Électronique
TD Amplification

April 29, 2020

Introduction

L'objectif est ici de concevoir un amplificateur audio, avec le cahier des charges suivant:

- Le signal d'entrée $v_e(t)$ est un signal audio dans la gamme de fréquences $[20 \text{ Hz}, 20 \text{ kHz}]$.
- La résistance d'entrée R_e du circuit doit être égale à 100 kΩ.
- La charge est un haut-parleur de résistance $R_L = 4\ \Omega$
- La puissance de sortie doit être de 20 W pour un signal d'entrée de 100 $\mathrm{mV_{eff}}$.
- La source de puissance est symétrique avec V=15 V.

1 Solution 1: Amplificateur opérationnel

Nous allons tout d'abord vérifier la possibilité d'utiliser un amplificateur opérationnel (A.O.) dans un montage non-inverseur (voir la figure 1). Nous supposons pour cela que l'A.O. est idéal et que le courant maximal de sortie dans le régime linéaire est i_a^{max}=20 mA (valeur typique).

La capacité C est utilisée pour supprimer la composante continue (DC) de V_e et ne laisser passer que $v_e(t)$. Le circuit constitué par C et R_3 est un filtre.

1. Quelle est la fonction de transfert $H(j\omega) = v_a/v_e$?

$$\boxed{H(j\omega) = \frac{v_a}{v^+}.\frac{v^+}{v_e} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{j\omega R_3 C}{1 + j\omega R_3 C}}$$

2. De quel type de filtre s'agit-il?

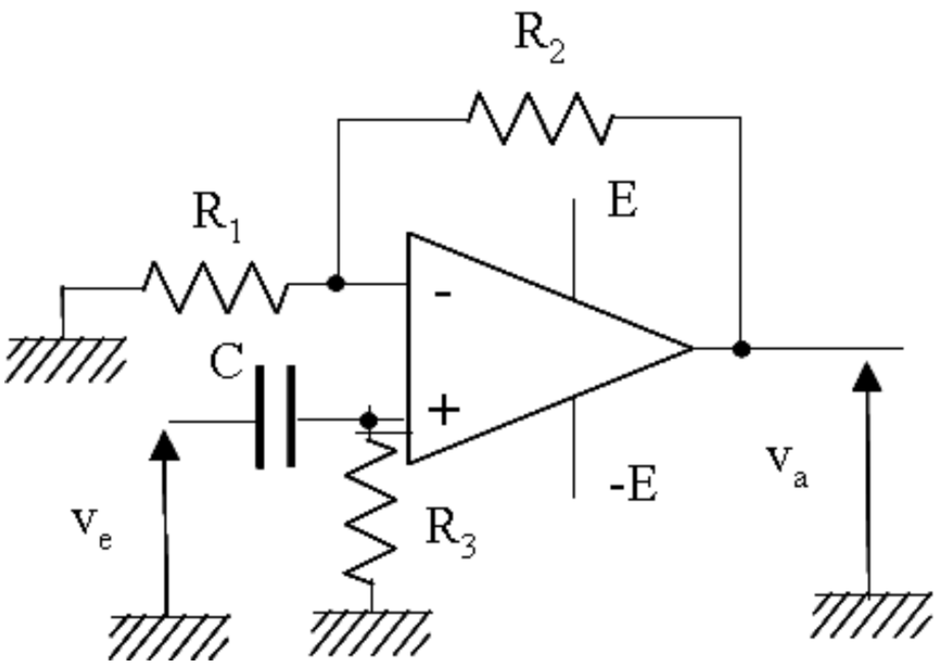

Figure 1: Amplificateur non-inverseur.

Il s'agit d'un filtre passe-haut de fréquence de coupure $f_{c1} = \frac{\omega_{c1}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_3 C}$.

3. Quel est le gain G_{v1} dans la bande passante?

Le gain dans la bande passante est $G_{v1} = |H(j\omega)|_{max} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$

4. Quelle est la fréquence de coupure f_{c1} de ce filtre?

$$f_{c1} = \frac{\omega_{c1}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R_3 C}$$

5. Quelle est la résistance d'entrée R_e dans la bande passante?

Par définition, $Z_e = R_3 + \frac{1}{jC\omega}$. *Si* $\omega \gg \omega_{c1}$, *i.e. si* $\omega R_3 C \gg 1$, *alors* $Z_e \approx R_e = R_3$.

6. Proposer des valeurs pour C et R_3 afin de satisfaire le cahier des charges.

Sachant que $R_3 = R_e = 100\ k\Omega$, *si on veut* $f_{c1} = 20\ Hz$, *il faut prendre* $C \approx 79.6\ nF$.

Supposons maintenant que le signal $v_e(t)$ correspond à un son pur à $f = \omega/(2\pi)$:

$$v_e = V_e^m \sin(\omega t)$$

et que $f = \omega/(2\pi)$ est telle que $f > f_c$. Ainsi le signal de sortie s'écrira:

$$v_a = v_e G_{v1} = V_a^m \sin(\omega t)$$

Une résistance R_L (voir la figure 2) est branchée à la sortie. Déterminer:

1. La puissance instantanée P_{ia} en fonction de v_a et R_L.

   La puissance instantanée est donnée par: $P_{ia} = v_a(t).i_a(t) = \frac{v_a(t)^2}{R_L}$.

2. La puissance de sortie moyenne P_a dissipée pendant une période en fonction de V_a^m et R_L, puis en fonction de V_a^{eff} et R_L.

   La puissance moyenne sur une période est donnée par:
   $P_a = \frac{1}{T}\int_0^T P_{ia}(t)dt = \frac{(V_a^m)^2}{2R_L} = \frac{(V_a^{\text{eff}})^2}{R_L}$

3. La valeur maximale de P_a et la valeur minimale de R_L.

   $P_a = \frac{V_a^m}{2} I_a^m$. $(V_a^m)_{max} = 15\ V$ *et* $(I_a^m)_{max} = 20\ mA$. *Ainsi,* $(P_a)_{max} = 150\ mW$. *Pour cette puissance,* $(I_a^m)_{max} = \frac{(V_a^m)_{max}}{(R_L)_{min}}$, *et ensuite,* $(R_L)_{min} \approx= 750\ \Omega$.

4. Le gain en courant G_{i1} et le gain en puissance G_{p1} en fonction de G_{v1}.

   $G_{i1} = \frac{i_a}{i_e} = \frac{v_a/R_L}{v_e/R_e} = G_{v1}\frac{R_e}{R_L}$; $G_{p1} = \frac{P_a}{P_e} = \frac{(V_a^{\text{eff}})^2/R_L}{(V_e^{\text{eff}})^2/R_e} = \frac{V_a^{\text{eff}} I_a^{\text{eff}}}{V_e^{\text{eff}} I_e^{\text{eff}}} = G_{v1}G_{i1}$

5. Est-il possible de respecter le cahier des charges avec ce circuit?

   Il n'est pas possible de satisfaire le cahier des charges avec ce circuit, puisque la puissance de sortie maximale $(P_a)_{max} = 150\ mW \ll 20\ W$ *et puisque* $(R_L)_{min} = 750\ \Omega \gg 4\ \Omega$. *La courant de sortie maximal de l'amplificateur opérationnel n'est pas suffisant!*

2 Solution 2: Amplificateur opérationnel + amplificateur de puissance de classe B

Afin d'augmenter la puissance de sortie, on place entre le haut parleur et l'amplificateur opérationnel un amplificateur de puissance de classe B (voir la figure 3), dans lequel les transistors T_1 et T_2 sont des transistors de puissance en silicium ($i_C^{\max} = 10$ A, $v_{BE} = 0.6$ V).

Nous allons supposer que l'amplificateur opérationnel est idéal. Le courant de sortie maximal est toujours i_a^{max}=20 mA.

On applique une tension sinusoïdale à l'entrée. Dessiner l'allure de v_e, v_a, i_{T_1}, i_{T_2}, i_s et v_s. Quel est le principal inconvénient de ce circuit?

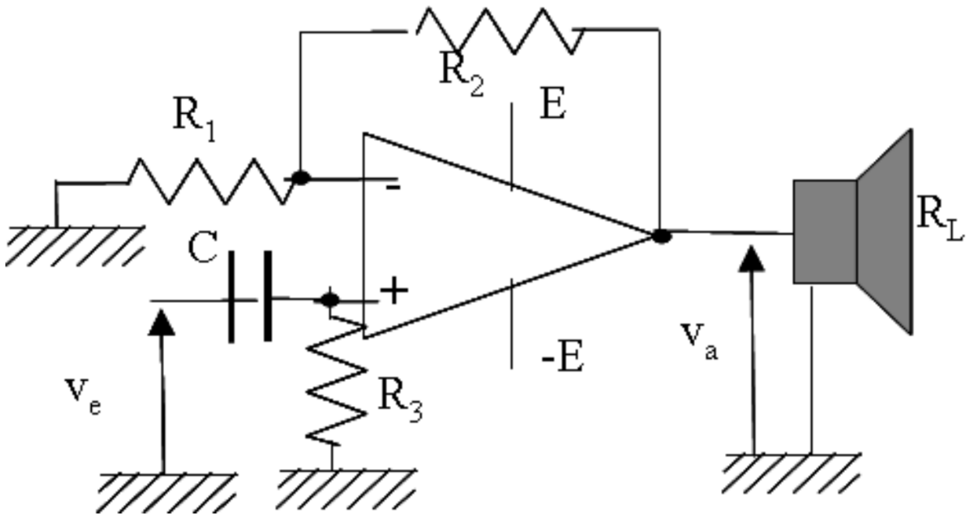

Figure 2: Circuit à base d'amplificateur opérationnel.

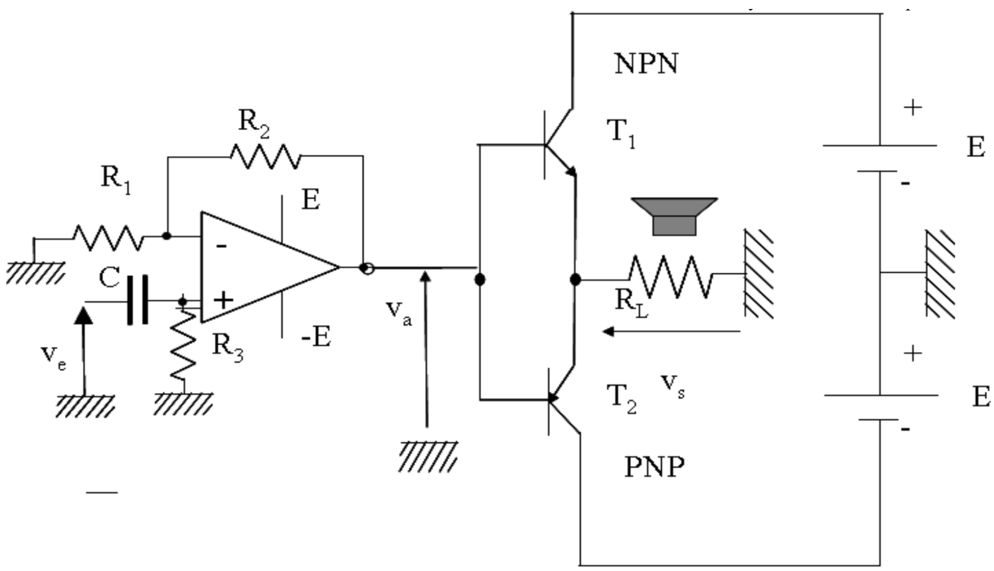

Figure 3: Circuit à base d'amplificateur de puissance de classe B.

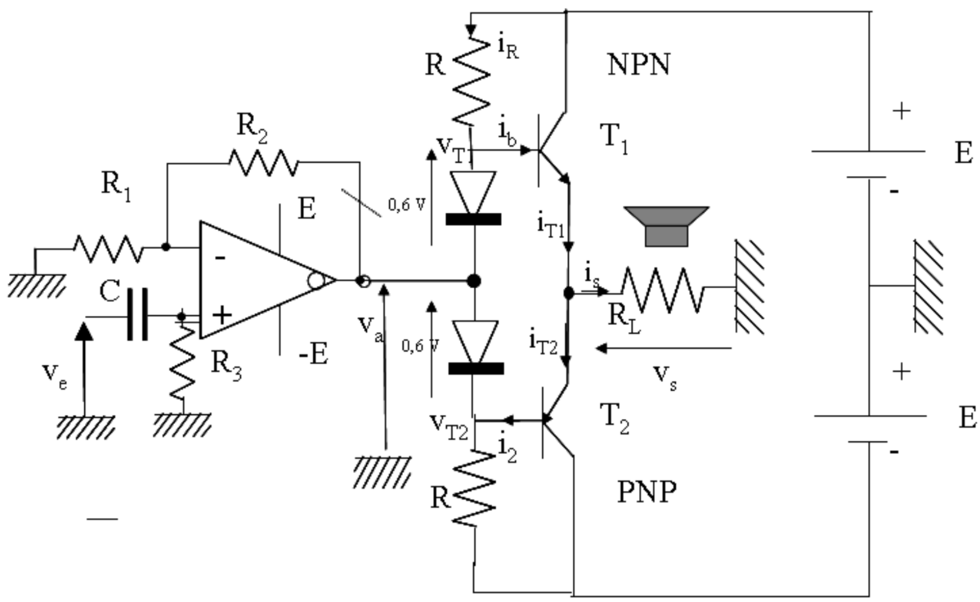

Figure 4: Circuit à base d'amplificateur de classe AB.

3 Solution 3: Amplificateur opérationnel + Amplificateur de puissance de classe AB

Afin d'éliminer les distorsions non-linéaires, le circuit de la figure 3 est remplacé par un montage de classe AB (voir la figure 4).

1. Dessiner l'allure de v_e, v_a, i_{T_1}, i_{T_2}, i_s et v_s.

2. Déterminer la valeur de V_s^{max} et la puissance de sortie P_s correspondante. Le circuit proposé peut-il satisfaire le cahier des charges?

> $V_s = E - Ri_R - 0.6\ V$. *Le courant minimal (pour lequel les diodes ne sont plus polarisées en direct) est* $i_R = 0 \to V_s^{max} = E - 0.6\ V = 14.4\ V$. *Dans ce cas,* $P_s^{max} = \frac{(V_s^{max})^2}{2R_L} \approx 26\ W$. *Le cahier des charges est respecté.*

3. Déterminer le gain $G_{v2} = V_s/V_a$ de l'étage de puissance (essayer de trouver $G_{v2} = V_s^{max}/V_a^{max}$).

> $V_s = V_a + 0.6\ V - 0.6\ V = V_a$. *Ainsi,* $G_{v2} = 1$.

4. Déterminer la charge minimale R_L pour ce circuit, ainsi que la puissance de sortie correspondante P_s.

> $I_s^{max} = \frac{V_s^{max}}{R_L^{min}} \to R_L^{min} = \frac{V_s^{max}}{I_s^{max}} \approx 1.44\Omega\ P_s = \frac{(V_s^{max})^2}{2R_L^{min}} \approx 72W$

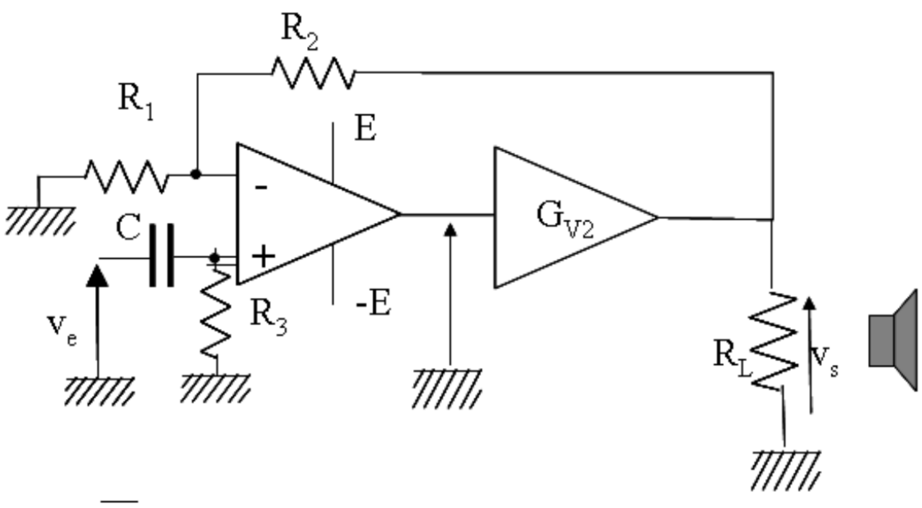

Figure 5: Circuit final.

4 Solution finale: Amplificateur opérationnel + amplificateur de puissance de classe AB + Boucle de contre-réaction

Afin d'obtenir un gain en tension stable, le circuit précédent est modifié tel que présenté sur la figure 5.

1. Montrer que le circuit peut être considéré comme un amplificateur opérationnel de puissance.

$$V_s = G_{v2} V_a = G_{v2} A_d (V_e - V_-) = G_{v2} A_d (V_e - \frac{R_1}{R_1+R_2} V_s)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{G_{v2} A_d}{1 + G_{v2} A_d \frac{R_1}{R_1+R_2}}$$

Sachant que $A_d \gg 1$, nous avons:

$$G_v^{tot} \approx 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Ainsi, le gain en tension est le même que pour l'amplificateur opérationnel seul.

2. En déduire le gain en tension G_v^{tot} du circuit.

3. Déterminer le gain en tension nécessaire pour satisfaire au cahier des charges et proposer ensuite de valeurs pour R_1 et R_2.

$$V_e = 100m\ V_{eff} \rightarrow P_s = 20\ W \textit{ sur une charge de } 4\Omega. \textit{ Ainsi, } V_s = \sqrt{2R_L P_s} \approx 12.6\ V \textit{ and } G_v^{tot} \approx 90. \textit{ On peut prendre } R_2 = 89\ k\Omega \textit{ et } R_1 = 1\ k\Omega\ (G_v^{tot} = 1 + \frac{R_2}{R_1}).$$

4. Déterminer le gain en courant et le gain en puissance.

$$G_i^{tot} = G_v^{tot} \frac{R_e}{R_L} \approx 2.25 \times 10^6\ (127dB)\ G_p^{tot} = (G_v^{tot})^2 \frac{R_e}{R_L} \approx 202.5 \times 10^6\ (83dB)$$

5. Pourquoi est-il nécessaire d'avoir à la fois un gain en tension et un gain en courant pour un amplificateur de puissance?

$$G_p^{tot} = G_v^{tot} G_i^{tot}$$

6. Déterminer la puissance délivrée par la source de puissance lorsque la puissance de sortie est maximale.

$$P_{supply} = 2E < i_E > \approx 2E < i_s > = \frac{2E}{\pi} i_s^{max} = \frac{2E}{\pi} \frac{V_s^{max}}{R_L} \approx 34.3\ W$$