

Séance 5 : Conception et réalisation d'un amplificateur audio Corrigé

1 Introduction

Les passages nécessitant des pré-déterminations ou des réflexions théoriques sont indiqués par un symbole ⚙️ dans la marge, ceux nécessitant de manipuler du matériel par le symbole 🔧 et les passages informatifs par ℹ️.

1.1 But de la manipulation et objectifs d'apprentissage

Les buts de cette manipulation sont :

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

À 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.

1.2 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 2 et 3.

1.3 Matériel

Composant	Valeur		Quantité
Résistance	1	k	x1
	2.7	k	x2
	22	k	x4
	39	k	x1
	100	k	x2
Potentiomètre	100	k	x3
Condensateur	10	μ F	x2
	100	nF	x1
	330	nF	x1
	1	μ F	x1
Jack femelle			x1
AOP TLV274IN			x2
AOP NJM3113D			x1
ADM660ANZ			x1

1.4 Prédéterminations

Avant d'entrer au laboratoire, il est conseillé de lire le dimensionnement du montage (§2.2), de comprendre le fonctionnement du montage et répondre aux questions. Revoir les séances d'exercices n°2 et 3 est également une bonne idée.

2 Manipulation - Préliminaire théorique

Cette première partie ne contient pas de réalisation pratique, il s'agit d'une étude théorique du montage.

2.1 Définition du problème

Le but de ce laboratoire est de réaliser une chaîne d'amplification audio. La source sera fournie par la sortie audio d'un ordinateur ou de votre téléphone via le connecteur jack 3.5 mm.

On dispose des informations suivantes :

- Vous devez régler votre source pour qu'elle produise un signal d'environ 25 mV.
- L'impédance de sortie de votre source est indéterminée.
- Le HP se comporte comme une résistance de 16Ω dans la plage des fréquences audio (impédance classique d'un HP). Sa puissance est limitée à 500 mW.
- La plage des fréquences audio s'étend de 20 Hz à 20 kHz.
- On désire pouvoir régler le volume sonore.

2.2 Dimensionnement de l'ampli audio

2.2.1 Définition des critères de dimensionnement de l'ampli

- Impédance d'entrée : $R_{in} \gg ?$, il faut donc qu'elle soit la plus grande possible.
- Impédance de sortie : $R_{out} \ll 16\Omega$.
- Gain : pour pouvoir régler le volume sonore, nous aurons besoin d'un gain variable.
- 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.

Réponse :

$$P = \frac{V^2}{R} \Leftrightarrow V = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{0.5 \cdot 16} = 2 \cdot \sqrt{2}, \text{ soit } 4 \text{ V crête.}$$

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

Réponse :

$$\frac{4V}{25mV} = 160$$

2.2.2 Calcul du nombre d'étages nécessaire

Nous utiliserons des TLV274IN pour ce montage.

Question 3. Calculez le gain maximum d'un étage à TLV274IN qui respecte la bande passante voulue.

Réponse :

$$3\text{MHz} / 20\text{kHz} = 150$$

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

Réponse :

2

2.2.3 Choix du type des étages

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

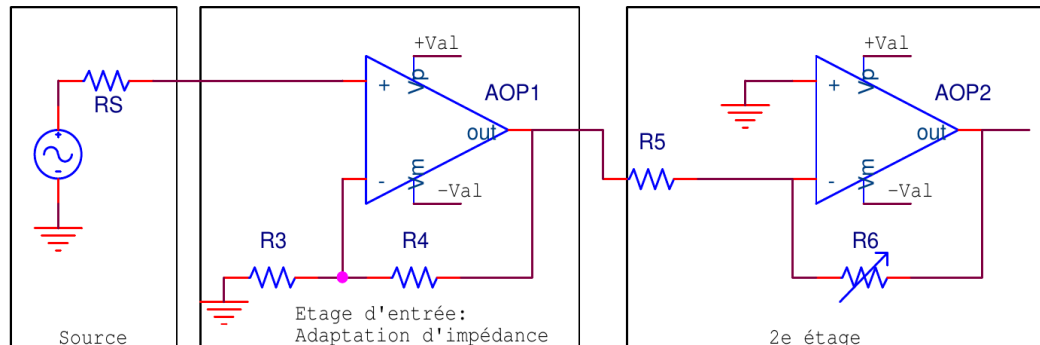
Réponse :

Adaptation d'impédance.

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 4 pour le second.

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



Avec les composants suivants :

$R_1 = 10\text{k}\Omega$	$R_2 = 100\text{k}\Omega$	$R_3 = 1\text{k}\Omega$	$R_4 = 39\text{k}\Omega$	$R_5 = 22\text{k}\Omega$	$R_6 = 100\text{k}\Omega$
AOP1 et AOP2 = TLV274IN		+Val = 5 V		-Val = -5 V	

Et où R_S représente la résistance de sortie de la source de tension du montage. Lorsque vous utilisez le générateur, vous pouvez utiliser une valeur de 600'.

Note : En pratique, nous utiliserons une résistance de 22k Ω pour R_5 , valeur bien plus commune que 25k Ω . Le gain de cet étage sera donc de 4.54 au lieu de 4 comme dimensionné.

Le potentiomètre R_6 est utilisé comme résistance variable et nous permet ainsi de faire varier le gain total du montage de 0 à 160 (181 en réalité).

2.2.4 Effet des imperfections

Question 6. Calculez l'effet des tensions de décalage d'entrée (e_o) des deux amplis-op sur la tension de sortie. Utilisez les valeurs *typiques* de la fiche technique. *Note* : Pour cette question, on ignore donc la contribution des courants de polarisation et de décalage, ainsi que la contribution de la source de tension.

Réponse :

La totale :

$$V_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot e_{o1} + (-R_S \cdot I^+) \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + R_2 \cdot I^- = 5.5\text{mV}$$

$$V_{o2} = V_{o1} \cdot \left(\frac{-R_6}{R_5}\right) + e_{o2} \cdot \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) + R_6 \cdot I^- = -22.2\text{mV}$$

Avec $e_{o1} = e_{o2} = 0.5\text{mV}$, $R_S = 600\Omega$, $I^+ = 1.5\text{pA}$ et $I^- = 0.5\text{pA}$.

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

Réponse :

Voir réponse de la question 6

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.

2.2.5 Étage 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 TLV274IN. Il faut donc ajouter un 3e 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.

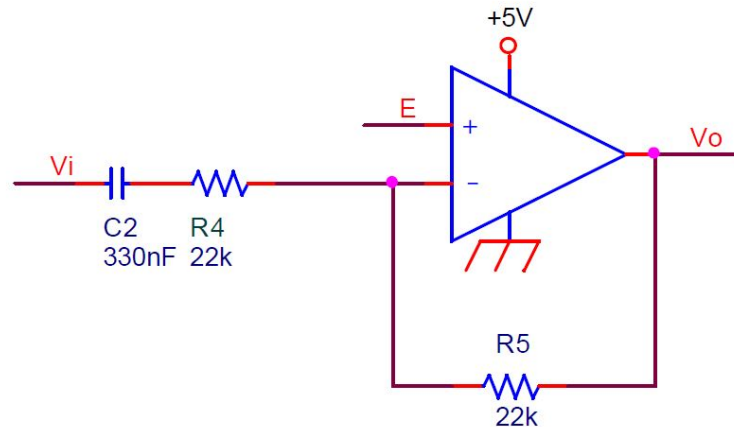
On utilisera l'ampli-op NJM2113 ; il peut fournir une puissance de 400 mW à une charge de 16Ω . Il a été spécialement conçu pour les applications demandant une faible puissance sonore : GSM, baladeur, carte son, etc.

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 impossible d'alimenter les ampli-op de manière symétrique ($+12\text{V}/-12\text{V}$, $+5\text{V}/-5\text{V}$, etc). Le NJM2113 a donc été spécialement conçu pour être alimenté en $+5\text{V}/0\text{V}$.

Cela a une conséquence importante (et gênante) : les limites d'écroûtage 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.

Réponse :

$V_o = E$, le montage se comporte comme un suiveur pour le continu.

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

Réponse :

$V_o = 0$, ne passe pas le condensateur.

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.

Réponse :

$V_o = -V_i$

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

Réponse :

$$H(j\omega) = \frac{-j\omega R_5 C_2}{1 + j\omega R_4 C_2}$$

$$\begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{\omega R_5 C_2}{\sqrt{1 + \omega^2 R_4^2 C_2^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Leftrightarrow \omega R_5 C_2 \sqrt{2} &= \sqrt{1 + \omega^2 R_4^2 C_2^2} \\ \Leftrightarrow \omega^2 R_5^2 C_2^2 \cdot 2 &= 1 + \omega^2 R_4^2 C_2^2 \\ \Leftrightarrow \omega &= \sqrt{\frac{1}{R_5^2 C_2^2 \cdot 2 - R_4^2 C_2^2}} \\ \Leftrightarrow \omega &= 137.74 \\ \Leftrightarrow f &= 21.9\text{Hz} \end{aligned}$$

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

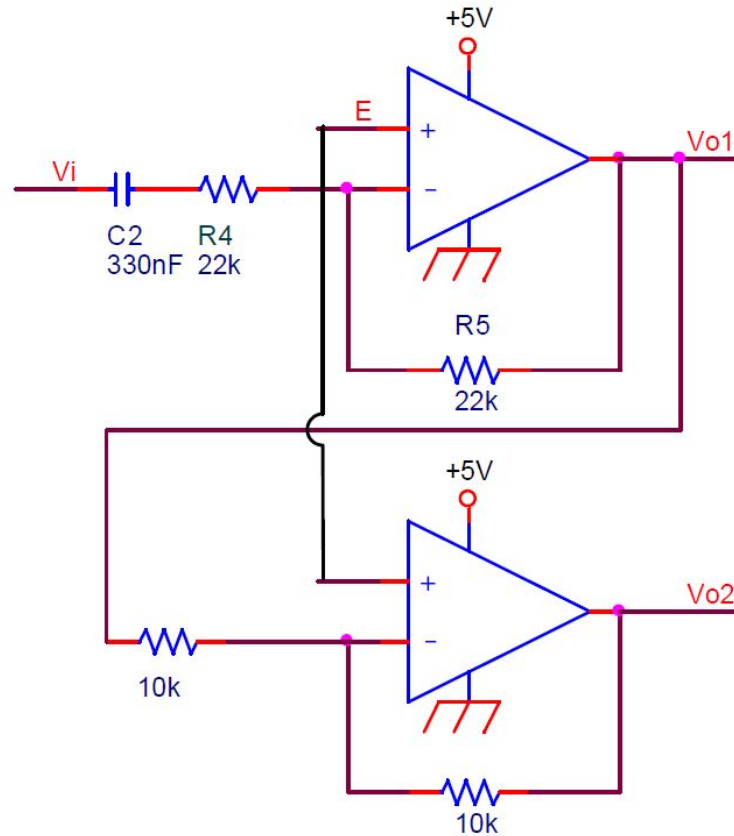
Avec ce montage, on arrive donc à amplifier notre signal d'entrée sans être gêné par les limites d'écroûtage de l'ampli-op.

Ce montage a cependant un gros inconvénient : sa tension de sortie a une composante continue importante ($2,5\text{V}$) ; 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 :

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

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 :

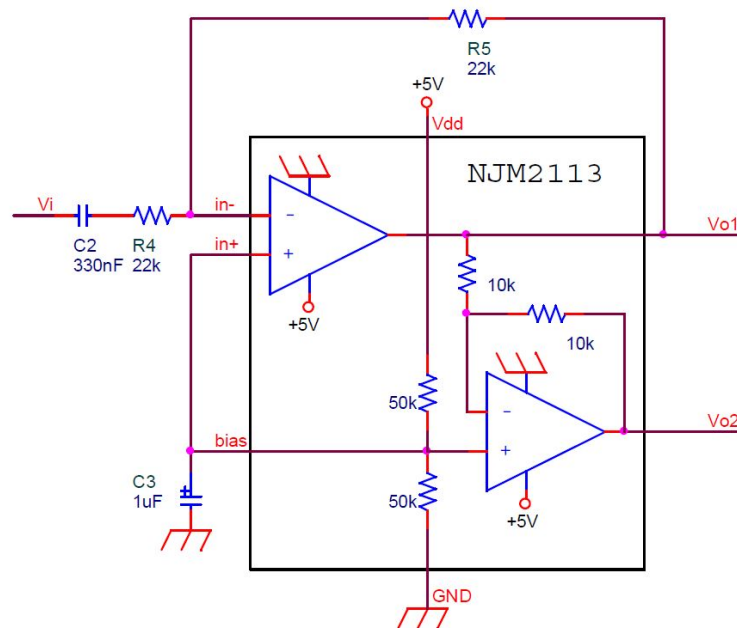


Question 12. Vérifiez que : $V_{o1} = E - V_i$ et $V_{o2} = E + V_i$ tel que $V_o = V_{o2} - V_{o1} = 2V_i$

Réponse :

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.

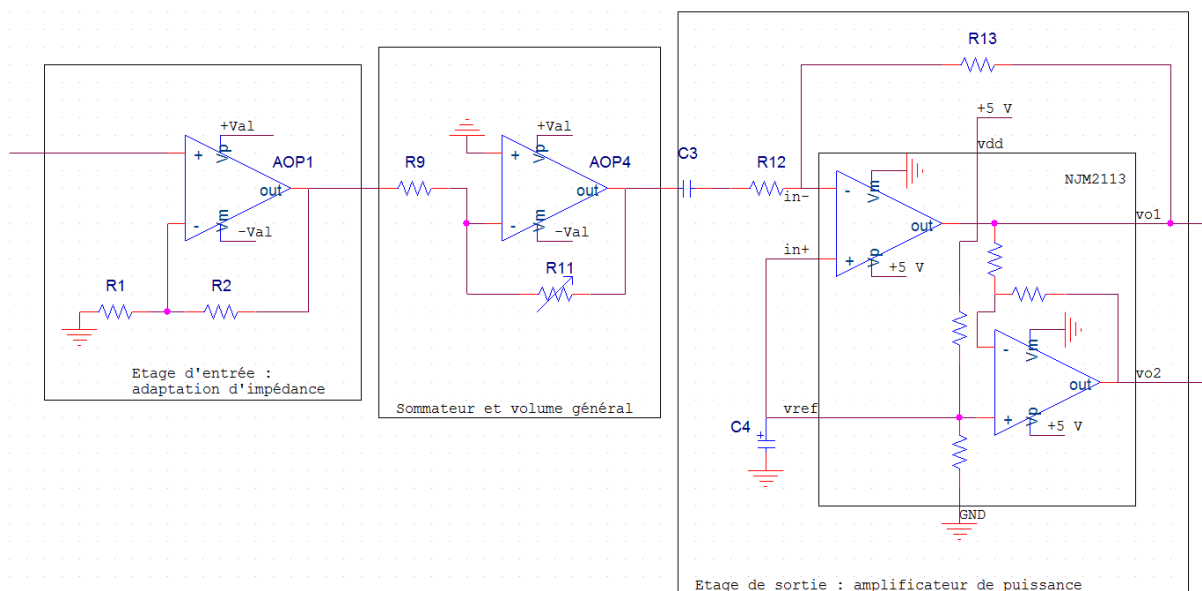
Le circuit NJM2113 intègre presque toute cette solution :



Le circuit intégré (partie encadrée) contient : les 2 amplis-op, les résistances de rétroaction du 2e 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 :



2.2.6 Ajout d'un contrôle basses/aigus

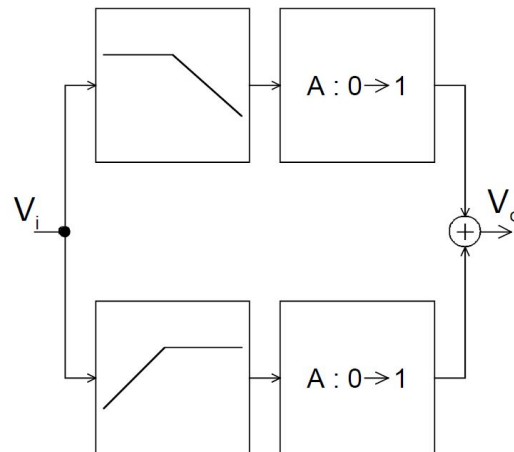
Nous avons à présent un amplificateur capable d'amplifier un signal dans la gamme audio avec un gain variable de 0 à 160, et de fournir la puissance nécessaire à notre HP, sans risque de le détruire.

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 :



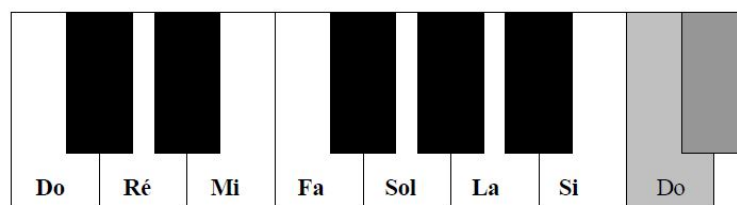
Il faut choisir la position de ce contrôle dans notre montage ; il y a a priori 4 emplacements possibles : avant l'étage d'entrée, avant le 2e étage, avant l'étage de sortie et avant le HP.

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

Réponse :

On a choisi de placer notre égaliseur avant le 2e étage. Il reste à choisir la fréquence de coupure de nos deux filtres ; la première 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 :

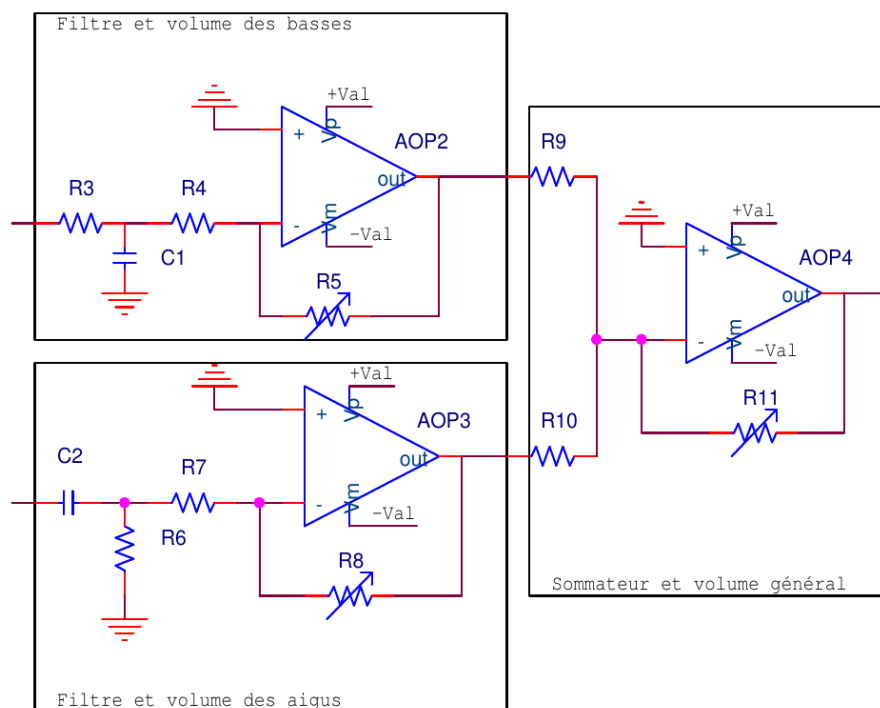
Do ₄	Do _{#4}	Ré ₄	Mi _{b4}	Mi ₄	Fa ₄	Fa _{#4}	Sol ₄	La _{b4}	La ₄	Si _{b4}	Si ₄
261,63	277,18	293,66	311,13	329,63	349,23	369,99	392,00	415,31	440,00	466,16	493,88
Do ₅	Do _{#5}	Ré ₅	Mi _{b5}	Mi ₅	Fa ₅	Fa _{#5}	Sol ₅	La _{b5}	La ₅	Si _{b5}	Si ₅
523,25	554,36	587,32	622,26	659,26	698,46	739,98	784,00	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 $\sqrt[12]{2}$.

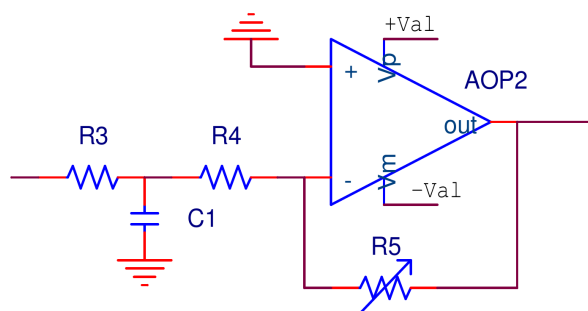
Les bonnes oreilles humaines entendent les notes depuis le Do₀ (16,35Hz) jusqu'au Do₁₀ (16742Hz), soit 10 octaves.

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.

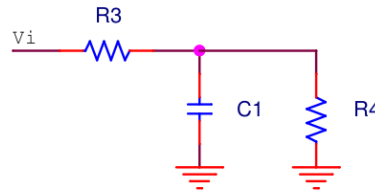
Le schéma de notre contrôle basses/aigus est donc :



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 inverseur (R_4) :



$$R_3 = 2.7k\Omega \parallel R_4 = 100k\Omega \parallel C_1 = 100nF$$

La réponse en fréquence de ce filtre est

$$H(j\omega) = \frac{C_1 // R_4}{R_3 + C_1 // R_4} = \frac{R_4}{R_4 + R_3 + j\omega C_1 R_3 R_4}$$

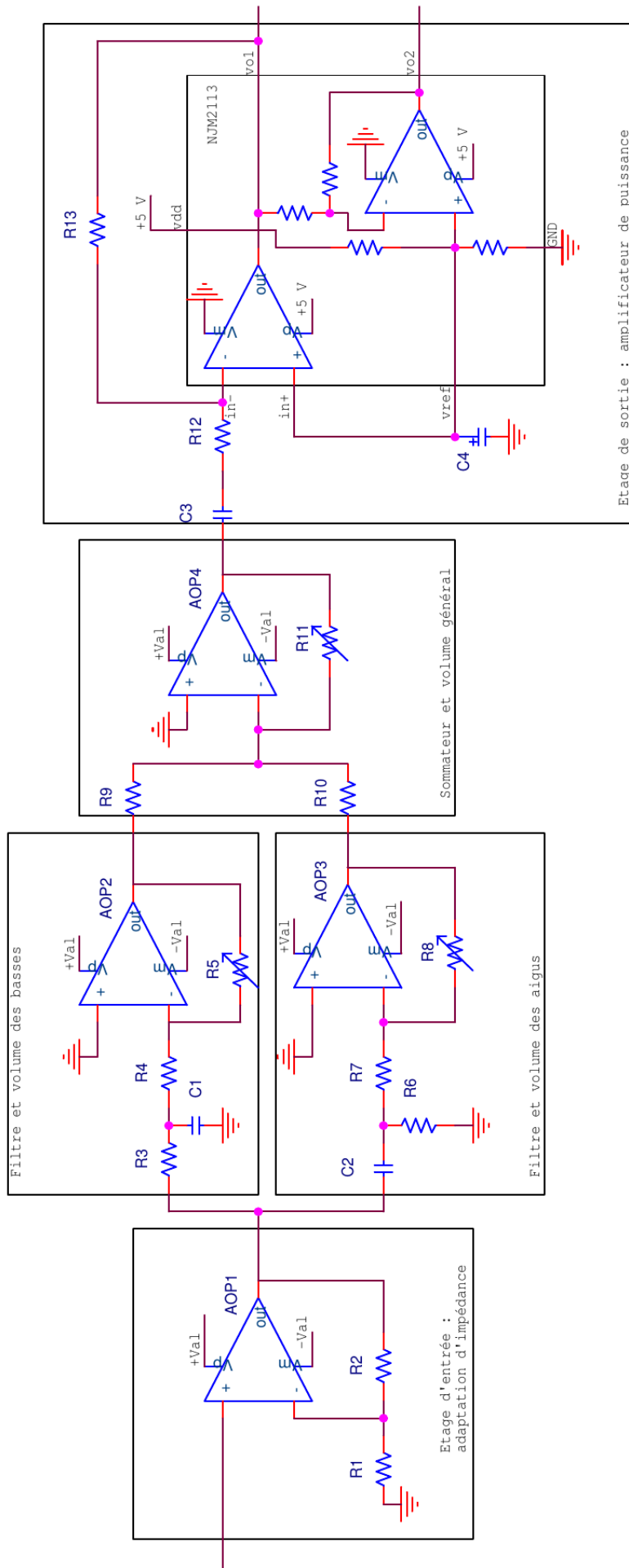
On peut donc trouver sa réponse en fréquence :

$$\begin{aligned} |H(j\omega)| &= \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Leftrightarrow \frac{R_4}{\sqrt{(R_3 + R_4)^2 + (\omega C_1 R_3 R_4)^2}} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \Leftrightarrow 2R_4^2 &= (R_3 + R_4)^2 + (\omega C_1 R_3 R_4)^2 \\ \Leftrightarrow \omega &= \frac{\sqrt{2R_4^2 - (R_3 + R_4)^2}}{C_1 R_3 R_4} \\ \Leftrightarrow \omega &= 3600 \\ \Leftrightarrow f &= 573\text{Hz} \end{aligned}$$

La fréquence de coupure est donc 573Hz. 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 2e 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.

2.2.7 Schéma final

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



$R_1 = 1k\Omega$	$R_2 = 39k\Omega$	$R_3 = 2.7k\Omega$	$R_4 = 100k\Omega$	$R_5 = 100k\Omega$	$R_6 = 2.7k\Omega$
$R_7 = 100k\Omega$	$R_8 = 100k\Omega$	$R_9 = 22k\Omega$	$R_{10} = 22k\Omega$	$R_{11} = 100k\Omega$	$R_{12} = 22k\Omega$
$R_{13} = 22k\Omega$	$C_1 = 100nF$	$C_2 = 100nF$	$C_3 = 330nF$	$C_4 = 1\mu F$	
AOP 1 à 4 = TLV274IN		+Val = 5 V		-Val = -5 V	

3 Manipulation - Réalisation pratique

Vous allez à présent réaliser le montage. Voici quelques recommandations d'usage :

- Assemblez **un étage à la fois** et testez-le individuellement avant de le connecter au reste du montage.
- Vous avez deux packages TLV274IN pour un total de huit AOP, mais vous n'en avez besoin que de quatre. Aérez votre montage pour vous faciliter la tâche.
- Exploitez intelligemment les lignes d'alimentation le long du protoboard afin de propager la masse et les ± 5 V.

Question 14. Commencez par réaliser le circuit permettant de générer une tension de -5 V à l'aide du circuit ADM660 et de deux condensateurs de 10pF.

Astuce

Référez-vous à la fiche technique, vous devez réaliser le montage « *Voltage Inverter Configuration (ADM660)* ».

Réponse :

Pour les prochaines questions, utilisez une sinusoïde issue du générateur pour tester vos montages.

Question 15. Réalisez l'étage d'entrée de l'amplificateur et vérifiez que vous obtenez bien un gain de 40.

Astuce

Sur le TLV274IN, branchez la patte 4 à l'alimentation de 5 V et la patte 11 à celle de -5 V.

Réponse :

Question 16. Réalisez l'étage « filtre et volume des basses » **seul** et vérifiez que vous obtenez un gain compris entre -1 et 0 à 100 Hz et que les fréquences supérieures à 605 Hz sont bien atténuées.

Astuce

Pour utiliser le potentiomètre, connectez la patte du milieu et l'une des deux autres.

S'il fonctionne correctement, connectez la sortie de l'étage d'entrée à la résistance R_3 .

Réponse :

Question 17. Réalisez l'étage « filtre et volume des aigus » **seul** et vérifiez que vous obtenez un gain compris entre -1 et 0 à 1 kHz et que les fréquences inférieures à 605 Hz sont bien atténuées.

S'il fonctionne correctement, connectez la sortie de l'étage d'entrée au condensateur C_2 .

Réponse :

Question 18. Réalisez l'étage « volume général » **seul** en omettant R_{10} dans un premier temps. Vérifiez que vous obtenez un gain compris entre -4 et 0.

S'il fonctionne correctement, connectez la sortie de l'étage de contrôle des basses à R_9 . Ajoutez ensuite la résistance R_{10} et connectez-y la sortie de l'étage de contrôle des aigus.

Réponse :

Question 19. Réalisez l'étage de sortie **seul**.

Astuce

Certains éléments sont déjà à l'intérieur du NJM2113D, vous ne devez ajouter que C_3 , C_4 , R_{12} et R_{13} .

Astuce

Aidez-vous de la fiche technique pour déterminer la fonction de chaque pin :

Patte	Nom	Connectée à ...
1	CD	Inutilisée
2	Vref	C_4
3	+Vin, in+	C_4
4	-Vin, in-	R_{12}
5	Vout1, vo1	R_{13}
6	V+, vdd	+5 V
7	GND	Masse
8	Vout2, vo2	-

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 $V_{o2} - V_{o1}$ sur un seul canal de l'oscilloscope. Pourquoi ?

Réponse :

Question 20. 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 ?

Réponse :

Question 21. Une fois que vous avez confirmé que le montage fonctionne à l'aide du générateur et de l'oscilloscope, remplacez ces appareils par des connecteurs Jack.

⇒ En entrée, connectez RING2 à la masse et RING1 à l'entrée de votre montage.

⇒ En sortie, connectez RING2 à la masse, RING1 à vo1 et TIP à vo2.

Réponse :