

Séance 2 : Conception et réalisation d'un amplificateur audio

1 But de la manipulation

Les buts de cette manipulation sont :

- illustrer l'utilisation des amplificateurs opérationnels dans une application réaliste ;
- réaliser un montage électronique « grand public ».

2 Pré-requis

Les notions liées aux amplis-op sont supposées connues :

- adaptation d'impédances ;
- gain ;
- produit gain-bande passante ;
- imperfections.

En particulier, vous devez être capable de résoudre des problèmes semblables à ceux des séances d'exercices n°2 et 3.

3 Matériel

En plus du matériel classique de laboratoire (multimètre, oscilloscope, générateur de fonction, câbles, etc.), cette séance nécessite les composants suivants :

- Ampli-ops (AOP) : 4 AOP TLE2061 et 1 NJM2113 (JRC-K002A).
- Résistances : 1 de $1\text{k}\Omega$, 2 de $2,7\text{k}\Omega$, 2 de $4,7\text{k}\Omega$, 2 de $22\text{k}\Omega$, 1 de $39\text{k}\Omega$, et 2 de $100\text{k}\Omega$.
- Potentiomètres : 3 de $100\text{k}\Omega$.
- Condensateurs : 2 de 100nF , 1 de 330nF , et 1 de $1\mu\text{F}$.
- Un haut-parleur, une antenne et un protoboard.

4 Prédéterminations

Avant d'entrer au laboratoire, il est conseillé de lire le dimensionnement du montage (§6.2) et de comprendre le fonctionnement du montage. Revoir les séances d'exercices n°2 et 3 est également une bonne idée.

5 Objectifs

A la fin de ce laboratoire, vous devez :

- être capable d'expliquer le fonctionnement de notre ampli audio ;
- être capable de câbler proprement un circuit complexe sur un protoboard ;
- vous être rendu compte qu'on peut comprendre le fonctionnement d'un circuit électronique complexe en identifiant des blocs (étages ampli-op, filtres) et en les analysant séparément, pour après comprendre le fonctionnement de l'ensemble.

6 Manipulation

6.1 Définition du problème

On désire réaliser un amplificateur dans la gamme des fréquences audio. Il sera utilisé pour amplifier le signal provenant d'un récepteur radio AM et piloter un haut-parleur (HP).

On dispose des informations suivantes :

- Le récepteur AM fournit un signal d'amplitude supérieure à 5mV crête, avec une impédance de sortie d'environ 100kW.
- Le HP se comporte comme une résistance de 16W dans la plage des fréquences audio (impédance classique d'un HP). Sa puissance est limitée à 500mW.
- La plage des fréquences audio s'étend de 20Hz à 20kHz.
- On désire pouvoir régler le volume sonore.

6.2 Dimensionnement de l'ampli audio

6.2.1 Définition des critères de dimensionnement de l'ampli

- Impédance d'entrée : $R_{in} \gg 100kW$
- impédance de sortie : $R_{out} \ll 16W$
- gain : pour pouvoir régler le volume sonore, nous aurons besoin d'un gain variable. Cherchons le gain maximum nécessaire :
- le gain minimum doit idéalement valoir 0 pour pouvoir annuler totalement le volume, ce qui implique la présence d'au moins un étage inverseur dans notre montage.
- bande passante : la bande passante de chaque étage doit être supérieure ou égale à 20kHz.

Question 1. Calculez la valeur de crête maximum supportée par le HP.

Question 2. Déduisez-en le gain maximum du montage.

6.2.2 Calcul du nombre d'étages nécessaire

On a vu, dans les exercices de la séance précédente, qu'il est préférable d'utiliser des amplis-op ayant de très faibles courants d'entrée lorsque la source du signal a une grande impédance. Nous utiliserons donc des TLE2061P (ou des TL081) pour ce montage.

Question 3. Calculez le gain maximum d'un étage à TLE2061P qui respecte la bande passante voulue.

Question 4. Déduisez-en le nombre d'étages nécessaires pour notre ampli audio.

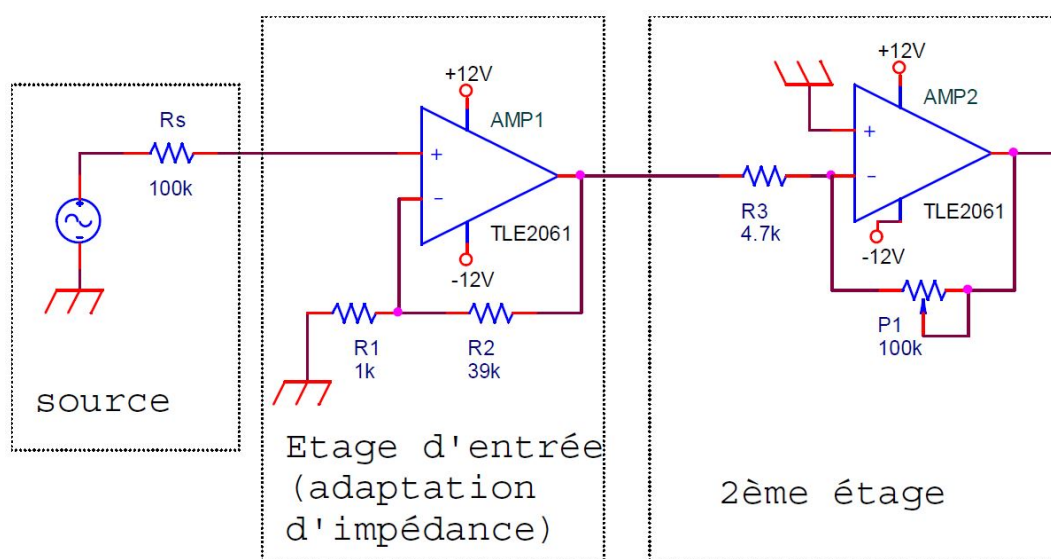
6.2.3 Choix du type des étages

Question 5. Le 1er étage doit être un étage non inverseur. Expliquez pourquoi.

Le choix du deuxième étage est moins strict, nous choisirons le montage inverseur pour pouvoir annuler totalement le gain.

On peut diviser le gain entre les deux étages librement (tant qu'on ne dépasse le gain maximum pour un étage) ; on a choisi 40 pour le premier étage et 20 pour le second.

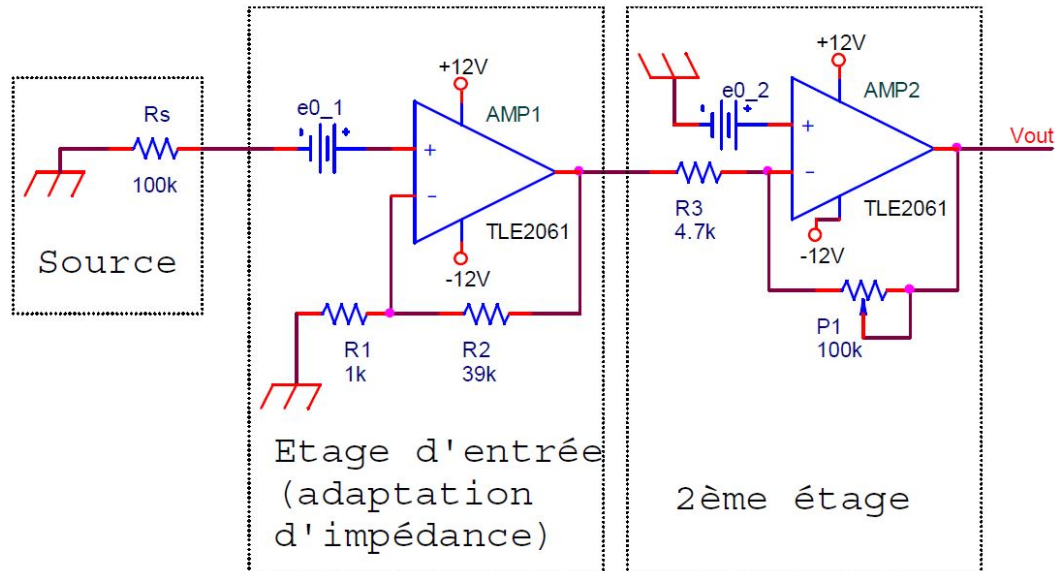
On obtient donc un 1er schéma pour notre ampli audio :



Le potentiomètre P1 est utilisé comme résistance variable et nous permet ainsi de faire varier le gain total du montage de 0 à 800.

6.2.4 Effet des imperfections

Calculons la tension de décalage à la sortie de notre ampli :



Question 6. Calculez l'effet des tensions de décalage des deux amplis-op sur la tension de sortie.

Question 7. Vérifiez que l'effet des courants d'entrée est négligeable.

Les HP ne supportent pas qu'on leur applique des tensions continues ; en effet, la partie électrique d'un HP est essentiellement composée d'une bobine dont l'impédance est quasi nulle en continu. Il faudra donc éliminer cette composante continue.

6.2.5 Etage de sortie

On peut remarquer que la résistance de charge est de faible valeur ; cela implique qu'il faut pouvoir lui fournir un courant important :

$$I_{\text{out,max}} = \frac{V_{\text{out,max}}}{R_{\text{H.P.}}} = \frac{4\text{V}}{16\Omega} = 250\text{mA}$$

C'est beaucoup plus que ce que peut fournir un TLE2061P. Il faut donc ajouter un 3ème étage, appelé étage de sortie, dont le rôle est de fournir le courant nécessaire à la charge. Il existe des amplis-op spécialement conçus pour réaliser ces étages de sortie.

Les fabricants conseillent d'utiliser ces amplis-op dans des montages dont le gain est faible (typiquement $A = 1$), pour optimiser leurs performances. Leur but n'est pas d'amplifier leur tension d'entrée, mais de fournir le courant nécessaire à la charge.

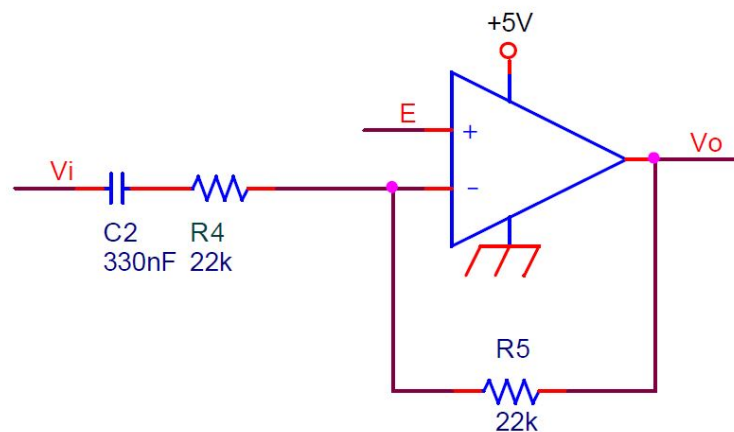
On utilisera l'ampli-op NJM2113 (JRC-K002A) ; il peut fournir une puissance de 400mW à une charge de 16W. Il a été spécialement conçu pour les applications demandant une faible puissance sonore : GSM, baladeur, discman, carte son, etc.

Malheureusement, ces appareils ne disposent en général que d'une source de tension de 5V (produite en régulant la tension de la batterie ou des piles) ; il est donc impossible d'alimenter les ampli-op de manière symétrique (+12V/- 12V, +5V/-5V, etc). Le NJM2113 a donc été spécialement conçu pour être alimenté en +5V/0V.

Cela a une conséquence importante (et gênante) : les limites d'écrêtage de l'ampli ne sont plus symétrique et en particulier, le signal de sortie ne peut plus devenir négatif.

On ne peut donc pas amplifier directement notre signal (qui est purement alternatif) avec cet ampli.

On doit lui ajouter une composante continue, pour que le signal de sortie ne devienne jamais négatif :



Dans le schéma ci-dessus, V_i est le signal que l'on veut amplifier (signal utile) et E est une tension continue (à déterminer) qui va empêcher la tension de sortie de devenir négative. On a ajouté un condensateur en série avec l'entrée, pour supprimer l'éventuelle composante continue de V_i . Cet étage a donc un comportement de filtre passe-haut ; sa fréquence de coupure est de 20Hz.

Question 8. Calculez l'effet de E sur la tension de sortie, sachant que E est une tension purement continue.

Question 9. Calculez l'effet de V_i sur la tension de sortie, en considérant que V_i est une tension purement continue.

Question 10. Calculez l'effet de V_i sur la tension de sortie, en considérant que V_i est une tension sinusoïdale dont la fréquence est telle qu'on peut considérer que $C2$ comme un court-circuit.

Question 11. Ce montage est un filtre passe-haut. Vérifiez que sa fréquence de coupure vaut environ 20Hz.

On doit choisir la valeur de E qui maximise l'amplitude admissible de V_i ; il faut donc choisir $E = 2,5V$ pour avoir une valeur crête de $V_i = 2,5V$.

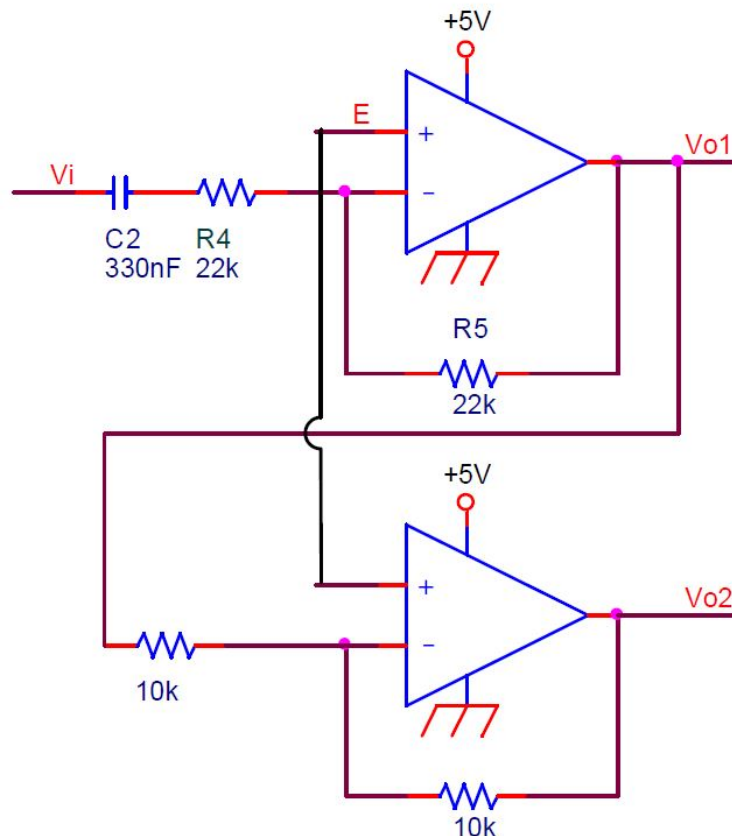
Avec ce montage, on arrive donc à amplifier notre signal d'entrée sans être gêné par les limites d'écroulement de l'ampli-op.

Ce montage a cependant un gros inconvénient : sa tension de sortie a une composante continue importante (2,5V) ; on ne peut donc connecter directement un HP à sa sortie. On pourrait placer un condensateur entre la sortie de l'ampli et le HP pour créer un filtre passe-haut, mais la valeur de ce condensateur devrait être très élevée pour avoir une fréquence de coupure de 20Hz :

$$C = \frac{1}{2\pi R_{H.P.} f_C} = 995\mu F$$

1mF est une valeur de capacité qui n'est pas irréaliste, mais qui est à la limite de ce qui est réalisable. Un condensateur de 1mF se présente typiquement sous la forme d'un cylindre de 1 à 2cm de diamètre et de 4cm de hauteur ; il s'agit donc d'un élément volumineux, peu adapté pour être inclus dans un appareil portable.

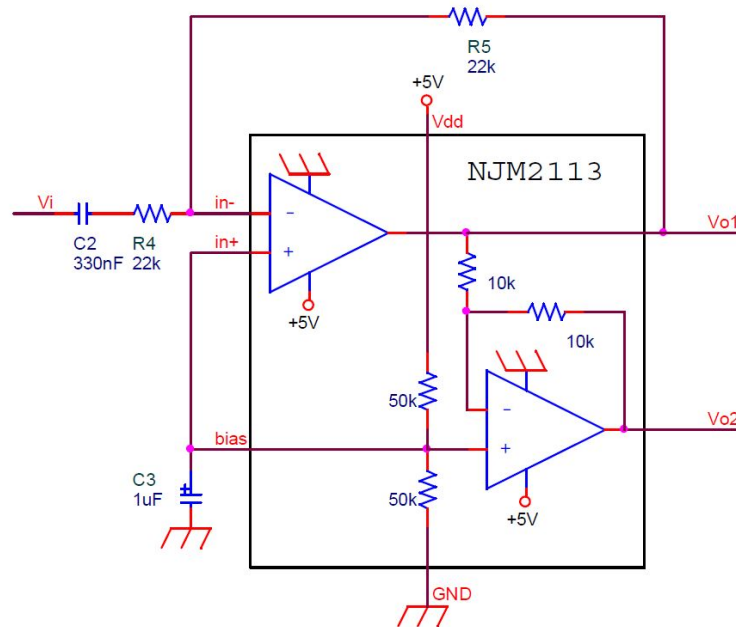
Les concepteurs du NJM2113 ont donc imaginé une astuce pour éviter de devoir utiliser un tel condensateur :



Question 12. Vérifiez que : $V_{o1} = E - V_i$ et $V_{o2} = E + V_i$ tel que $V_o = V_{o2} - V_{o1} = 2V_i$

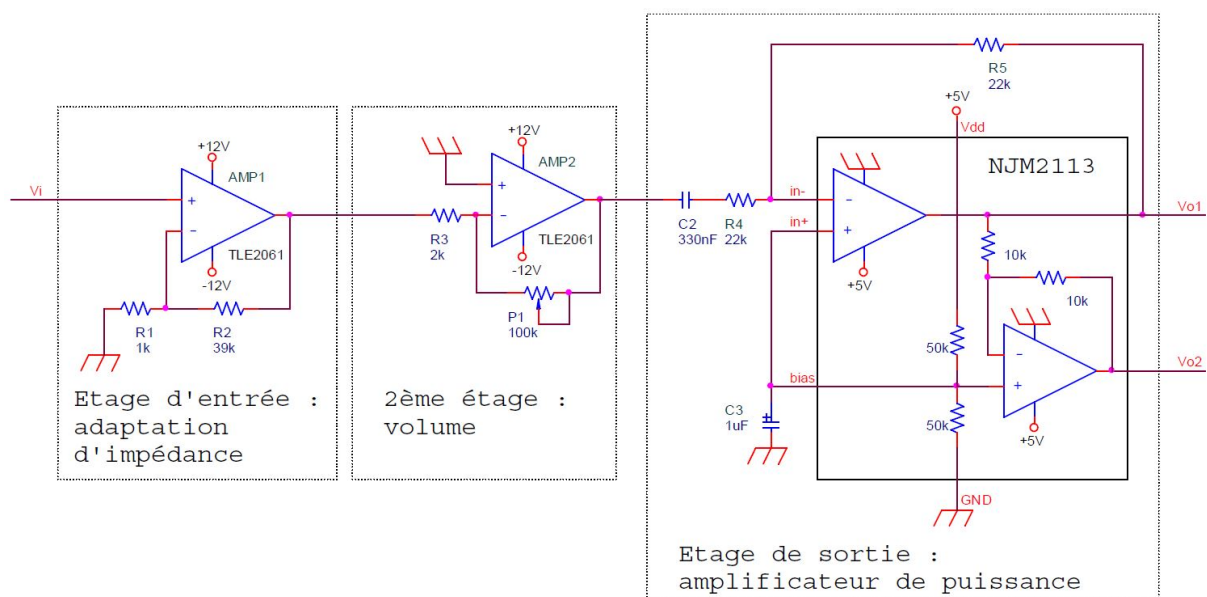
En plaçant notre HP entre les sorties des deux amplis, on lui applique une tension purement alternative : puisque les deux tensions de sortie ont la même composante continue, ces dernières s'annulent.

Le circuit NJM2113 intègre presque toute cette solution :



Le circuit intégré (partie encadrée) contient : les 2 amplis-op, les résistances de rétroaction du 2ème ampli et un diviseur résistif pour créer la tension continue E de 2,5V. Nous devons ajouter à l'extérieur : les résistances de rétroaction du 1er ampli, le condensateur du filtre passe-haut et un condensateur de grande valeur en parallèle sur la tension continue de 2,5V (C3). Ce condensateur sert à stabiliser la tension continue (il forme un filtre passe-bas avec le diviseur résistif).

Le schéma complet de notre ampli audio devient :



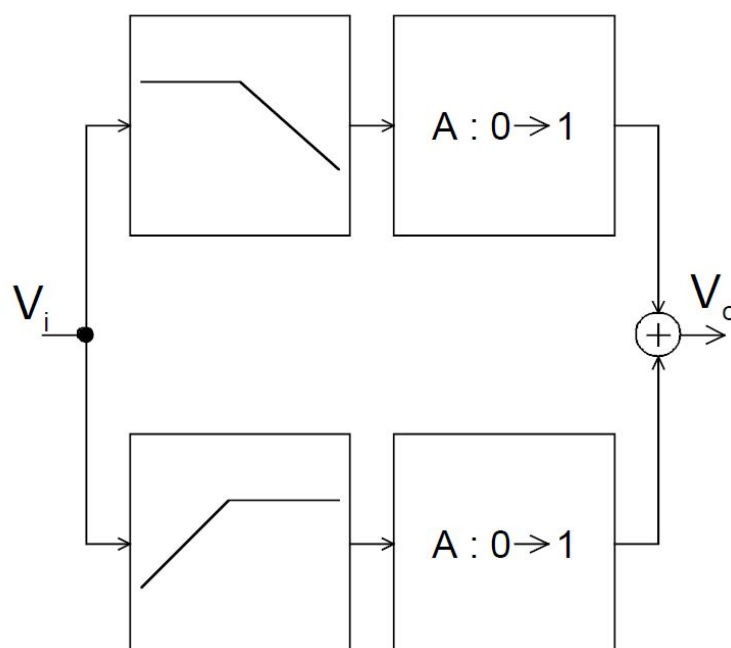
6.2.6 Ajout d'un contrôle basses/aigus

Nous avons à présent un amplificateur capable d'amplifier un signal dans la gamme audio avec un gain variable de 0 à 800, et de fournir la puissance nécessaire à notre HP, sans risque de le détruire.

Nous pouvons encore améliorer notre montage en lui ajoutant un contrôle basses/aigus. Pour pouvoir amplifier différemment les basses et les aigus, il faut d'abord les séparer ; cela se fait au moyen de deux filtres : un filtre passe-bas et un filtre passe-haut (filtres RC).

Ensuite, on amplifie chacun des deux signaux obtenus à la sortie des filtres avec un étage amplificateur à gain variable entre 0 et 1.

Finalement, on "remélange" les deux signaux avec un montage sommateur :

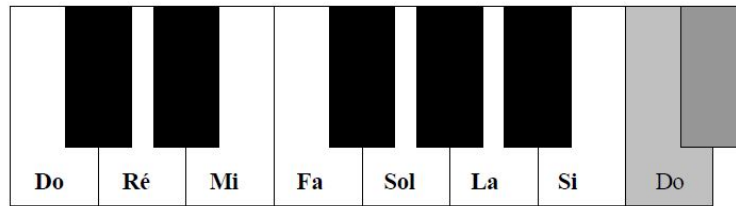


Il faut choisir la position de ce contrôle dans notre montage ; il y a priori 4 emplacements possibles : avant l'étage d'entrée, avant le 2ème étage, avant l'étage de sortie et avant le HP.

Question 13. Expliquez lesquelles de ces solutions sont bonnes et pourquoi.

On a choisi de placer notre égaliseur avant le 2ème étage. Il reste à choisir la fréquence de coupure de nos deux filtres ; la 1ère idée qui vient à l'esprit est de placer la fréquence de coupure au milieu de la bande audio, pour la diviser en deux parts égales. C'est une bonne idée, mais il y a une subtilité : l'oreille humaine possède une sensibilité logarithmique de la fréquence.

Pour s'en persuader, il suffit de regarder les fréquences des notes de musique. Elles sont organisées en octaves ; une octave comprend 12 tons, également espacés ; ils correspondent aux 12 touches d'un piano :



Le tableau ci-dessous donne les fréquences des notes de musique (en Hz), pour 2 octaves consécutives :

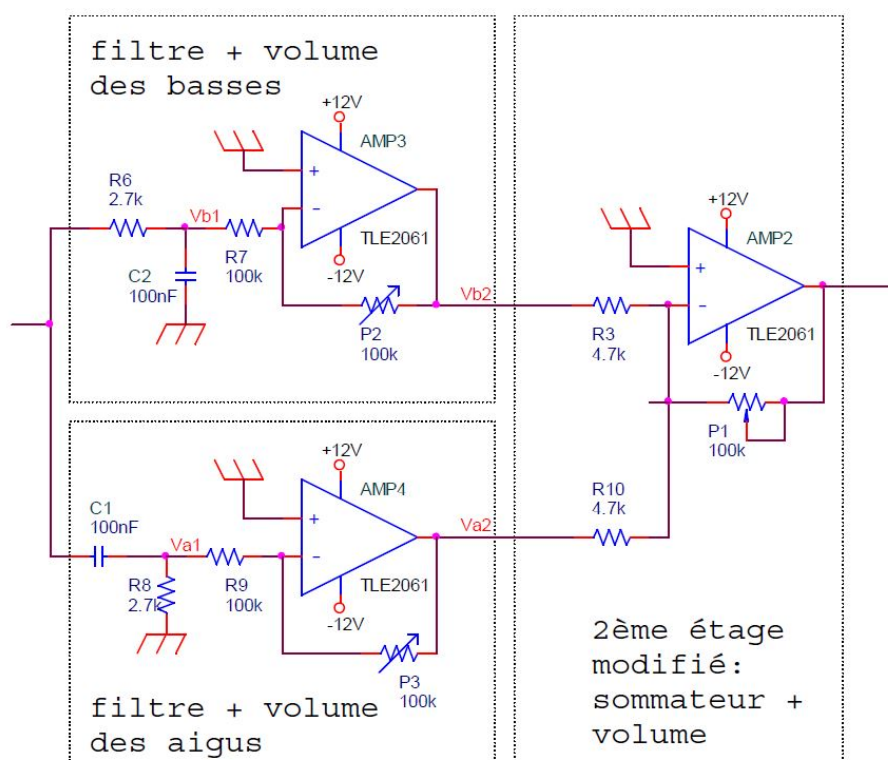
Do ₄	Do _{#4}	Ré ₄	Mi _{b4}	Mi ₄	Fa ₄	Fa _{#4}	Sol ₄	La _{b4}	La ₄	Si _{b4}	Si ₄
261,63	277,18	293,66	311,13	329,63	349,23	369,99	392,00	415,31	440,00	466,16	493,88
Do ₅	Do _{#5}	Ré ₅	Mi _{b5}	Mi ₅	Fa ₅	Fa _{#5}	Sol ₅	La _{b5}	La ₅	Si _{b5}	Si ₅
523,25	554,36	587,32	622,26	659,26	698,46	739,98	784,00	830,62	880,00	932,32	987,76

Le La₄ est la note sur laquelle on accorde les instruments ; c'est aussi celle que vous entendez lorsque vous décrochez votre téléphone. On voit que d'une octave à l'autre, la fréquence de chaque note a été multipliée par 2. La fréquence des notes de musique forme une suite géométrique de raison $\sqrt[12]{2}$.

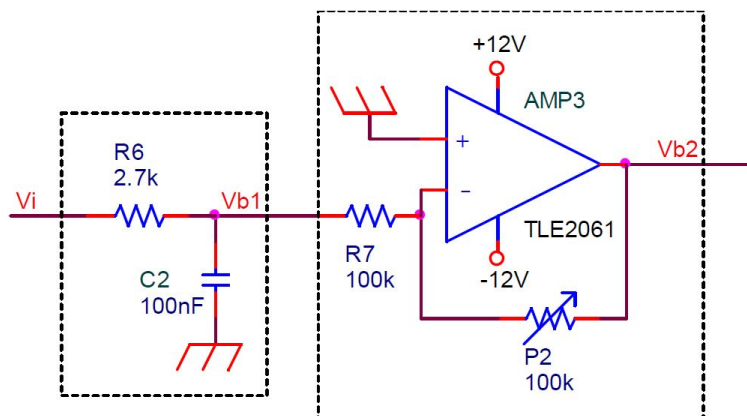
Les bonnes oreilles humaines entendent les notes depuis le Do₀ (16,35Hz) jusqu'au Do₁₀ (16742Hz), soit 10 octaves.

De ceci, on peut déduire que la fréquence séparant les basses des aigus doit être la moyenne géométrique (et non la moyenne arithmétique) des fréquences extrêmes de la gamme audio, soit le Do₅.

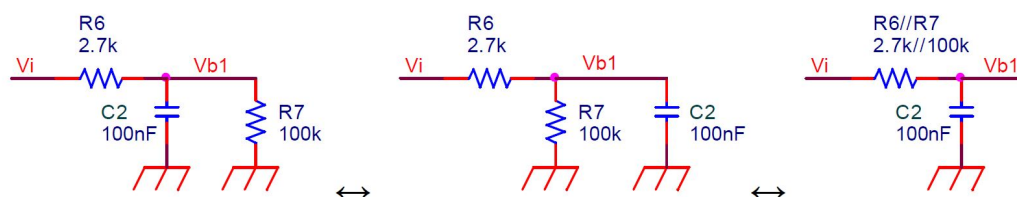
Le schéma de notre contrôle basses/aigus est donc :



Pour expliquer son fonctionnement, prenons le bloc Filtre + volume des basses :



Il s'agit en fait de deux blocs mis en cascade : un filtre RC passe-bas et un ampli inverseur. Pour calculer la fréquence de coupure du filtre, il faut tenir compte de l'impédance d'entrée de l'ampli :



La fréquence de coupure est donc 605Hz. L'ampli inverseur nous permet d'avoir un gain variable entre 0 et 1 (avec un déphasage de 180°). Le mélange des deux signaux obtenus se fait en transformant le 2ème étage en sommateur. On peut remarquer qu'il n'est pas nécessaire de placer une capacité en série avec l'entrée du signal des aigus dans le sommateur puisqu'il est déjà passé par un filtre passe-haut.

6.2.7 Schéma final

Le schéma final de notre amplificateur audio est donné à la page suivante.

6.3 Manipulation

Question 14. Réalisez, sur protoboard, l'ampli audio que nous avons dimensionné ci-dessus. Pensez à respecter les conseils qui vous sont donnés dans l'annexe.

Question 15. Observez que V_{o1} et V_{o2} simultanément sur les deux canaux de l'oscilloscope et remarquez qu'ils ont bien la même composante continue et des composantes alternatives en opposition de phase.

ATTENTION, vous ne pouvez pas observer $V_{o2} - V_{o1}$ à l'oscilloscope. Pourquoi ?

Question 16. Mettez les contrôles des basses et des aigus au maximum (position neutre), et relevez la fonction de transfert de votre ampli en utilisant le générateur de fonction comme source.

Le cahier des charges est-il respecté ?

Question 17. Relevez les fréquences de coupure des filtres aigus et basses (en plaçant le volume de l'autre filtre sur 0).

Question 18. Branchez le HP et la radio AM à votre ampli. Ecoutez l'effet du contrôle basses/aigus.

