



Physique des composants passifs

TP sur la transduction du son

AHNANI Ali, BENNANE Sami

16/12/2024

Table des matières

1	Introduction	1
2	Étude théorique	2
2.1	Analyse globale du circuit	2
2.2	Étude des transducteurs	4
2.2.1	Microphone à électret	4
2.2.2	Haut-parleur en mode récepteur	5
2.3	Étude de l'amplificateur	6
2.3.1	Analyse théorique du comportement de l'ALI	6
2.3.2	Tracé des diagrammes de Bode sur PartQuest	7
3	Analyse expérimentale des transducteurs sonores	9
3.1	Étude des transducteurs seuls	10
3.1.1	Analyse expérimentale du microphone à électret seul	10
3.1.2	Analyse expérimentale du haut-parleur seul	11
3.2	Étude de l'amplificateur	12
3.2.1	Tracé du diagramme de Bode de l'amplificateur	12
3.3	Étude de la chaîne complète	12
3.3.1	Analyse du haut-parleur intégré dans le montage	12
3.3.2	Analyse du microphone à électret intégré dans le montage	14
4	Conclusion	16
5	Annexes :	17
5.1	Historique	17
5.2	Résultats théorique	18
5.2.1	Analyse de l'amplificateur opérationnel	18
5.3	Bibliographie	19
5.3.1	Propriétés du microphone à électret	19
5.3.2	Propriétés du Haut Parleur	19
5.3.3	Datasheet de l'ALI AD8542	19

1

Introduction

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux transducteurs acoustiques ainsi qu'à leur principe de fonctionnement à travers l'exemple du microphone à électret et du haut-parleur en mode récepteur. La transduction est le processus de transformation d'un signal physique en un signal physique d'une autre nature : dans le cadre de notre étude, il s'agit de la conversion de signaux sonores en signaux électriques. L'analyse des

dispositifs transducteurs relatifs aux signaux sonores et électriques est pertinente, car ils sont très utilisés pour de nombreuses applications : les écouteurs filaires et les capteurs sonores, par exemple. Notre rapport est divisé en plusieurs parties :

- Une première approche théorique pour saisir les différents pôles fonctionnels du transducteur : le pôle de polarisation, le pôle de transduction et le pôle d'amplification. Il s'agit aussi de faire l'étude de l'influence des condensateurs sur le montage et de leurs contributions au montage.
- Une approche expérimentale pour mettre en œuvre le système et l'exploiter dans différentes conditions, après avoir établi les premières réflexions théoriques. Nous avons à disposition un kit qui contenait des condensateurs de différentes capacités, un microphone à électret, un haut-parleur et des résistances.

Pour l'étude théorique, nous utiliserons le cours disponible dans l'unité pédagogique PCP (Physique des Composants Passifs) ainsi que des ressources numériques pour faciliter notre compréhension du dispositif, notamment pour nous aider à comprendre le fonctionnement du microphone à électret. Pour l'exploitation des résultats expérimentaux, nous utiliserons des logiciels adaptés tels que Waveforms et Partquest.

2

Étude théorique

2.1 Analyse globale du circuit

La transduction est assurée par le haut-parleur (en bleu à gauche) et le microphone à électret (en bleu à droite) car ils transforment un signal électrique en un signal sonore. Le microphone à électret est un microphone composé d'un condensateur. Le choix d'utiliser l'un ou l'autre est établi grâce à un interrupteur qui permet de le relier à l'amplificateur opérationnel AD8542 (en vert).

Évoquons d'abord le premier pôle du montage (en rouge). La capacité C_1 a pour rôle d'éliminer les fréquences parasites et le bruit qui se produiraient à hautes fréquences.

En effet, si on considère son impédance, donnée par :

$$Z_{C_1} = \frac{1}{jC_1\omega},$$

et qu'on se positionne à très hautes fréquences, on a :

$$Z_{C_1} \rightarrow 0.$$

Dans ce régime de fréquences, le condensateur C_1 est assimilable à un fil, et il court-circuite la résistance R_2 , qui devient alors assimilable à un interrupteur ouvert. Ainsi, les fréquences parasites sont « tirées » vers la masse et sont mises hors de portée du reste du circuit.

Cette partie du montage assure la polarisation. En effet, elle permet au montage de fonctionner correctement malgré de possibles perturbations extérieures. Considérons à présent la partie du circuit suivante : On a un montage à émetteur commun constitué d'un transistor et d'une résistance R_3 (en violet) qui servent à amplifier le signal sonore reçu. La capacité C_2 a pour objectif d'éliminer la composante continue. En effet, en régime DC, la capacité ne laisse pas passer les grandeurs continues. C'est donc uniquement la composante alternative que l'on souhaite amplifier.

Enfin, vient la partie dédiée à l'amplification (en orange). Les capacités C_3 et C_4 sont des condensateurs de lissage : ils permettent à l'alimentation de l'amplificateur opérationnel AD8542 d'être plus stable face aux parasites en hautes fréquences.

En effet, tout comme la capacité C_1 , elles font dévier les fréquences parasites vers la masse.

En appliquant le théorème de Millman, pour une entrée $V_e = V_+$ et pour des hautes fréquences, on a pour la tension de sortie V_{out} :

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) V_e.$$

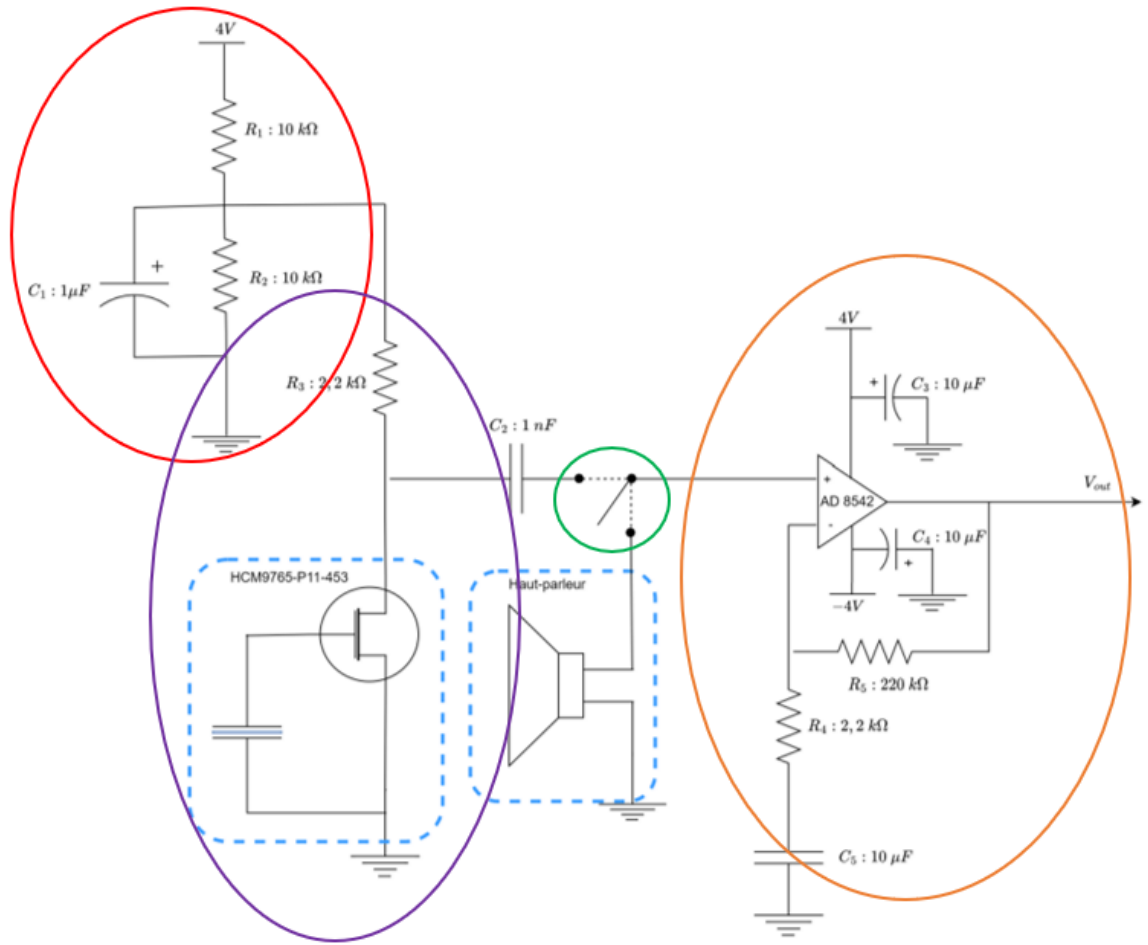


FIGURE 2.1 – Illustration du schéma électrique

Ainsi, on obtient un gain de :

$$G = 1 + \frac{R_5}{R_4} = 101.$$

Le signal est donc amplifié avec un gain de 101. (cf. annexe 5.2.1)

2.2 Étude des transducteurs

2.2.1 Microphone à électret

Dans cette étude, nous allons commencer par citer les composants du microphone à électret, puis nous effectuerons une analyse détaillée de chacune de ses composantes.

Le microphone à électret comprend un condensateur avec deux parois, une paroi fixe et une paroi mobile, ainsi qu'un transistor.

Le transistor sert à transformer un faible signal mécanique en un signal électrique d'amplitude amplifiée. Quant à lui, le condensateur permet de convertir un signal sonore c'est à dire une vibration acoustique, en un signal électrique, c'est à-dire en une tension. Lorsqu'on émet des ondes sonores, la paroi mobile du condensateur vibre et cette vibration change la distance entre les deux parois en modifiant alors la capacité du condensateur.

Ce phénomène de conversion repose sur les principes de l'électromagnétisme, où la variation de la distance entre les parois du condensateur induit des modifications du champ électrique. Dans ce cadre, l'équation de Maxwell-Gauss établit le lien entre la charge électrique générée par l'électret et le champ électrique à l'intérieur du condensateur :

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\rho}{\varepsilon_0}.$$

Ces faibles signaux électriques doivent alors être amplifiés. Le transistor FET, couplé avec la résistance de sortie R_3 du montage (similaire à un montage source commune), amplifie ces signaux faibles pour les rendre exploitables.

Le théorème de Maxwell-Gauss s'écrit :

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

En utilisant le théorème d'Ostrogradsky, on arrive à :

$$\oint_S \vec{E} \cdot \vec{n} dS = \int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV$$

En égalant les deux expressions :

$$\int_V (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

La charge Q induite par la variation de la distance entre la membrane et l'électret modifie localement le champ électrique. Cela se traduit par une variation de la capacité :

$$C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}, \quad \Delta C = C_0 \cdot \left(-\frac{\Delta d}{d} \right)$$

Ainsi, la variation de la charge ΔQ est donnée par :

$$\Delta Q = U \cdot \Delta C$$

Et la variation de tension ΔU s'écrit :

$$\Delta U = -U \cdot \frac{\Delta d}{d}$$

Enfin, un déplacement de l'ordre du nanomètre Δd donne une variation de tension ΔU très faible, ce qui explique la sensibilité du microphone à électret.

2.2.2 Haut-parleur en mode récepteur

Le haut-parleur est, lui, un dispositif composé d'une membrane et d'une bobine mobile sous un champ magnétique généré par un aimant permanent.

En effet, lorsque des vibrations acoustiques atteignent la membrane, elles provoquent son déplacement. On a alors une variation de la surface bilatérale de la membrane. Comme le flux magnétique est proportionnel à cette surface, lorsque la membrane vibre, le flux magnétique varie, ce qui crée une force électromagnétique qui est à l'origine de la formation d'une tension, selon la loi de Faraday.

Le fonctionnement du haut-parleur en mode récepteur se base sur le principe de l'équation de Maxwell-Faraday :

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

où $\vec{E}$ représente le champ électrique et $\vec{B}$ le champ magnétique.

La loi de Faraday évoquée précédemment est la forme intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday, par l'application du théorème de Stokes.

Le flux magnétique à travers une spire du haut-parleur est donné par :

$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \vec{n} dS$$

De plus, la force électromotrice induite dans une spire de la bobine s'écrit :

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Comme :

$$\Phi_B(t) = \int_S B(t) \cos(\theta) dS$$

On a :

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \int_S \frac{\partial B}{\partial t} \cos(\theta) dS$$

D'où, l'expression :

$$\mathcal{E} = -\int_S \frac{\partial B}{\partial t} \cos(\theta) dS$$

Localement, la loi de Maxwell-Faraday s'écrit :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

— Par le théorème de Stokes :

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot \vec{n} dS$$

— En substituant $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ dans l'intégrale de surface déterminée précédemment :

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} dS$$

Ainsi, le mouvement de la bobine dans le champ magnétique influe sur la force électromotrice comme suit :

$$\mathcal{E} = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

D'où finalement, pour N spires :

$$\mathcal{E}_{\text{totale}} = N \cdot \mathcal{E}$$

2.3 Étude de l'amplificateur

2.3.1 Analyse théorique du comportement de l'ALI

L'amplificateur possède une rétroaction négative, donc il fonctionne en régime linéaire. De plus, l'ALI est polarisé à $\pm 4V$ et possède deux capacités de découplage, notées C_3 et C_4 . Dans le cadre de ce montage, ses capacités permettent de filtrer les perturbations et de stabiliser les tensions d'alimentation de l'ALI.

Étudions désormais le comportement fréquentiel du circuit : En basses fréquences, le condensateur est équivalent à un interrupteur ouvert, donc l'ALI est alimenté aux tensions $\pm 4V$. De plus, le courant circulant à travers les résistances R_4 et R_5 est nul, car les courants de polarisations sont très faibles et que le condensateur bloque le passage du courant. Ainsi, l'ALI fonctionne en suiveur et ne permet pas l'amplification du signal ; on obtient alors en sortie exactement le signal électrique fourni par le microphone ou le haut-parleur.

Pour les hautes fréquences, le condensateur est équivalent à un fil, il permet alors de "faire dévier" les hautes fréquences vers la masse, empêchant ainsi ces fréquences parasites d'interférer avec le fonctionnement du circuit. On reconnaît alors pour ces fréquences un montage amplificateur non inverseur dont le gain est donné par la relation $G = 1 + \frac{R_5}{R_4}$; avec les valeurs prises par les résistances, on obtient une grosse amplification, avec un gain de $G = 101$. On prendra soin de prendre un signal d'entrée de faible amplitude pour ne pas saturer l'ALI .

$$V_{\text{out}} = \left(1 + \frac{jR_5C_5\omega}{1 + jR_4C_5\omega} \right) V_E$$

On reconnaît un montage filtre passe-haut dont la fréquence de coupure est donnée par :

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_4 C_5},$$

Dans ce cas, la fréquence de coupure est $f_c = 7,2 \text{ Hz}$, cette valeur de fréquence est très basse, la capacité a alors un rôle de filtrage de la composante continue du signal, puisque celle-ci ne passe pas à travers le condensateur en régime DC. En effet, en régime continu, l'impédance du condensateur est donnée par :

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \rightarrow \infty \quad \text{lorsque} \quad \omega \rightarrow 0.$$

2.3.2 Tracé des diagrammes de Bode sur PartQuest

Pour compléter cette étude fréquentielle du comportement de l'amplificateur, nous allons utiliser le logiciel Partquest, pour tracer les diagrammes de Bode du montage sans C5 et avec C5.

On retrouve bien expérimentalement un gain en dB caractéristique d'un filtre passe-bas. Aux basses fréquences, on retrouve un gain de 101, et une asymptote après la fréquence de coupure de 40 dB par décade. De plus, on lit une fréquence de coupure d'environ 10 kHz.

De même, en rajoutant la capacité C5, le montage est un filtre passe-bande dont la fréquence de coupure basse est d'environ 7 Hz. En traçant à des plus basses fréquences le diagramme de Bode, on pouvait notamment retrouver le comportement suiveur vu dans l'étude théorique précédente.

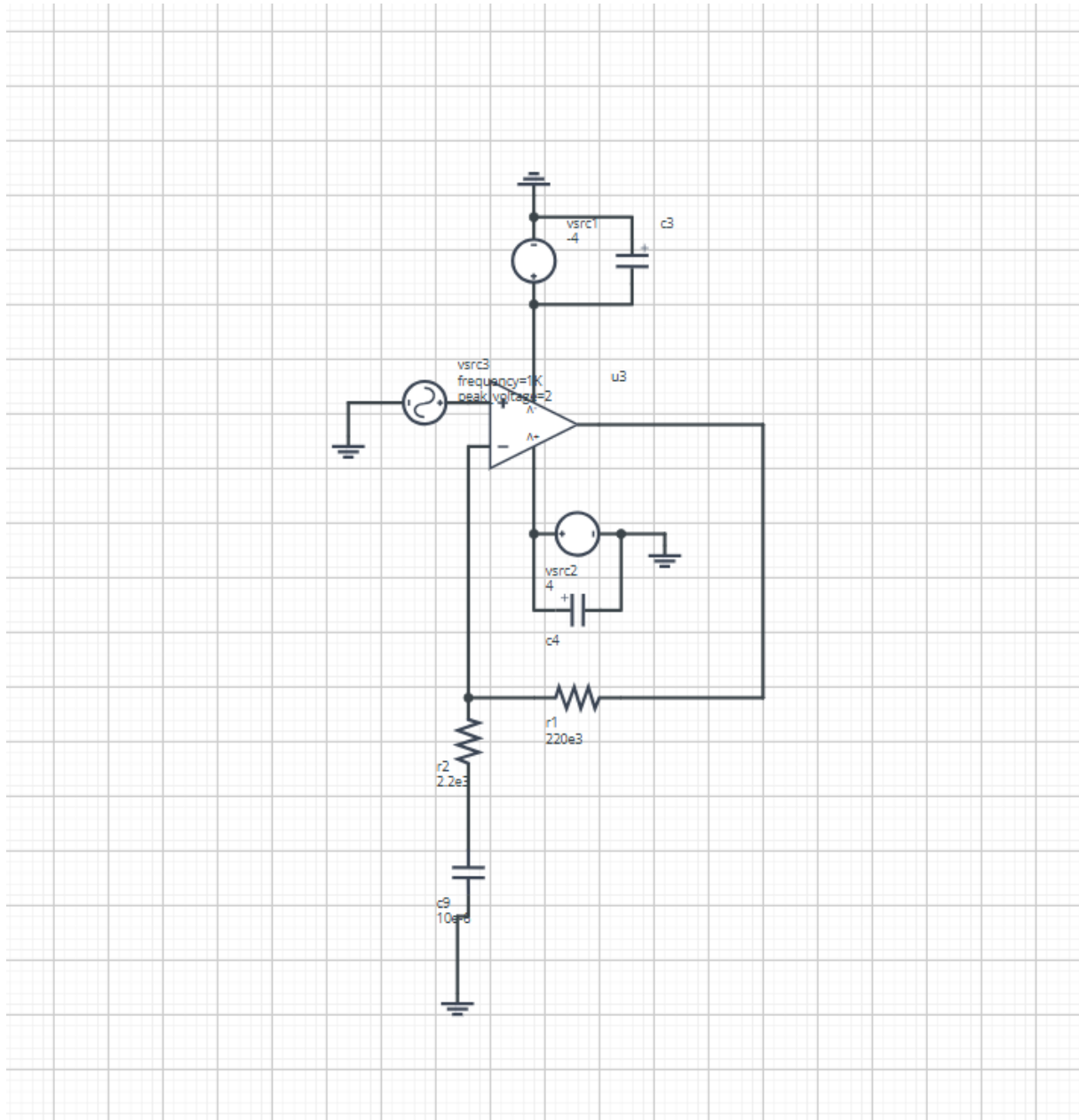


FIGURE 2.2 – Schéma du circuit.

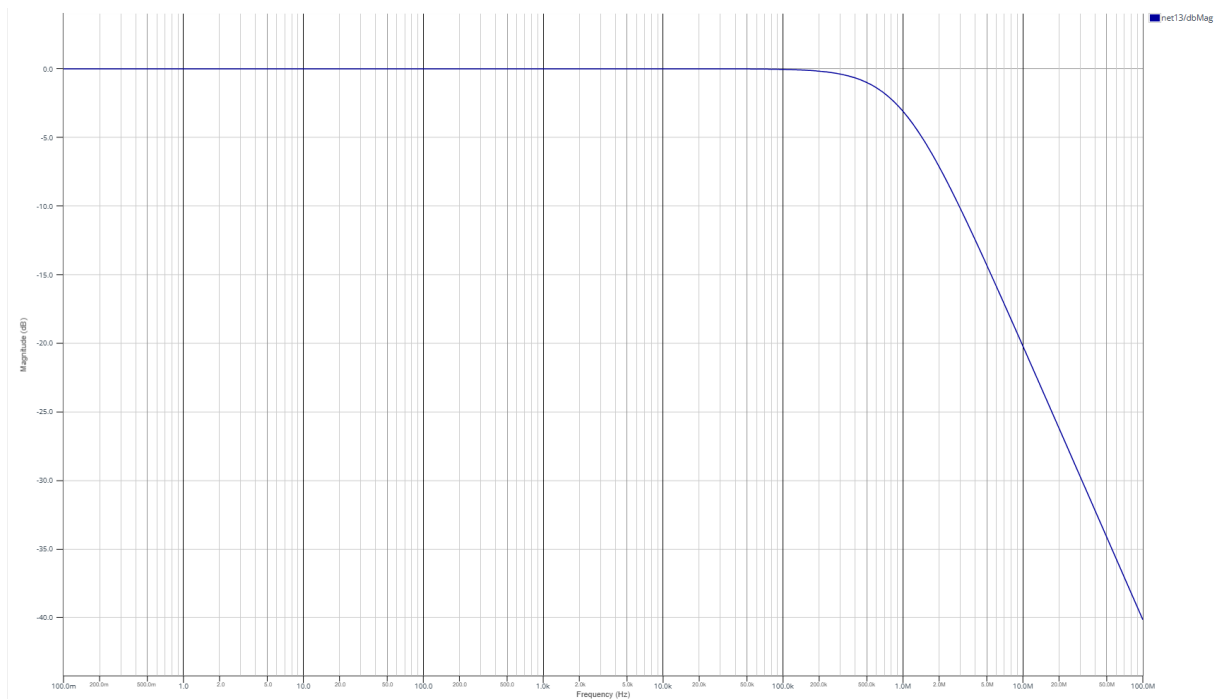


FIGURE 2.3 – Réponse fréquentielle du montage sans C5.

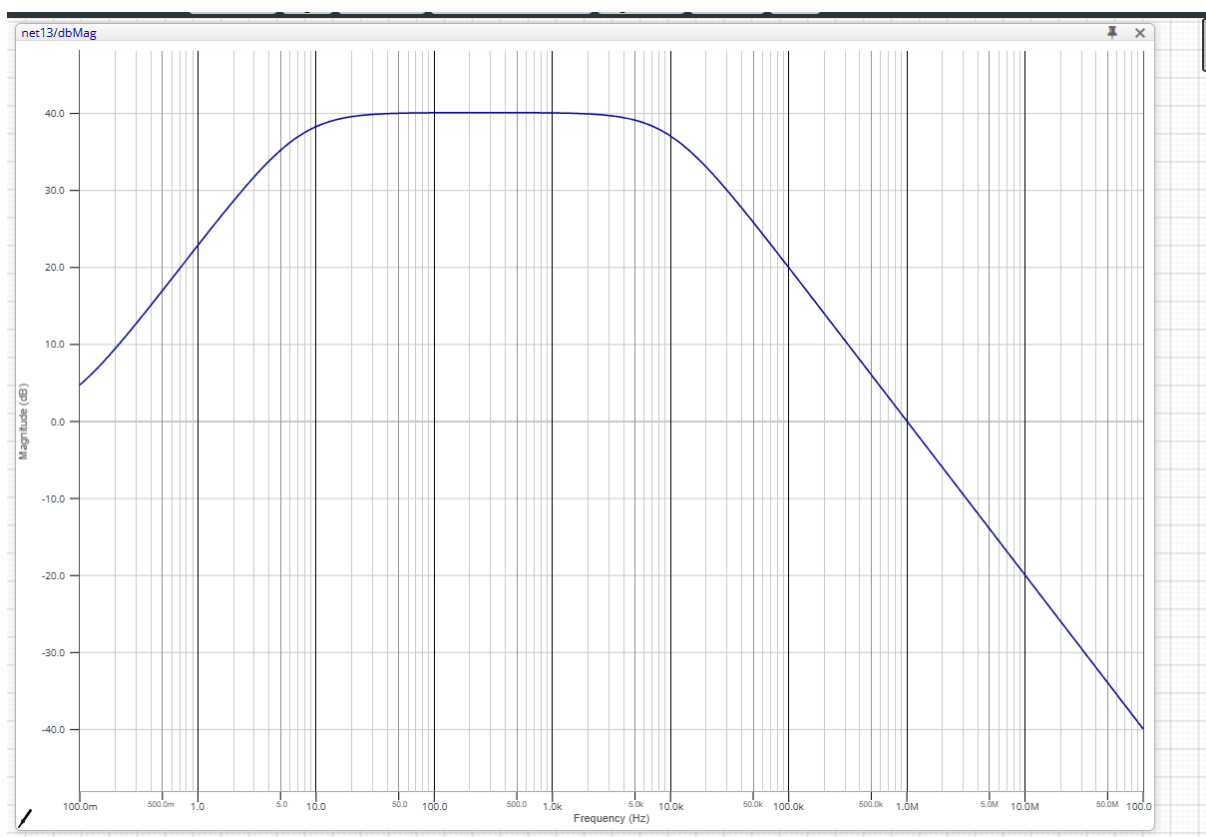


FIGURE 2.4 – Réponse fréquentielle avec C5.

3

Analyse expérimentale des transducteurs sonores

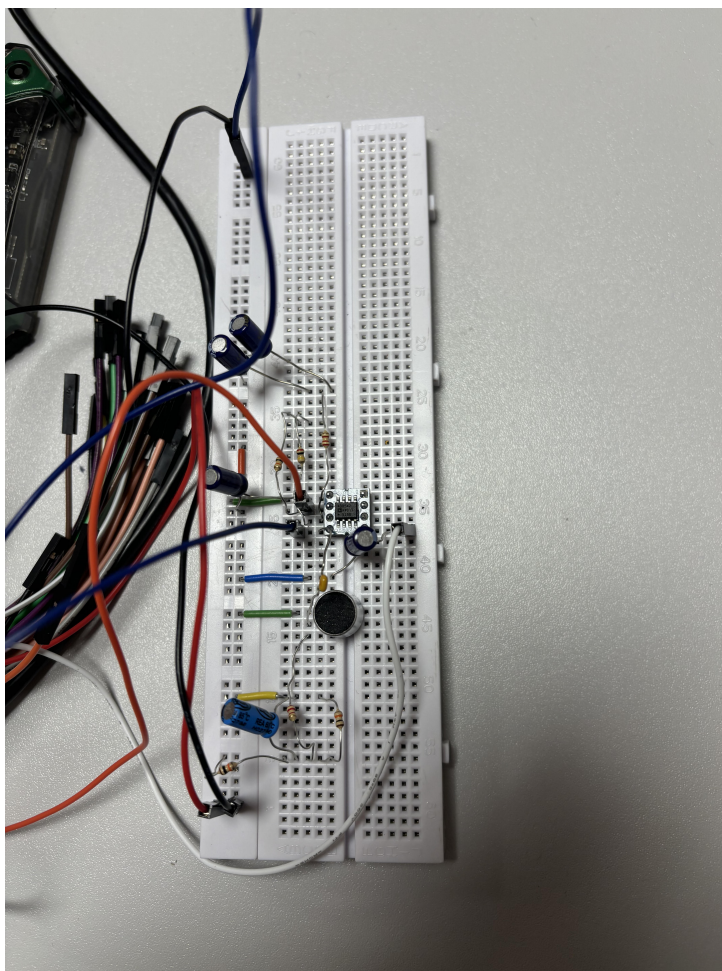


FIGURE 3.1 – Mise en place du circuit

3.1 Étude des transducteurs seuls

3.1.1 Analyse expérimentale du microphone à électret seul

Pour câbler le microphone à électret, on le branche au pôle de polarisation. On commence par interpréter expérimentalement le fonctionnement du microphone à électret en mesurant le signal en sortie de la capacité C2. On commence par choisir une alimentation de $\pm 4V$ avec l'onglet "Supplies" puis on génère un signal de fréquence de 8KHZ avec l'application FrequencyGenerator, puis on effectue, en appuyant sur "Scope", une acquisition sur le logiciel Waveform. Ensuite, on effectue une mesure avec l'option "Measurements". On observe alors un signal en sortie de même fréquence (8 KHZ) que le signal envoyé. comme ci-dessous. La FFT présentée en bas de l'image illustre la transformée de Fourier de ce signal de sortie. On voit que le maximum de fréquence se situe autour de 8kHz sur celle-ci. Il convient également de noter qu'il nous arrivait d'ajuster le mode "range" pour avoir le bon nombre de Volts par division, ce qui nous permet de mieux observer le signal (de le voir agrandi).

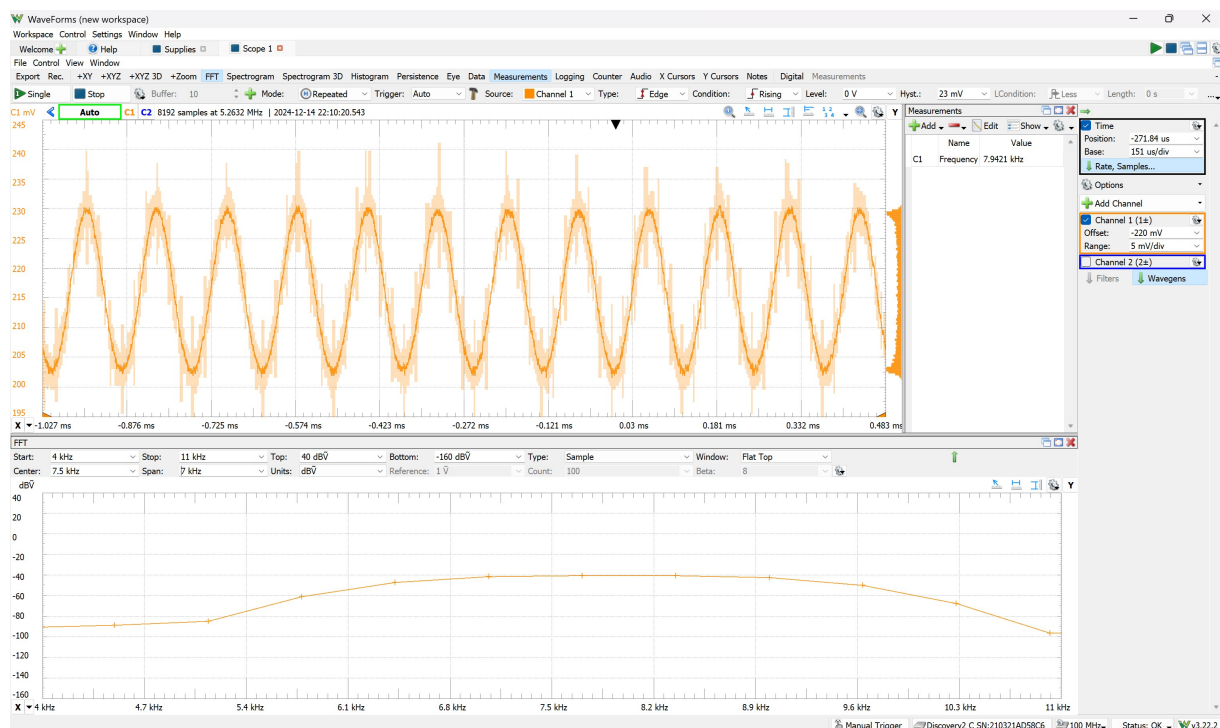


FIGURE 3.2 – Réponse du microphone pour une fréquence 8KHZ

3.1.2 Analyse expérimentale du haut-parleur seul

On procède de manière analogue aux mesures du microphone à électret. On commence par définir les tensions dans l'onglet Supplies et par émettre un signal sonore, cette fois-ci de 1.2 kHz (choisi de manière arbitraire). En revanche, comme le haut-parleur n'a pas besoin d'alimentation stabilisée, on le branche directement à l'oscilloscope pour en étudier son comportement. On observe un signal sinusoïdal de même fréquence (1.2 KHZ), ainsi on retrouve bien le fonctionnement en récepteur du haut-parleur étudié précédemment. Sur la FFT, on observe que la fréquence dominante est clairement autour de 1,2 kHz et, à côté de ça, les autres valeurs sur le spectre montrent des harmoniques très faibles ou du bruit résiduel.



FIGURE 3.3 – Réponse du haut-parleur pour une fréquence de 1.2KHZ

3.2 Étude de l'amplificateur

3.2.1 Tracé du diagramme de Bode de l'amplificateur

On câble seulement l'amplificateur opérationnel AD8542 et on trace le diagramme de Bode avec l'option Network sur le logiciel Waveforms. On observe que l'on a un passe-bande, le comportement fréquentiel est cohérent avec la simulation Partquest, même gain sur la bande passante et même comportement fréquentiel.

Les fréquences de coupure sont telles que $G(f_c) = \frac{G_{\max}}{\sqrt{2}}$.

Dans notre cas, on mesure ainsi une fréquence de coupure basse de 3 Hz et une fréquence de coupure haute de 10 kHz, ce qui est aussi cohérent avec la simulation de Partquest. En somme, l'expérience est fidèle à la simulation Partquest en ce qui concerne son comportement fréquentiel et ses variations.

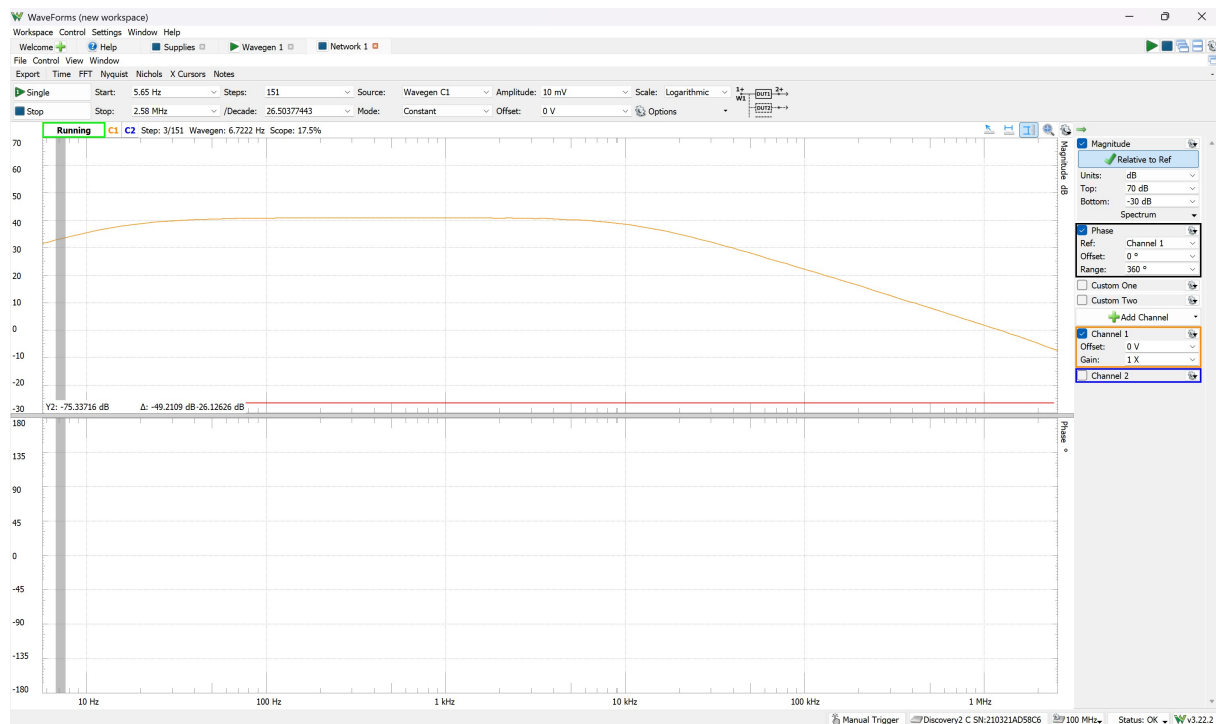


FIGURE 3.4 – Diagramme de Bode en Gain

3.3 Étude de la chaîne complète

3.3.1 Analyse du haut-parleur intégré dans le montage

Nous avons étudié précédemment chaque partie du montage séparément, maintenant nous allons assembler le montage complet en couplant le haut-parleur ou le microphone avec l'amplificateur afin de valider notre étude théorique. Une fois que le montage complet est mis en place, on effectue les mesures de la même façon que les études expérimentales précédentes. Sur l'application (FrequencyGenerator), on fait varier la fréquence du signal d'entrée sur une plage [500 Hz ; 12 kHz] jusqu'à avoir un écart entre l'entrée (en orange) et la sortie de l'amplificateur (en bleu) le plus grand, c'est-à-dire le gain en amplitude le plus grand pour l'amplificateur. Ainsi, la valeur de la fréquence choisie est de 1,9 kHz. À cette fréquence, on mesure un gain :

$$G = \frac{250 \text{ mV}}{2,44 \text{ mV}} = 102$$

On envoie 3 sons simultanément, qui ont 3 fréquences différentes (1kHz, 2.5kHz et 5kHz), et on observe sur la FFT 3 pics correspondant aux 3 fréquences envoyées, ce qui est cohérent : le haut-parleur amplifie les 3 fréquences envoyées.

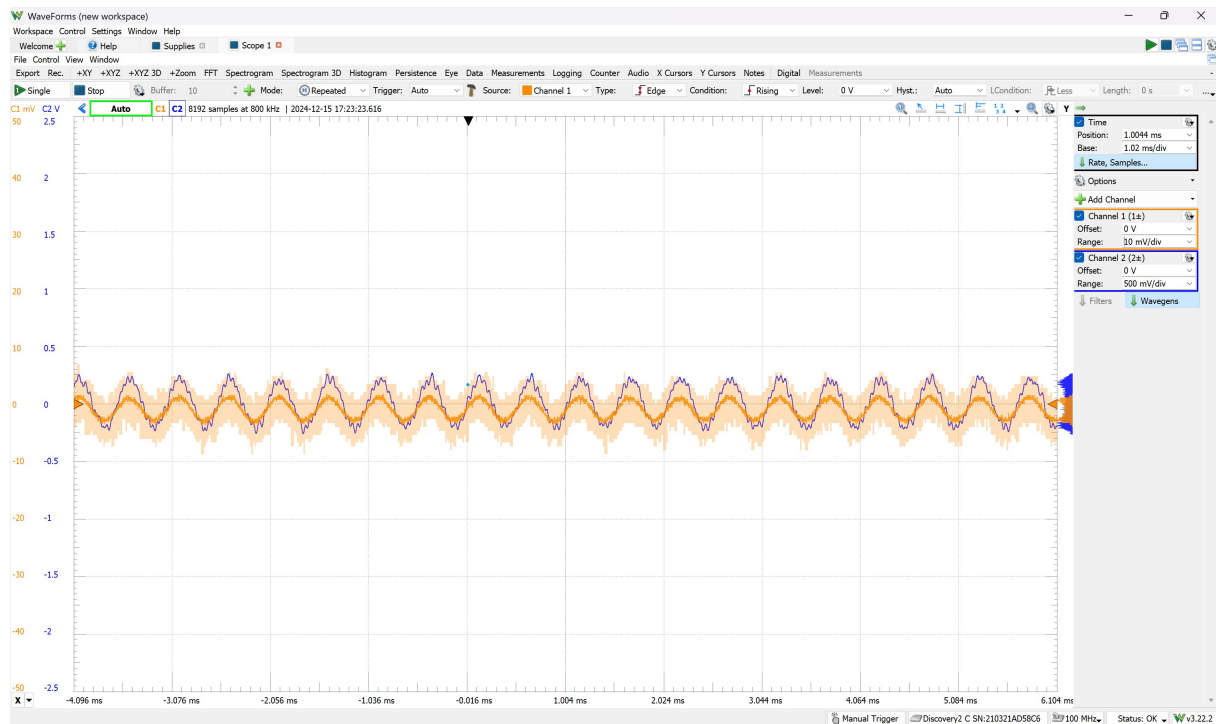


FIGURE 3.5 – Réponse du haut-parleur pour une fréquence de 1.9KHZ



FIGURE 3.6 – Réponse du haut-parleur pour 3 signaux aux fréquences 1 kHz, 2.5 kHz et 5 kHz

3.3.2 Analyse du microphone à électret intégré dans le montage

On câble la chaîne complète avec le microphone à électret, et on veut chercher la fréquence pour laquelle le gain est maximal. Il y a un mode qui permet de faire varier la fréquence de manière continue. On a choisi le début de la plage de fréquences à 500 Hz et la fin à 10 000 Hz et on a fixé la durée de la diffusion de 160 secondes. On a alors observé qu'autour de 1900 Hz, on a un écart maximal entre la courbe du signal non amplifié et la courbe du signal amplifié. Il est intéressant de noter que nous avons eu des difficultés à obtenir des signaux exploitables car nous avons une fréquence de 50 Hz, probablement dû aux appareils extérieurs comme les appareils électroménagers, ce qui nous a fait perdre du temps et nous a contraints à changer d'environnement de travail . On mesure un gain d'environ :

$$G = \frac{390 \text{ mV}}{4,8 \text{ mV}} = 81.25$$

Comme pour le haut-parleur, on envoie 3 fréquences (2kHz et 2,5kHz et 3kHz), ce qui est cohérent avec les pics de la FFT.

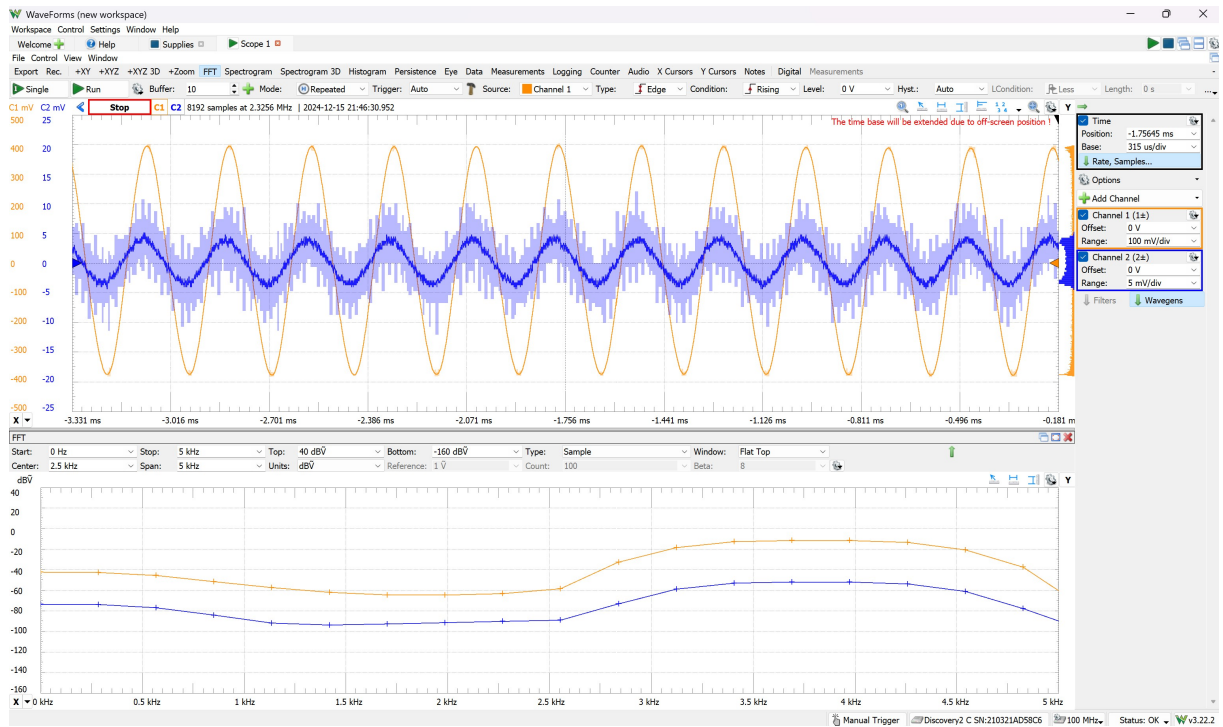


FIGURE 3.7 – Réponse du microphone pour une fréquence de 1.9 kHz



FIGURE 3.8 – Réponse du microphone pour 3 signaux aux fréquences 2 kHz, 2.5 kHz et 3 kHz

4

Conclusion

Lors de ce TP, nous avons pu étudier en profondeur le comportement des transducteurs du son, d'une part par des études théoriques et d'autre part par des études expérimentales de ceux-ci. Ainsi, en amplifiant un signal converti par le haut-parleur en mode récepteur ou le microphone à électret, on a pu observer et analyser les caractéristiques fréquentielles du signal obtenu, confirmer expérimentalement les résultats théoriques attendus, et mettre en évidence le rôle crucial des différents composants du circuit, notamment l'amplificateur opérationnel et les condensateurs de découplage, dans la stabilité et la qualité du signal amplifié. En dehors des résultats obtenus, comme la confrontation entre la théorie et la réalité le montre toujours, nous avons noté que ces études théoriques n'étaient pas toujours en accord avec les expériences, car des facteurs tels que les perturbations externes, les imprécisions des composants ou encore les conditions expérimentales peuvent influencer les résultats finaux et introduire des écarts par rapport aux prévisions théoriques.

5

Annexes :

5.1 Historique

L'évolution de la transduction du son est étroitement liée aux progrès techniques et industriels. Dans l'Antiquité, les sons des villes étaient dominés par les bruits naturels, comme les sabots de chevaux, les roues sur les pavés, tandis que la révolution industrielle au XIXe siècle a introduit des sons mécaniques, comme les machines à vapeur et le chemin de fer. L'automobile, dès la fin du XIXe siècle, a marqué un tournant, devenant un son omniprésent qui symbolise encore aujourd'hui la modernité urbaine.

Parallèlement, l'invention du téléphone en 1875 par Graham Bell a révolutionné la transmission du son, en permettant la transduction des ondes en signaux électriques, ce qui a ouvert la voie au développement des technologies modernes du son, comme la radio, le phonographe et la télévision, qui reposent toutes sur la maîtrise de cette transduction. En effet, les sons naturels ont progressivement été remplacés par des sons artificiels, reflet des changements dans notre environnement sonore moderne.

5.2 Résultats théorique

5.2.1 Analyse de l'amplificateur opérationnel

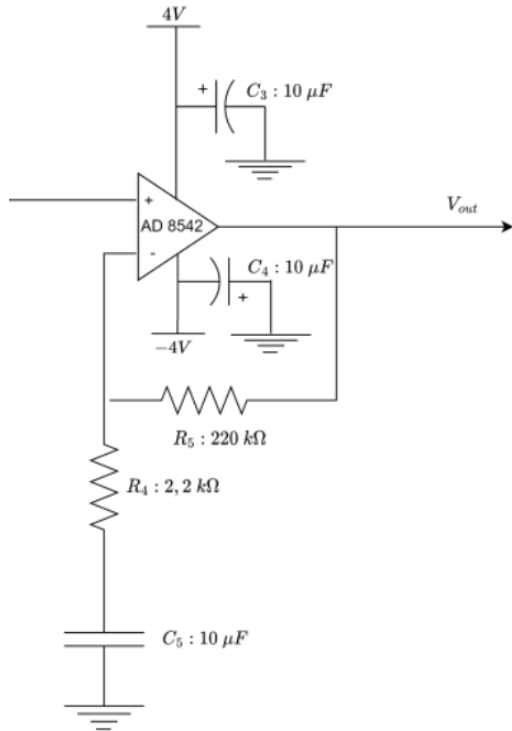


figure Schéma du montage de l'amplificateur opérationnel.

Analyse théorique

Hypothèses Nous considérons un amplificateur opérationnel en régime linéaire avec les hypothèses suivantes :

- L'amplificateur fonctionne avec une **rétroaction négative**, donc $v_+ = v_-$.
- L'impédance d'entrée de l'amplificateur opérationnel est **infinie**, donc $I_+ = I_- = 0$.
- Le théorème de Millman est appliqué pour déterminer le potentiel v_- .

Millman appliqué au potentiel v_- D'après le théorème de Millman, le potentiel v_- s'écrit :

$$v_- = \frac{\frac{v_{out}}{R_5}}{\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_3}}}.$$

Expression de la fonction de transfert L'expression de la fonction de transfert (gain en tension) est donnée par :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{1 + j\omega R_5 C_3}{1 + j\omega R_4 C_3}.$$

5.3 Bibliographie

5.3.1 Propriétés du microphone à électret

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/technologies-de-l-information-th9/captation-et-restitution-des-sons-42618210/microphones-e5160/microphone-a-electret-e5160niv1.html>

5.3.2 Propriétés du Haut Parleur

https://pcjoffre.fr/Data/tp/TP7_haut_parleur.pdf

5.3.3 Datasheet de l'ALI AD8542

<https://www.analog.com/en/products/ad8542.html>