

TP E7 : Traitement analogique d'un signal acoustique

Objectifs

Ce TP a pour objectif le traitement d'un signal électrique, image d'un signal acoustique, à l'aide de filtres.

En appuyant sa réflexion sur les documents fournis, on souhaite accentuer les basses d'un enregistrement sonore tout en y diminuant la présence du bruit, et réaliser un dispositif externe de contrôle de volume.

Plusieurs capacités expérimentales devront être maîtrisées à la fin de la séance :

- ★ *Agir sur un signal électrique à l'aide des fonctions simples suivantes : isolation, amplification, filtrage, sommation, intégration.*
- ★ *Mettre en œuvre les fonctions de base de l'électronique réalisées par des blocs dont la structure ne fait pas l'objet d'une étude spécifique.*
- ★ *Associer ces fonctions de base pour réaliser une fonction complexe en gérant les contraintes liées aux impédances d'entrée et/ou de sortie des blocs.*
- ★ *Mettre en œuvre un dispositif expérimental illustrant l'utilité des fonctions de transfert pour un système linéaire à un ou plusieurs étages.*

I. Présentation du matériel

On dispose du matériel listé ci-dessous :

- ☐ Un lecteur mp3 et des écouteurs (à amener par les élèves, qui seront regroupés par 4 pour ce TP)
- ☐ Un GBF, un oscilloscope, une alimentation stabilisée +15V/-15V
- ☐ Un amplificateur opérationnel, des résistances variables, un potentiomètre, des fils de connexion, une boîte de condensateurs.
- ☐ 1 adaptateur jack 3,5 mm mâle - banane
- ☐ 1 adaptateur jack 3,5 mm femelle - banane

II. Une proposition de protocole

On dispose d'un enregistrement sonore bruité. Dans cet enregistrement, le bruit, qui se superpose au signal utile, est constitué d'un ensemble de fréquences parasites réparties sur l'ensemble du spectre sonore. Le signal utile est quant à lui constitué d'une voix humaine, dont la fréquence typique est de l'ordre de $3 \cdot 10^2$ Hz.

Pour rendre la voix plus intelligible, on souhaite éliminer le bruit de cet enregistrement. Plus exactement, on souhaite diminuer le rapport entre le bruit et le signal utile : nous allons pour cela accentuer les basses de l'enregistrement, en utilisant un filtre constitué d'une résistance et d'un condensateur.

☞ Proposer un filtre simple permettant de réaliser l'opération souhaitée. Mettre en oeuvre le filtrage en choisissant approximativement $R = 5 \cdot 10^2 \Omega$ et $C = 6 \cdot 10^{-7} \text{F}$.

Essayons désormais de justifier la pertinence du choix de ces valeurs de composants.

✎ Déterminer, par le calcul, les impédances d'entrée et de sortie du filtre considéré. S'il vous reste du temps en fin de T.P., proposer une validation expérimentale de l'expression obtenue pour l'impédance d'entrée.

☞ Quel problème est susceptible de poser une impédance d'entrée du filtre trop faible ? Une impédance d'entrée trop élevée ? Vérifier vos prédictions expérimentalement.

☞ Comment est modifié le comportement du filtre par la présence du casque en sortie (on pourra supposer, pour simplifier, que le casque présente essentiellement un comportement résistif) ? A quelle condition cette altération peut-elle être négligée ?

✎ Quel type de filtre pourrait-on proposer pour améliorer la qualité du filtrage effectué ?

Dans un second temps, on souhaite réaliser un dispositif externe de contrôle de volume.

☞ Montrer que le circuit dit « amplificateur inverseur » et présenté dans le document 1, se comporte comme un amplificateur de tension de gain $G = -R_2/R_1$.

☞ Utiliser ce circuit pour réaliser un bouton de contrôle de volume. On prendra $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$.

Réfléchissons désormais aux contraintes imposées par l'utilisation d'un tel circuit, et à la pertinence du choix des valeurs de résistance que nous avons fait.

☞ Proposer un protocole expérimental permettant de vérifier que le circuit proposé fonctionne conformément à l'étude théorique effectuée initialement. Le déphasage de π induit par le système est-il problématique ?

☞ Effectuer le tracé de la caractéristique statique $v_s = f(v_e)$ du filtre ainsi constitué, et mettre en évidence l'existence de domaines de non-linéarité du système. Cela pourrait-il s'avérer problématique ? On pourra observer l'effet de ces non-linéarités sur le spectre du signal de sortie du filtre.

✎ Réaliser l'étude fréquentielle du filtre et mettre en évidence une pulsation de coupure typique du système. Ce comportement fréquentiel peut-il constituer un obstacle à l'utilisation du système en tant que bouton de contrôle du volume ?

✎ Déterminer, par le calcul, les impédances d'entrée et de sortie du filtre étudié.

✎ Quel problème poserait l'utilisation d'une impédance d'entrée trop faible ? Pourquoi l'utilisation d'une grande résistance d'entrée n'est pas ici problématique du fait de l'utilisation d'un amplificateur opérationnel, composant actif ?

✎ Vérifier expérimentalement les prévisions précédentes.

On souhaite enfin réaliser simultanément les différentes opérations évoquées précédemment sur le signal (accentuer les basses, filtrer au mieux le bruit de l'enregistrement et modifier le volume global de l'enregistrement).

✎ Dans quel ordre mettre en cascade les filtres étudiés, pour se simplifier la tâche au maximum ?

✎ Mettre en place le dispositif expérimental permettant de réaliser les opérations souhaitées sur l'enregistrement.

III. Ce qu'il faut retenir !

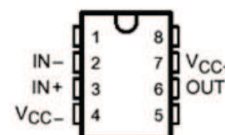
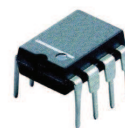
Effectuer sur votre cahier de laboratoire un bilan de TP résumant :

- ★ *les propriétés physiques qui ont été mises en évidence*
- ★ *les lois physiques qui ont été démontrées ou utilisées*
- ★ *les nouvelles fonctions des différents appareils auxquelles vous avez fait appel. Pour ces dernières, préciser leur rôle et les moyens de les activer*

Document 1 - Le montage amplificateur inverseur

L'amplificateur opérationnel (A.O.) est un composant intégré initialement conçu pour effectuer des opérations mathématiques dans les calculateurs analogiques : il permettait de modéliser les opérations mathématiques de base comme l'addition, la soustraction, l'intégration, la dérivation et d'autres.

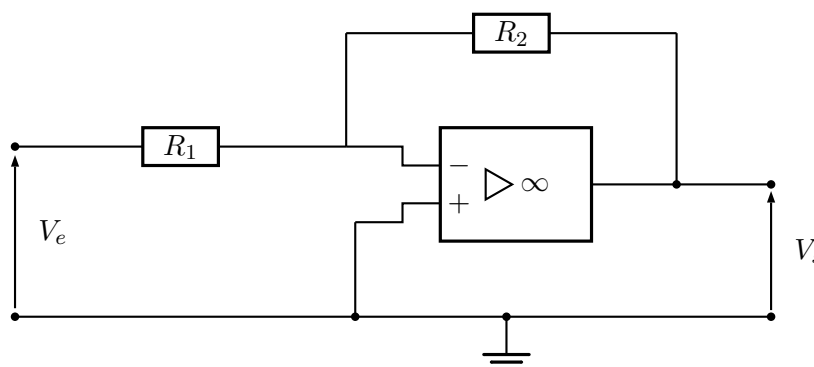
Nous ne rentrerons pas ici dans le détail de sa constitution interne, qui est complexe et met en jeu notamment un nombre assez élevé de transistors.



Parmi les 8 broches de l'amplificateur, 5 vont ici attirer notre attention :

- ★ La broche IN+ est appelée entrée « non inverseuse » et la broche IN- est appelée entrée « inverseuse » : elles constituent les bornes d'entrée de l'amplificateur opérationnel. La broche out correspondant elle, à la sortie de l'amplificateur.
- ★ Les broches V_{CC+} et V_{CC-} constituent quant à elles les bornes d'alimentation de l'amplificateur : ce dernier faisant intervenir des composants actifs tels que les transistors, il doit absolument être alimenté avant toute utilisation. On reliera donc les bornes V_{CC+} et V_{CC-} aux sorties +15V et -15V d'une alimentation stabilisée.

Le circuit ci-dessous, appelé amplificateur inverseur, permet de réaliser une amplification de tension :



Sur ce schéma, on a utilisé la notation conventionnelle de l'amplificateur opérationnel.

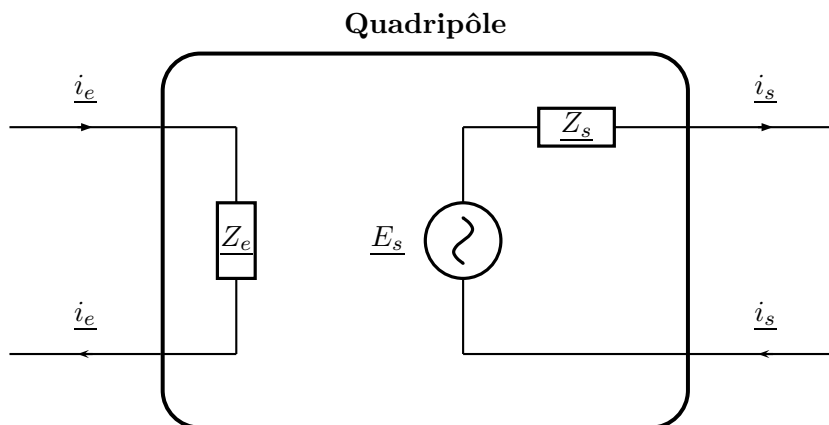
On signale respectivement son entrée inverseuse et son entrée non inverseuse par les symboles $-$ et $+$. Sa sortie constitue la borne de droite sur le schéma. Les broches d'alimentation ne sont pas représentées puisqu'elles ne font pas partie du circuit électrique à proprement parler : elles permettent seulement le fonctionnement des dipôles actifs au sein de l'amplificateur.

Dans le circuit ci-dessus, on admet que le fonctionnement de l'A.O. est idéal, c'est-à-dire qu'il répond aux caractéristiques suivantes :

- ★ Les courants entrant dans l'A.O. au niveau des entrées inverseuse et non inverseuse sont nuls.
- ★ Les potentiels des entrées inverseuse et non inverseuse sont égaux.

Document 2 - Impédances d'entrée et de sortie d'un quadripôle

Pour rendre compte du comportement d'un filtre vis-à-vis du circuit en amont et du circuit en aval, on adopte la modélisation suivante de ce filtre, du point de vue de ses deux bornes d'entrée et de ses deux bornes de sortie :



Dans ce modèle, \underline{Z}_e et \underline{Z}_s sont appelées les impédances d'entrée et de sortie du filtre. L'impédance d'entrée \underline{Z}_e est l'impédance « vue » par le circuit qui alimente le quadripôle. C'est l'impédance que « voit » le système qui alimente le filtre : si le quadripôle est un ampli audio, c'est l'impédance que voit par exemple le lecteur mp3 auquel il est relié.

Du point de vue de ses bornes de sortie, le filtre peut être modélisé par un générateur de Thévenin, d'impédance interne \underline{Z}_s : c'est l'impédance vue par le circuit qui vient après le quadripôle. Si le quadripôle est un ampli audio, c'est l'impédance que voit le haut-parleur ou le casque.

L'impédance d'entrée est facile à déterminer : c'est le rapport de la tension d'entrée sur l'intensité du courant qui rentre dans le circuit.

Concernant la modélisation du filtre en sortie, on peut déterminer la f.é.m. de sortie lorsque le filtre ne débite pas (on se ramène alors à l'étude de la fonction de transfert du filtre) et déterminer aisément son impédance de sortie lorsque sa f.é.m. de sortie est nulle i.e. en l'absence d'alimentation en entrée du filtre (lorsque $V_e = 0$).

On peut montrer que la mise en cascade de deux filtres 1 et 2 n'affecte pas les comportements respectifs de ces filtres « à vide » si l'impédance de sortie du premier filtre $\underline{Z}_{s,1}$ est négligeable devant l'impédance d'entrée du second filtre $\underline{Z}_{e,2}$, c'est-à-dire dès lors que $|\underline{Z}_{s,1}| \ll |\underline{Z}_{e,2}|$.

Document 3 - L'impédance dans le domaine du son

Le site fnac.com propose le « décryptage » suivant :

L'impédance des casques peut varier de 16 à plusieurs centaines d'Ohms. L'impédance est directement liée à la puissance. Elle représente en effet la résistance du casque au passage du signal. Plus celle-ci est élevée, plus il faudra fournir de puissance au casque pour qu'il fonctionne correctement. On comprend bien alors qu'un casque adapté à une écoute sur un appareil connecté au secteur n'aura pas les mêmes exigences qu'un casque relié à un appareil nomade.

L'appareil nomade fonctionnant sur une source d'énergie limitée - sa batterie - il sera judicieux de choisir un casque d'impédance modérée. On recommande en général un maximum de 64 Ohms pour les appareils mobiles. Au delà de ce chiffre, la bande passante sera rognée aux extrémités, la puissance disponible sera réduite, votre batterie fera grise mine et verra fondre son autonomie. Le son paraîtra étrié, comme affaibli (on parle alors d'atténuation), le casque « tirant trop » sur la sortie du lecteur. En revanche, pour une écoute sur une chaîne connectée au secteur, une impédance élevée entraîne un recul du bruit de fond et une bande passante plus large.

Attention cependant, il n'y a pas réellement de lien entre la qualité d'un casque et son impédance. Il est vrai que les casques haut de gamme ont souvent une impédance élevée à très élevée (600 Ohms pour certains modèles de studio), mais c'est dû au fait qu'ils sont destinés soit à l'utilisation sur l'entrée casque d'une chaîne, d'une source ou d'un amplificateur (pas de problème de puissance disponible donc), soit à être connectés à un amplificateur pour casque audio. Si vous détenez un bon casque pour écoute domestique, vous pouvez faire l'expérience, avec un adaptateur jack 3,5mm/6,35mm si nécessaire, branchez le sur votre lecteur mp3, vous constaterez que le son détaillé, puissant et riche de votre écoute habituelle se transforme en son rogné aux extrémités, affaibli et plus « touffu ».

Un autre paramètre à prendre en compte est la puissance de sortie de la sortie casque de votre lecteur. Exprimée en milliwatt (mW), elle donne la puissance maximale sans atténuation d'une sortie casque. On donne ci-dessous un excellent tableau de correspondance entre puissance de sortie et impédance maximum recommandée, emprunté à un forum de vulgarisation :

- de 90 à 100 mW : 120 ohms
- de 60 à 80 mW : 80 ohms
- de 40 à 60 mW : 65 ohms
- de 20 à 30 mW : 32 ohms ; 60 ohms avec une légère atténuation
- de 10 à 15 mW : 16 ohms ; 24 ohms avec une légère atténuation

Pour conclure, l'immense majorité des casques grand public du marché sont prévus pour fonctionner avec la plupart des appareils nomades, sans problème de compatibilité. Inutile donc de s'inquiéter, en dehors de certains casques « exotiques » ou appareils nomades à la sortie casque peu puissante, le plus important reste de faire confiance à ses oreilles.