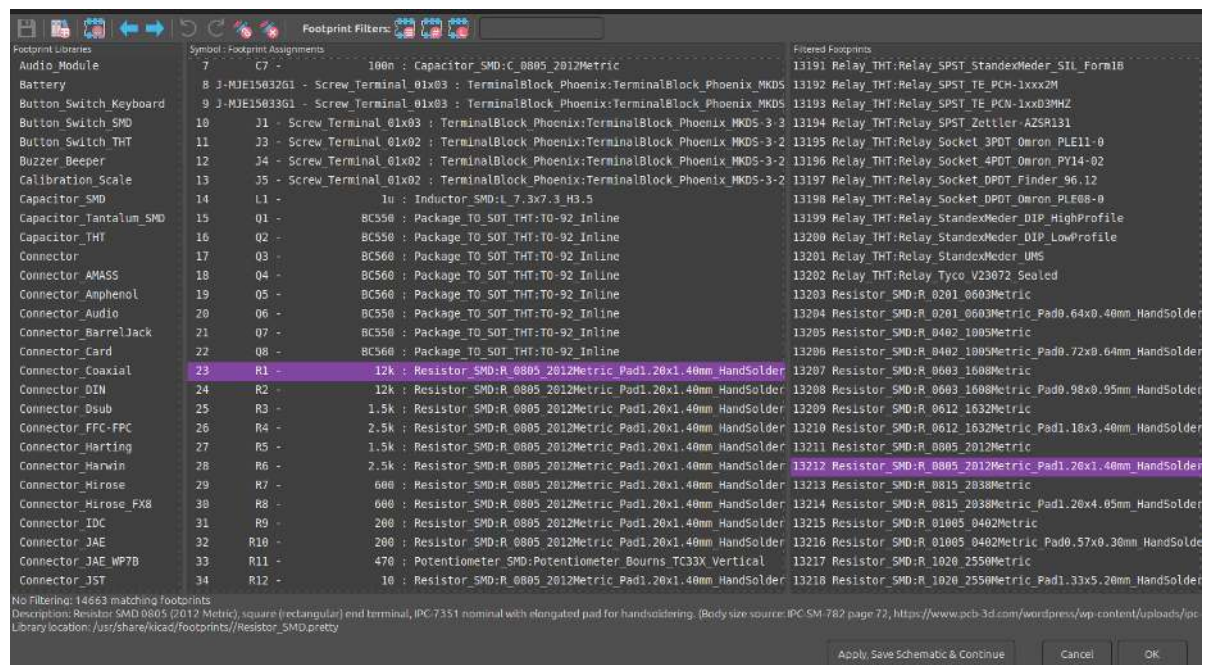
FIGURE 2.11 – Circuit redéfini dans le *KiCAD schematic editor*

FIGURE 2.12 – Fenêtre de sélection des empreintes dans KiCAD

Farnell

Tous les produits ▾ Fabricants ▾ Ressources ▾ Communautés ▾

Accueil / Semiconducteurs - Composants Discrets / Transistors / Transistors Bipolaires / Transistors Junction Bipolaire (BJT) Simple

MJE15032G
Transistor simple bipolaire (BJT), Audio, NPN, 250 V, 8 A, 50 W, TO-220, Traversant

onsemi

11520 En Stock Vous en voulez davantage ?
Livraison sous 1 à 2 jours ouvrables
Commander avant 17h00 pour bénéficier de l'expédition standard

Quantité	Prix (hors TVA)
1+	2,090 €
10+	1,700 €
100+	0,959 €
500+	0,706 €
1000+	0,631 €
5000+	0,618 €

Prix pour : Pièce
1
Minimum: 1 Multiple: 1
2,09 € (sans TVA)

Ajouter au panier

Ajouter au comparateur

FIGURE 2.13 – Page d'un transistor sur le site du grossiste Farnell

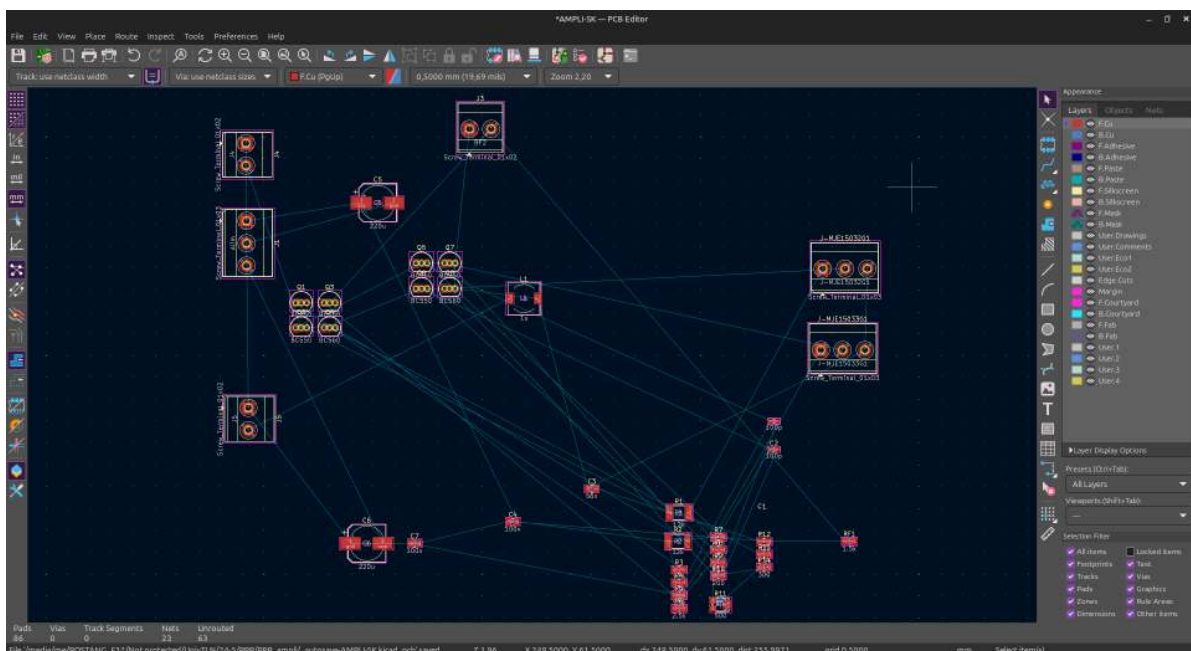


FIGURE 2.14 – Composants étalés sur le PCB designer avant rangement et routage

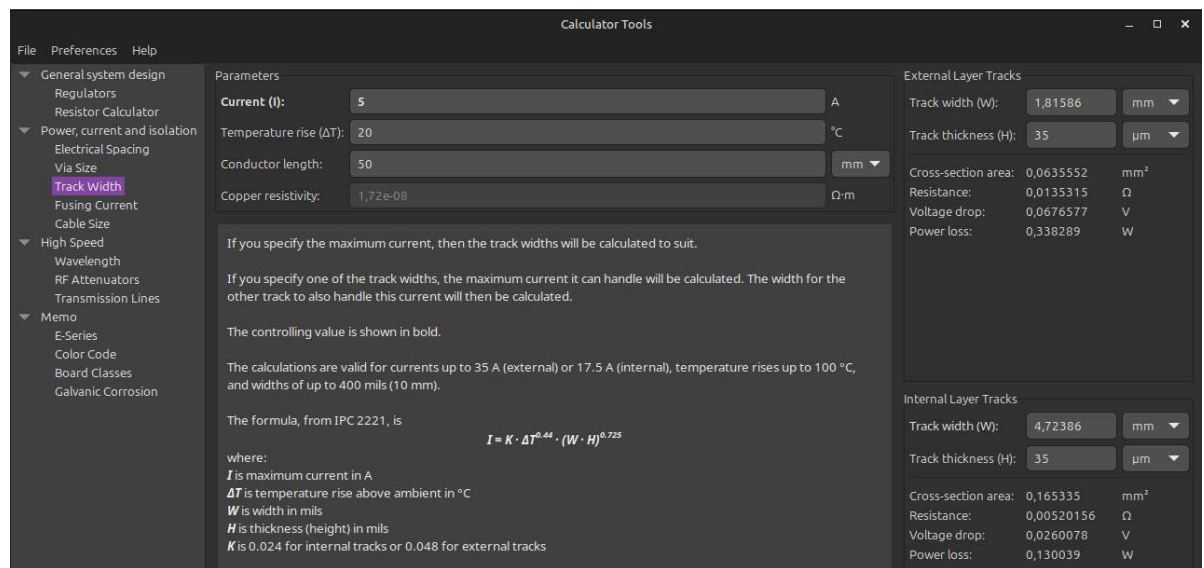


FIGURE 2.15 – Outils de calcul fournis par KiCAD

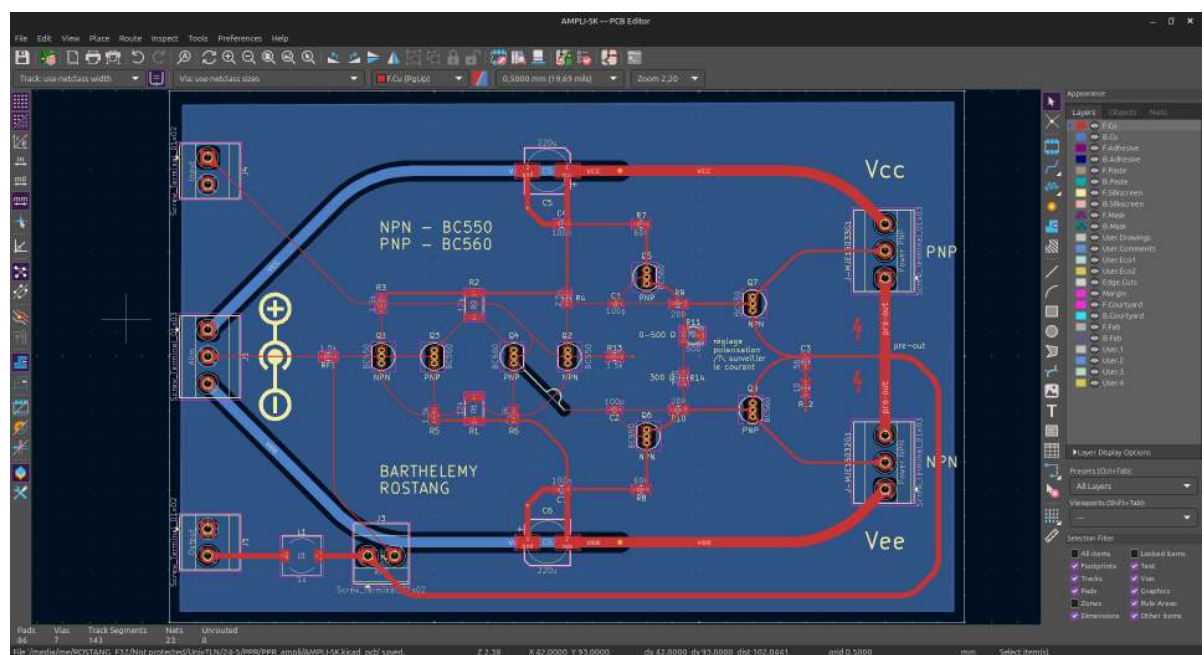


FIGURE 2.16 – Version finale du circuit dans l'éditeur de PCB

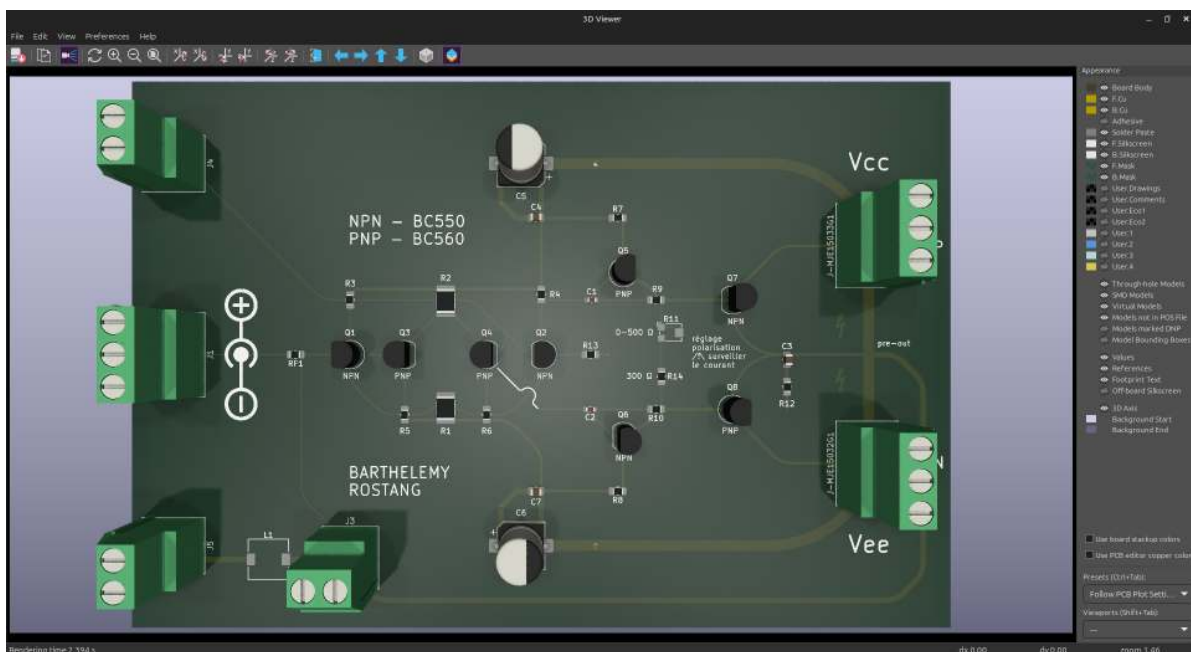


FIGURE 2.17 – Rendu 3D de la carte après fabrication

Sources

Articles :

<https://leachlegacy.ece.gatech.edu/papers/zobel/zobel.pdf>

<https://leachlegacy.ece.gatech.edu/papers/tubeamp/tubeamp.pdf>

YouTube :

Robert Feranec : <<https://www.youtube.com/@RobertFeranec>>

Phil's Lab : <<https://www.youtube.com/@PhilsLab>>

The AudioPhool : <<https://www.youtube.com/@TheAudioPhool>>

JohnAudio Tech : <<https://youtube.com/@johnaudiotech>>

PCB cupid : <<https://www.youtube.com/@pcbcupid>>

Simply Put : <<https://youtu.be/0aBtik-0ve8>>

<<https://youtu.be/yXJADXuWtII>>

<<https://youtu.be/d8ug0NbaIds>>

Images :

<https://www.circuitbasics.com/make-custom-pcb>

<https://www.bathroomspeakers.co.uk/blogs/news/what-are-mono-ceiling-speakers>

<https://boutique.semageek.com/fr/61-breadboard-400-contacts-3006703346176.html>

<https://ieeexplore.ieee.org/author/37269236100>

<https://electronics.stackexchange.com/questions/330588/a-confusion-about-the-formula-for-transistor-vbe-ic-characterisitcs>

<https://circuitcellar.com/resources/darlington-vs-sziklai-pair>

<https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-coil/inductors-and-inductor-coils.html>