

# Générateur de son



## EA113 - Projet d'électronique analogique

25 mai 2025

**Auteurs :**

Mattéo BINET

Alexandre BROMET



# Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introduction</b>                               | <b>1</b>  |
| <b>1 Cahier des Charges</b>                       | <b>1</b>  |
| <b>2 Générateur de modulation NE555</b>           | <b>2</b>  |
| <b>3 Adaptation du signal généré par le NE555</b> | <b>2</b>  |
| <b>4 Voltage Controlled Oscillator (VCO)</b>      | <b>3</b>  |
| 4.1 Comparateur à hystérésis . . . . .            | 4         |
| 4.2 Multiplieur . . . . .                         | 5         |
| 4.3 Intégrateur . . . . .                         | 7         |
| <b>5 Adaptation du signal sortant du VCO</b>      | <b>8</b>  |
| <b>Conclusion</b>                                 | <b>9</b>  |
| <b>Annexe</b>                                     | <b>10</b> |



## Introduction

Ce rapport présente l'étude théorique du générateur de son conçu dans le cadre du projet EA113. L'objectif est de produire un signal audio modulé en fréquence à l'aide d'un oscillateur commandé en tension, selon un cahier des charges précis. L'analyse porte sur la conception des différents blocs fonctionnels, le choix et le dimensionnement des composants, ainsi que la validation par simulation et mesures.

## 1 Cahier des Charges

Le système à concevoir doit permettre la génération d'un signal sonore destiné à être diffusé sur un haut-parleur via un amplificateur audio. Le signal de sortie sera de forme triangulaire, avec une fréquence variant périodiquement entre deux valeurs extrêmes notées  $F_{\text{MIN}}$  et  $F_{\text{MAX}}$ , selon une modulation en fréquence (FM) de type wobulation.

Les principales exigences du cahier des charges sont les suivantes :

- Forme du signal : triangulaire, périodique et symétrique.
- Fréquences extrêmes :  $F_{\text{MIN}} = 100 \text{ Hz}$ ,  $F_{\text{MAX}} = 1500 \text{ Hz}$  (valeurs à adapter selon l'effet sonore choisi).
- Type de modulation : variation pseudo-linéaire ou binaire, avec un signal modulant  $V_{\text{mod}}$  de fréquence faible (de l'ordre du hertz).
- Rapport cyclique de la modulation : adapté selon l'effet recherché (montée lente et descente rapide pour une sirène, par exemple).
- Amplitude du signal de sortie : ajustable, de 0 à environ 100 mV, compatible avec l'entrée de l'amplificateur.
- Alimentation : double alimentation symétrique  $\pm 15 \text{ V}$ .

Le circuit doit être robuste, stable et répondre aux contraintes de dimensionnement en tenant compte des tolérances des composants. Sa conception doit également permettre une intégration simple sur une carte imprimée (PCB).

## 2 Générateur de modulation NE555

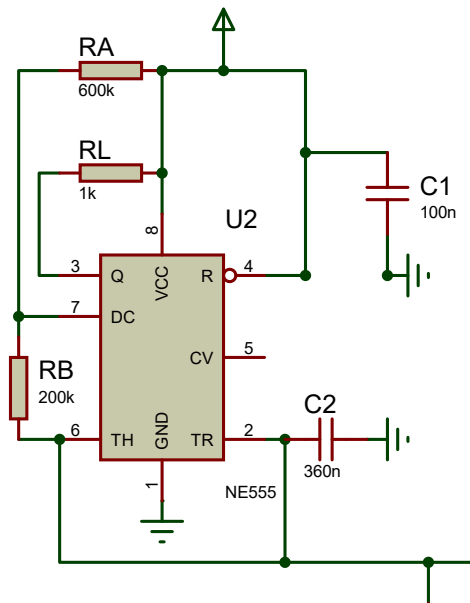


FIGURE 1 – Schématique Proteus du générateur de modulation NE555

- $C_2 = 360 \text{ nF}$
- $R_A = 600 \text{ k}\Omega$
- $R_B = 200 \text{ k}\Omega$

La tension du signal de sortie est un signal triangle, variant entre 5 V et 10 V avec un temps de montée de 80% d'une période. De plus la fréquence de ce signal est de 4 kHz.

## 3 Adaptation du signal généré par le NE555

L'adaptation du signal généré par le NE555 est importante, car elle permet de s'affranchir des limitations de ce composant. Le niveau de tension du signal doit être abaissé, et le signal rendu négatif afin de favoriser le bon fonctionnement des étages suivants.

Pour obtenir une fréquence minimale de  $f_{\min} = 350 \text{ kHz}$  et une fréquence maximale de  $f_{\max} = 850 \text{ kHz}$ , il faut que la tension de modulation varie entre :

$$V_{\text{mod}_{\min}} = -3.5 \text{ V} \quad \text{et} \quad V_{\text{mod}_{\max}} = -8.5 \text{ V}$$

On souhaite alors réaliser une transformation affine de la forme :

$$V_{\text{mod}} = a \cdot V_{\text{mod}_1} + b$$

avec les coefficients suivants :

$$a = -1 \quad \text{et} \quad b = 2 \text{ V}$$

Étant donné que  $a < 0$ , un amplificateur opérationnel inverseur est utilisé. Après calculs, les valeurs des composants nécessaires sont :

- $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$
- $E_{th} = \frac{b}{1-a} = 1\text{ V}$

Enfin, un AOP monté en suiveur de tension est placé en amont du premier AOP afin d'adapter l'impédance entre l'étage de sortie du NE555 et l'étage d'adaptation.

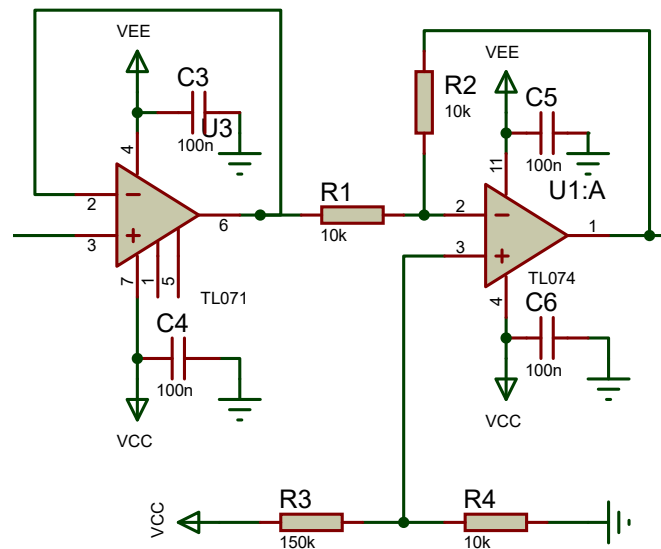


FIGURE 2 – Schématique Proteus de l'adaptation du signal de sortie du NE555

## 4 Voltage Controlled Oscillator (VCO)

Le VCO constitue le cœur du générateur de son, car il permet de convertir une tension de commande  $V_{mod}$  en une fréquence de sortie  $F$ . Il s'agit d'un oscillateur triangulaire dont la fréquence varie proportionnellement à l'amplitude de la tension appliquée. Cette variation permet de moduler le signal audio de façon contrôlée, en respectant les caractéristiques du son à produire (sirène, alarme, etc.).

Le montage repose sur une architecture classique composée d'un comparateur à hystérésis et d'un intégrateur. Le comparateur fixe les seuils de commutation, tandis que l'intégrateur génère la forme triangulaire. Pour rendre le système sensible à  $V_{mod}$ , une fonction de multiplication est insérée entre les deux blocs, ce qui permet d'ajuster dynamiquement le courant d'intégration, et donc la fréquence.

Pour ce faire, le VCO est composé de trois parties : le comparateur à hystérésis, le multiplieur et l'intégrateur, avec une rétroaction entre la sortie de l'intégrateur et l'entrée du comparateur.

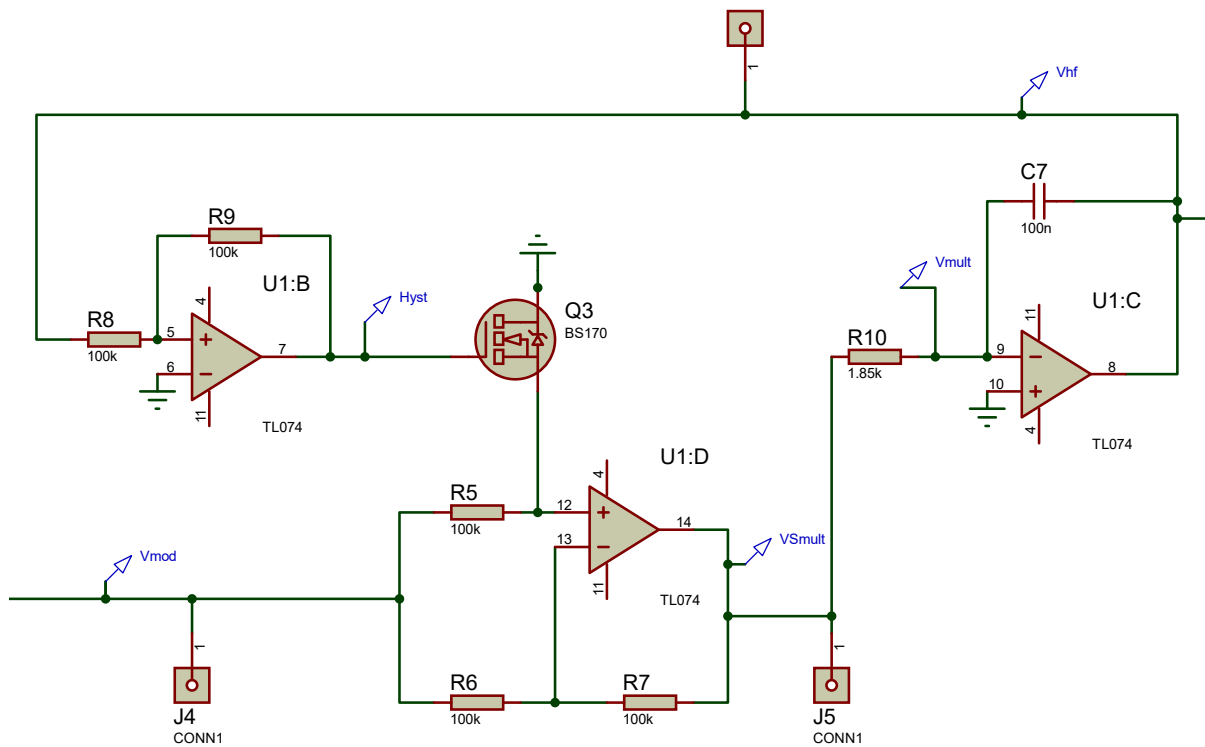
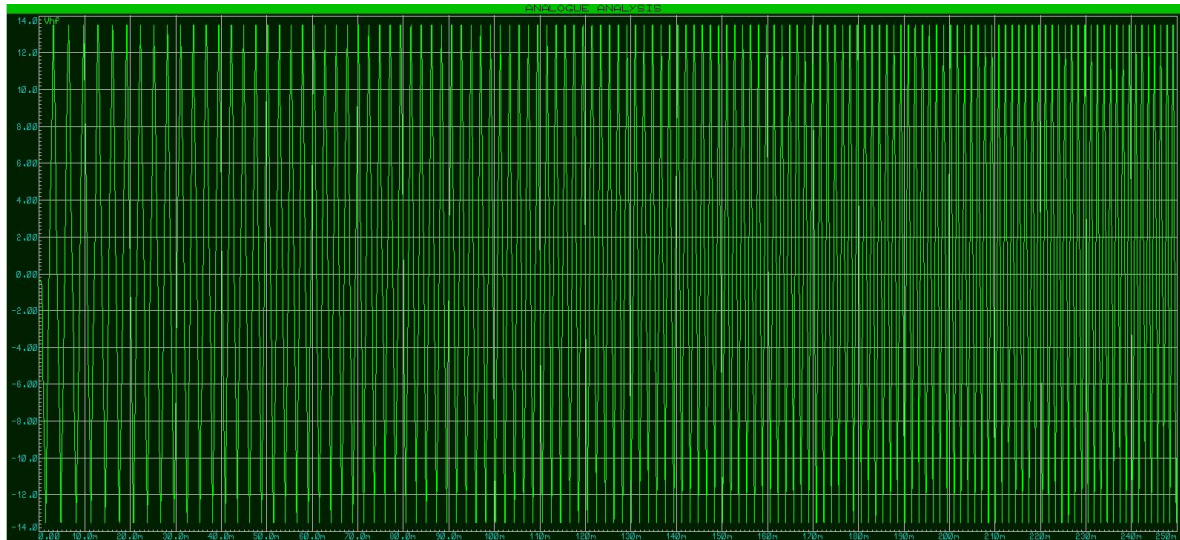


FIGURE 3 – Schématique Proteus du VCO

FIGURE 4 – Simulation de  $V_{hf}(t)$ 

Graphiquement,  $F_{min} = 350 \text{ Hz}$  et  $F_{max} = 850 \text{ Hz}$ , ce qui correspond aux attentes.

#### 4.1 Comparateur à hystérésis

Le comparateur à hystérésis détermine les seuils de commutation du signal triangulaire. Il compare la tension de sortie de l'intégrateur à deux seuils  $+V_H$  et  $-V_H$ , définissant ainsi une bande de commutation. Lorsqu'un seuil est atteint, la sortie bascule instantanément.



entre  $+V_{\text{sat}}$  et  $-V_{\text{sat}}$ , générant une commande pour inverser la pente du signal triangulaire via le multiplieur.

La tension d'entrée devra donc franchir  $+V_H$  ou  $-V_H$  pour provoquer une commutation. Ces seuils déterminent ainsi l'amplitude crête du signal triangulaire et participent directement à la définition de sa période.

La fréquence d'oscillation du VCO peut être exprimée, en fonction de la tension de modulation  $V_{\text{mod}}$ , des composants  $R$  et  $C$ , et du seuil  $V_H$ , par la relation :

$$f = \frac{V_{\text{mod}}}{4R_{10}C_7V_H} \quad (1)$$

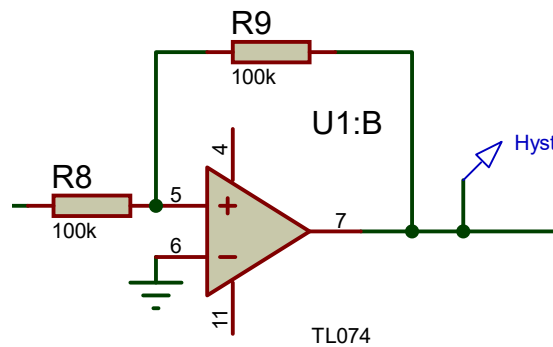


FIGURE 5 – Schématique Proteus du comparateur à hystérésis

Le seuil  $V_H$  est défini par le pont diviseur de la contre-réaction positive :

$$V_H = \frac{R_8}{R_9} \cdot V_{\text{sat}} \quad (2)$$

Dans notre dimensionnement, nous avons choisi  $R_8 = R_9 = 100 \text{ k}\Omega$ , donc  $V_H = V_{\text{sat}}$  pour simplifier les valeurs des composants. Ce choix permet donc de laisser le réglage de  $f$  à  $R_{10}$  et  $C_7$ .

## 4.2 Multiplieur

Le multiplieur a pour rôle de convertir la sortie  $\pm V_{\text{sat}}$  du comparateur à hystérésis en une tension  $\pm V_{\text{mod}}$  proportionnelle à la tension de modulation. Cette opération permet de rendre la pente du signal triangulaire, et donc la fréquence d'oscillation, dépendante de  $V_{\text{mod}}$ .

Le circuit utilisé repose sur un amplificateur opérationnel associé à quatre résistances, dont l'une est substituée par un interrupteur commandé (transistor BS170). L'expression du gain est donnée par :

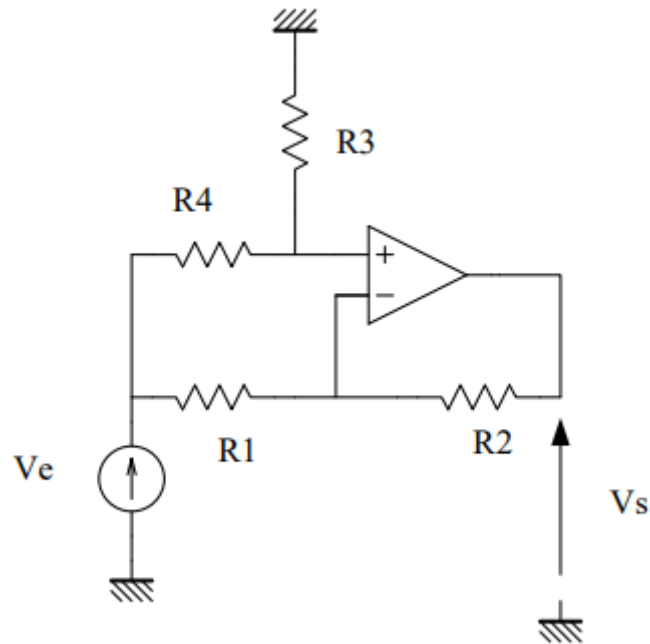


FIGURE 6 – Schéma du multiplieur

$$A = \frac{V_s}{V_e} = \frac{R_3(R_2 + R_1) - R_2(R_3 + R_4)}{R_1(R_3 + R_4)} \quad (3)$$

Avec  $R_1 = R_2 = R_4 = R$ , alors on a :

$$A = \frac{RR_3 - R^2}{RR_3 + R^2} \quad (4)$$

Lorsque  $R_3 = 0 \text{ V}$ ,  $A = -1$  et lorsque  $R_3 \rightarrow \infty$ ,  $A \rightarrow 1$ .

Pour avoir un multiplieur  $\pm 1$ , il faut que  $R_3$  soit un interrupteur. Un NMOS est utilisé pour l'interrupteur.

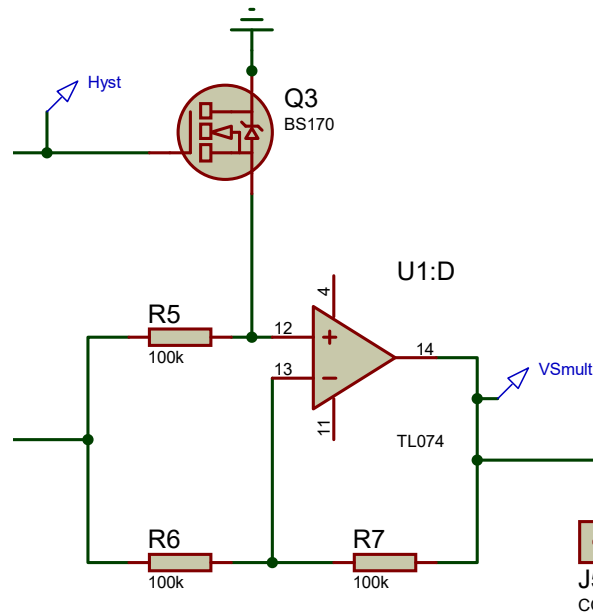
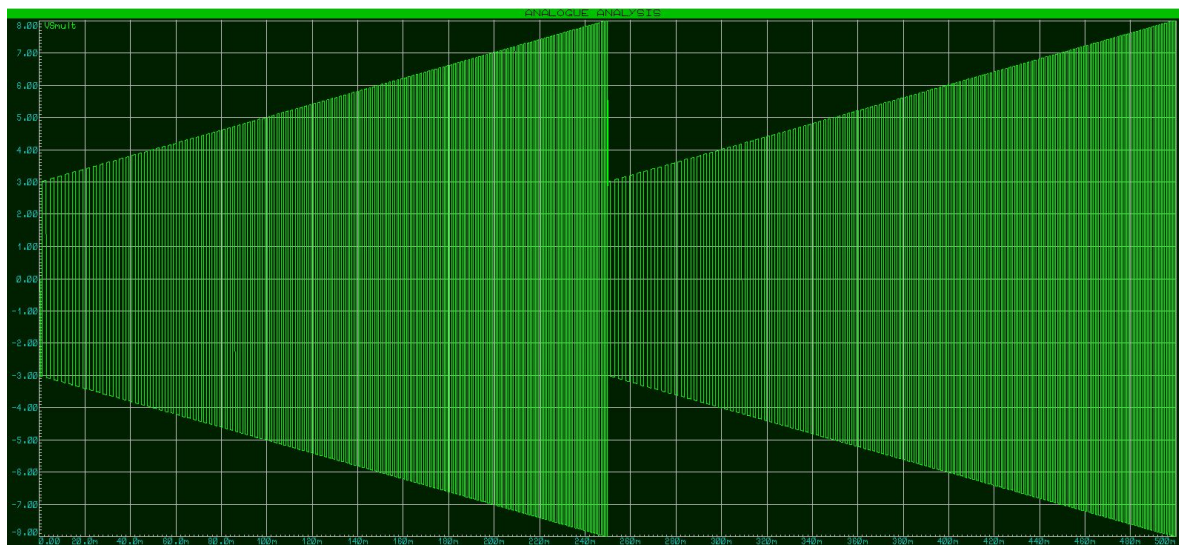


FIGURE 7 – Schématique Proteus du multiplieur

FIGURE 8 – Simulation de  $V_{Smult}(t)$ 

### 4.3 Intégrateur

L'intégrateur a pour rôle de transformer le signal issu du multiplieur, de la forme  $\pm V_{mod}$ , en un signal triangulaire  $\pm V_{HF}$ , dont la fréquence dépend directement de  $V_{mod}$ . Dans notre cas, cette fréquence varie de 350 Hz à 850 Hz.

Le circuit de l'intégrateur est constitué d'une résistance en série avec l'entrée inverseuse d'un amplificateur opérationnel, et d'un condensateur connecté en parallèle entre la sortie et l'entrée inverseuse, réalisant ainsi une intégration temporelle du signal d'entrée.

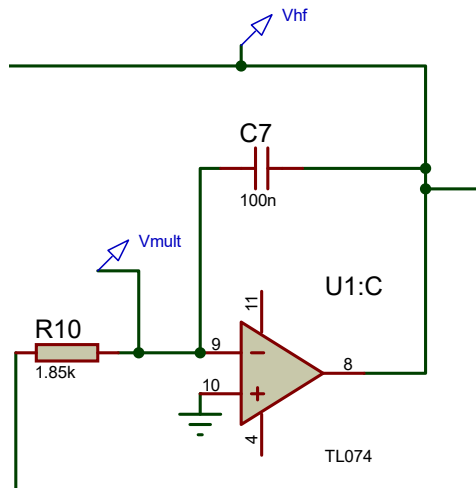


FIGURE 9 – Schématique Proteus de l'intégrateur

La fréquence du signal triangulaire obtenu en sortie s'exprime selon la relation suivante :

$$f = \frac{1}{4R_{10}C_7 \left( \frac{R_8}{R_8 + R_9} \right) V_{\text{sat}}} \cdot |V_{\text{mod}}|$$

où :

- $R_{10}$  est la résistance d'entrée de l'intégrateur,
- $C_7$  est le condensateur d'intégration,
- $V_{\text{sat}}$  est la tension de saturation du comparateur,
- $R_8$  et  $R_9$  sont les résistances du comparateur à hystérésis (voir section 4.1).

Afin que la fréquence varie entre 350 Hz et 850 Hz pour une amplitude de modulation  $|V_{\text{mod}}|$  comprise entre 3.5 V et 8.5 V, nous avons choisi les valeurs suivantes :

$$C_7 = 100 \text{ nF} \quad \text{et} \quad R_{10} = 1.85 \text{ k}\Omega$$

## 5 Adaptation du signal sortant du VCO

Le signal de sortie du VCO varie entre  $\pm V_{\text{HF}}$ . Sachant que  $V_{\text{HF}}$  est de quelques volts et que le générateur de son est branché à un amplificateur audio, sans adaptation du signal de sortie du VCO, le son généré serait beaucoup trop fort.

Cette adaptation permet de fixer une tension maximale de sortie à une centaine de millivolts. Elle permet également de régler manuellement la tension de sortie grâce au potentiomètre présent sur le circuit.

Le circuit d'adaptation est un diviseur de tension constitué d'une résistance fixe  $R_{11}$  et d'un potentiomètre  $R_{V1} = 2 \text{ k}\Omega$ , placé en parallèle avec l'entrée de l'amplificateur, dont l'impédance est  $R_{\text{in}} = 47 \text{ k}\Omega$ .

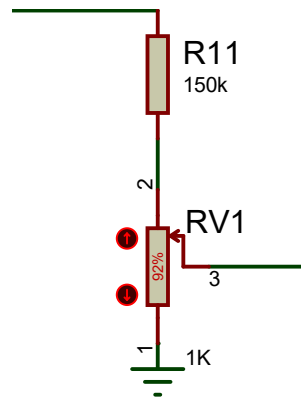


FIGURE 10 – Schématique Proteus de l'adaptation du signal de sortie du VCO

L'expression du rapport de division s'écrit :

$$\frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{CC}}} = \left( \frac{R_{V1} \cdot R_{\text{in}}}{R_{V1} + R_{\text{in}}} \right) \cdot \frac{1}{\left( \frac{R_{V1} \cdot R_{\text{in}}}{R_{V1} + R_{\text{in}}} + R_{11} \right)} \quad (5)$$

On choisit alors  $R_{11} = 47 \text{ k}\Omega$  (erreur dans le schématique) afin que le signal de sortie varie entre 0 mV et 150 mV.

## Conclusion

Ce projet EA113 nous a permis de concevoir, simuler, réaliser et tester un générateur de son répondant à un cahier des charges précis. Grâce aux simulations sous PROTEUS, nous avons validé nos choix techniques avant la fabrication du circuit imprimé.

La réalisation pratique du PCB, suivie des tests et mesures, a confirmé le bon fonctionnement de l'amplificateur, malgré quelques ajustements nécessaires en cours de montage. Ce projet nous a permis de mieux comprendre les enjeux de la conception analogique, de la théorie à l'application concrète.

## Annexe

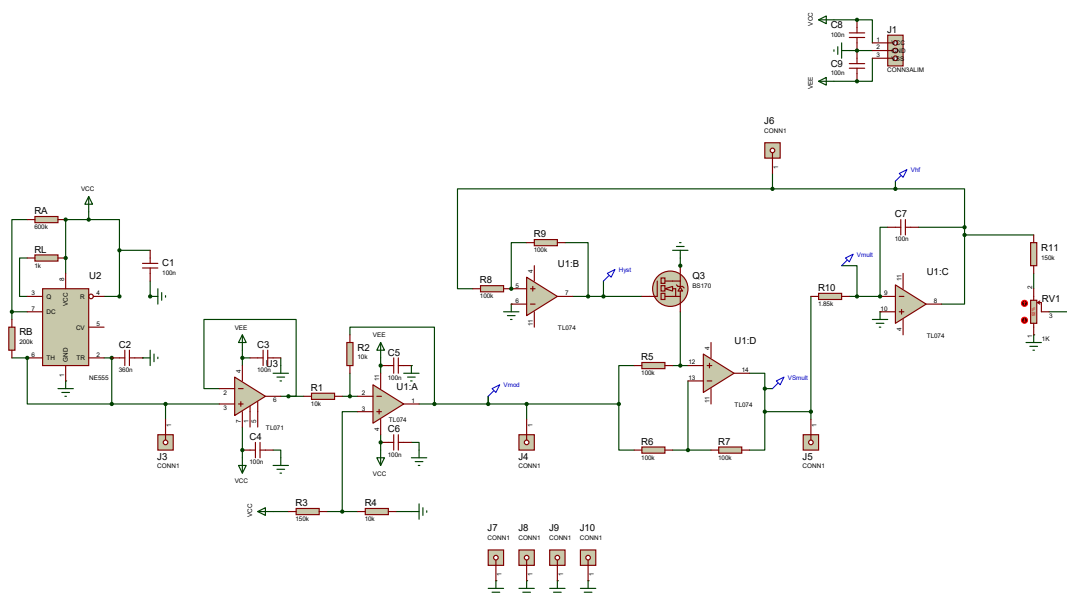


FIGURE 11 – Schématique Proteus du circuit

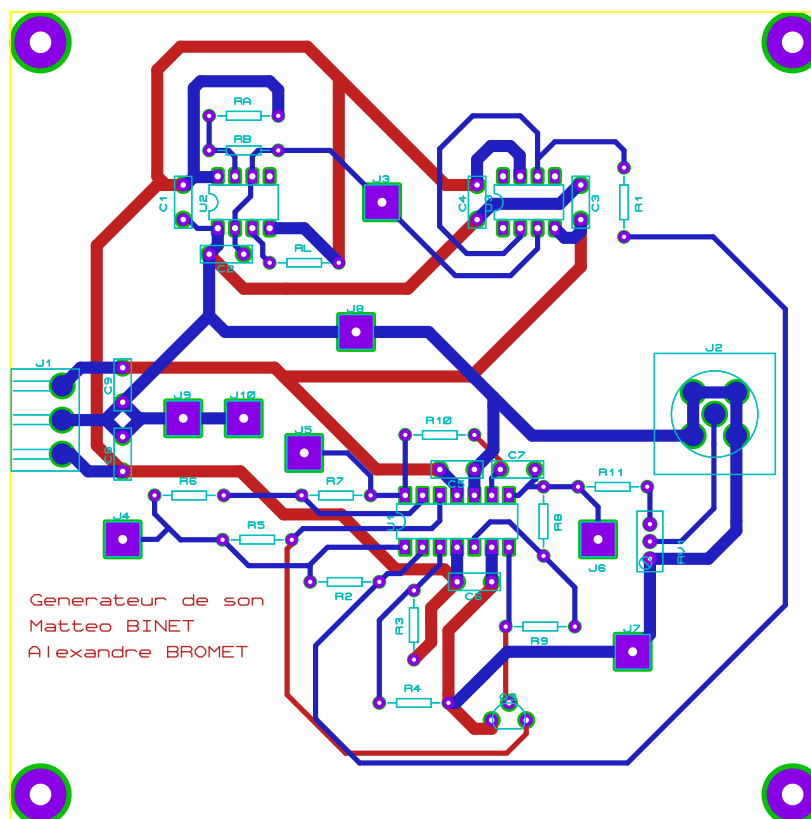


FIGURE 12 – Layout du circuit

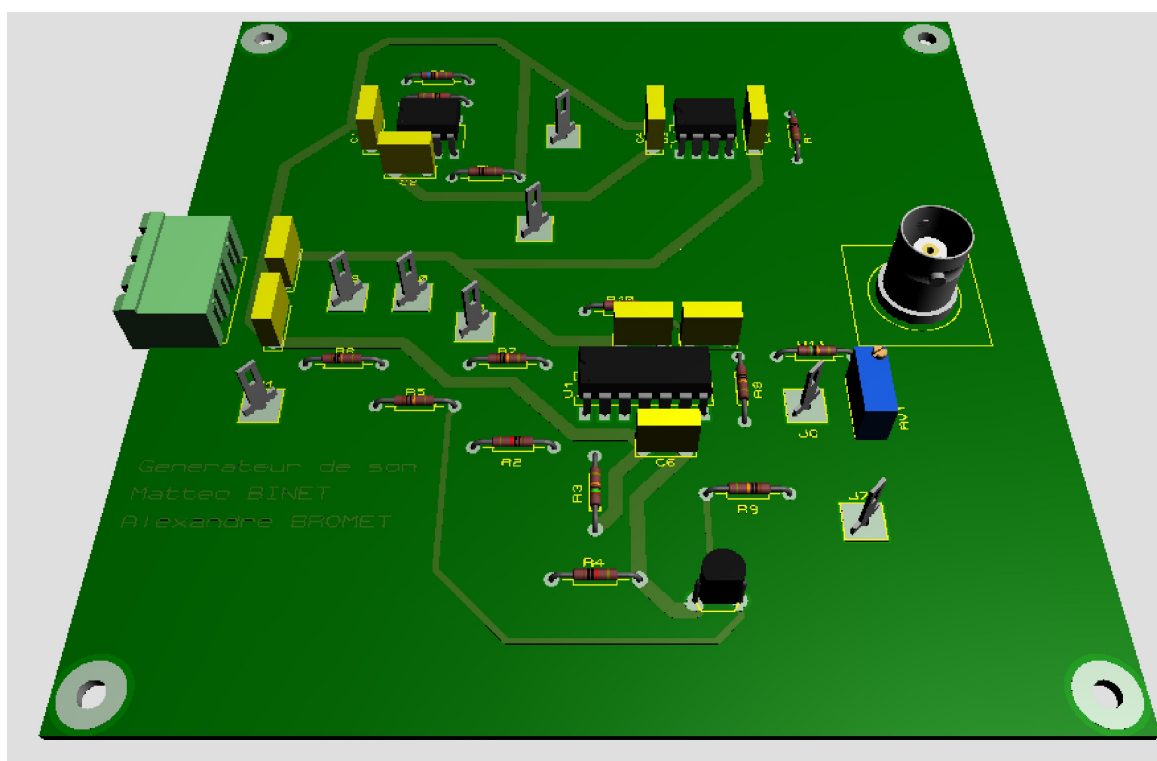


FIGURE 13 – Modélisation 3D Top

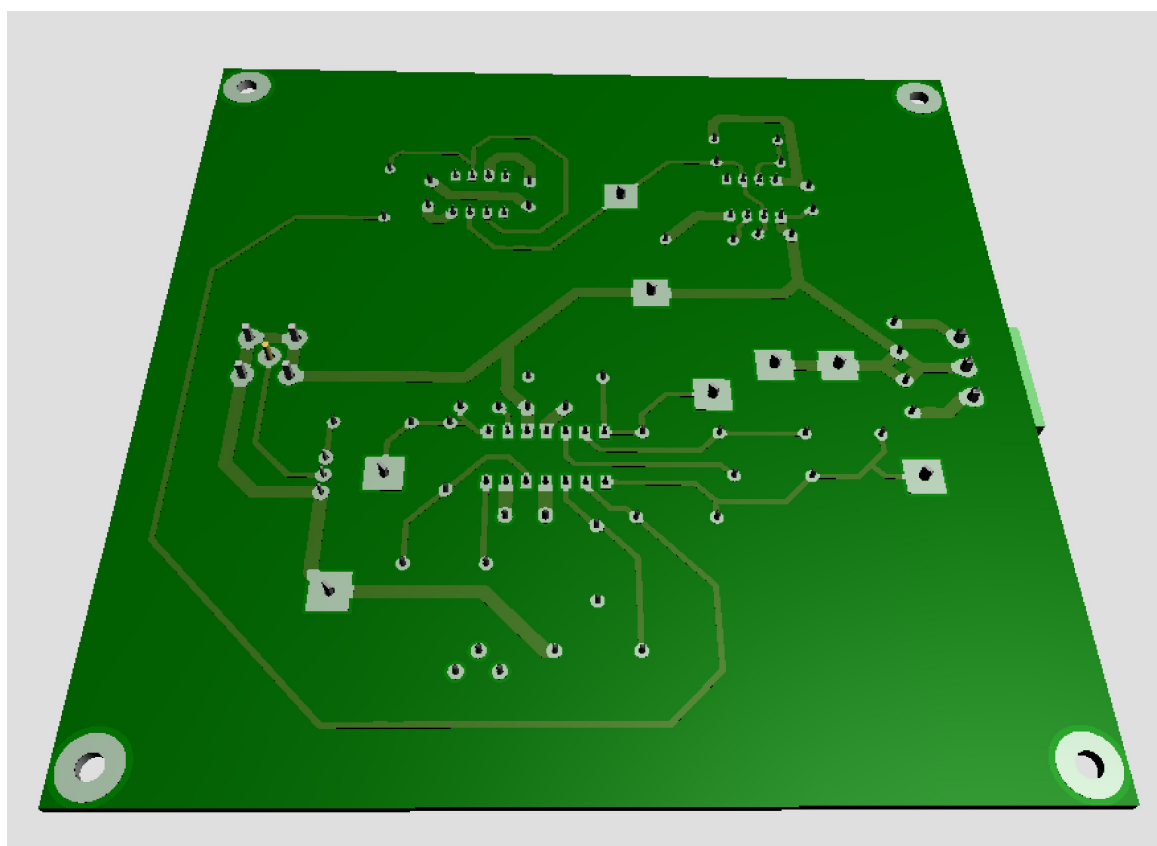


FIGURE 14 – Modélisation 3D Bottom

## Bill Of Materials for VCO

**Design Title** VCO  
**Author**  
**Document Number**  
**Revision**  
**Design Created** vendredi 4 avril 2025  
**Design Last Modified** vendredi 25 avril 2025  
**Total Parts In Design** 38

| 38 =PACKAGE |                          |              |           |
|-------------|--------------------------|--------------|-----------|
| Quantity    | References               | PCB package  | Value     |
| 8           | C1,C3,C4,C5,C6,C7,C8,C9  | CAP20B_E     | 100n      |
| 1           | C2                       | CAP20B_E     | 360n      |
| 1           | J1                       | BORNIER3_H_E | CONN3ALIM |
| 1           | J2                       | BNC_B        | BNC       |
| 8           | J3,J4,J5,J6,J7,J8,J9,J10 | CN1_A        | CONN1     |
| 1           | Q3                       | TO92_E       | BS170     |
| 3           | R1,R2,R4                 | RES40        | 10k       |
| 2           | R3,R11                   | RES40        | 150k      |
| 5           | R5,R6,R7,R8,R9           | RES40        | 100k      |
| 1           | R10                      | RES40        | 1.85k     |
| 1           | RA                       | RES40        | 600k      |
| 1           | RB                       | RES40        | 200k      |
| 1           | RL                       | RES40        | 1k        |
| 1           | RV1                      | TRIM_B       | 1K        |
| 1           | U1                       | DIP14_3E     | TL074     |
| 1           | U2                       | DIP8_3E      | NE555     |
| 1           | U3                       | DIP8_3E      | TL071     |
| Sub-totals: |                          |              |           |
| Totals:     |                          |              |           |

vendredi 25 avril 2025 12:28:04

FIGURE 15 – Bill of Materials