

Pour bien commencer l'électronique: écoutez la radio!

Michel Osée, Cédric Boey, Emmanuel Bairy, Frédéric Robert, Pierre Mathys
{mosee, cboey, emmbairy, firrobert, pmathys}@ulb.ac.be
Université Libre de Bruxelles
Laboratoire BEAMS (Bio, Electro and Mechanical Systems), CP165/56
Avenue F.D. Roosevelt 50, B1050 Bruxelles (Belgique)

RESUME : Nous présentons dans cet article la manière dont nous avons (re)structuré un enseignement d'introduction à l'électronique (cours et laboratoires, destinés à un public d'ingénieurs polytechniciens) autour d'une application particulière: un amplificateur audio s'intégrant dans une radio AM. Alors que beaucoup d'enseignants estiment que se frotter à une telle application nécessite de nombreux apprentissages préalables (les inévitables "prérequis"), nous avons au contraire choisi de l'aborder de front dès les premiers laboratoires avec un public non spécialisé. Cet article explique le dispositif pédagogique élaboré dans cette optique (et maintenant opérationnel depuis plusieurs années), ainsi que les raisons pédagogiques qui nous ont poussées dans cette voie. En termes pédagogiques encore on trouvera ici un cas très concret d'implémentation, dans le cadre d'une matière bien précise, d'un dispositif inspiré de "l'approche par problème".

Mots clés : électronique analogique, amplification, audio, approche par problème.

1 INTRODUCTION

1.1 Problème initial

Comment structurer un enseignement d'électronique (et en particulier ici d'électronique analogique)? Quelles notions faut-il mettre au début (ou à la fin) du cours?

Plus généralement: comment structurer un cours ou un enseignement de sciences exactes pour qu'il soit efficace, techniquement et pédagogiquement parlant?

Ces questions, tout enseignant du domaine se les pose, d'autant plus qu'émergent aujourd'hui dans l'enseignement supérieur des approches pédagogiques innovantes, notamment basées sur la mise en activité des étudiants (approche socio-constructiviste) [1].

Dans ce contexte, nous nous proposons simplement de rendre compte d'une expérience concrète de restructuration d'un cours d'électronique mise en pratique avec satisfaction depuis plusieurs années à l'Université Libre de Bruxelles. L'enseignement mis en place se caractérise notamment, dès le début du cours, par la mise au défi d'étudiants n'ayant jamais abordé l'électronique de concevoir et réaliser un amplificateur audio à insérer entre d'une part un récepteur audio AM (modulation d'amplitude) fournissant un signal de faible amplitude et d'autre part un haut-parleur. L'objectif demandé aux étudiants est d'être capable, au terme de huit heures de laboratoire réparties sur deux demi-journées, d'écouter le principal programme radio national au moyen de leur montage. C'est la mise en place de ce défi comme élément emblématique d'un dispositif d'enseignement d'électronique que nous relatons dans cet article.

1.2 Plan de l'article

Nous commencerons par décrire le contexte de l'enseignement évoqué, en parallèle avec l'énoncé proposé aux étudiants et la solution envisagée (Section 2).

Nous poursuivrons ensuite (Section 3) par une analyse pédagogique de la restructuration proposée, incluant notamment les objectifs poursuivis, qui nous permettra de dégager quelques principes pédagogiques fondamentaux (transposables selon nous à d'autres cours).

Nous exposerons ensuite (Sections 4 et 5), pour les lecteurs plus spécialistes, des détails disciplinaires additionnels du dispositif mis en place.

Enfin nous tenterons de conclure sur les leçons tirées de cette expérience concrète (Section 5).

2 CONTEXTE ET ÉNONCÉ

2.1 Contexte pédagogique

L'enseignement évoqué dans cet article intervient dans la troisième année (sur un total de cinq) du cursus d'ingénieur civil de l'Université Libre de Bruxelles (Ecole Polytechnique). Il comporte 12 modules de 2h de cours face aux étudiants se déroulant, pour la seconde moitié de ce cours, en parallèle avec 6 laboratoires de 4h chacun (réalisés par groupes de 3 étudiants).

Les étudiants polytechniciens concernés par le cours, au nombre de 150 en moyenne annuelle, ont suivi dans les deux années précédentes un cursus totalement commun comprenant notamment des cours de physique et d'électricité (mais pas d'électronique), ainsi que des modules d'enseignement par projets (réalisation en groupe d'une lunette astronomique, d'un éthylomètre, etc). Ils s'orientent néanmoins à ce stade vers des filières spécialisées (chimie, ingénierie biomédicale, constructions civiles, physique, électromécanique ou technologies de l'information), ce qui se traduit par un intérêt très variable pour l'électronique.

S'adjoignent encore à ce public deux autres sections plus petites et ayant suivi des cursus sensiblement dif-

férents: des bioingénieurs d'une part et des informaticiens d'autre part.

Il en résulte un public relativement important (200 étudiants) et présentant une hétérogénéité certaine autant en termes de motivation que de préacquis (c'est-à-dire de notions effectivement maîtrisées par les étudiants, par opposition au prérequis qui sont les notions souhaitées en préalable à un enseignement).

Pour certaines des filières citées, ce cours constitue le premier mais également le seul cours d'électronique de leur cursus. Pour d'autres sections, ce cours n'apparaît que comme le premier d'une série de cours liés à cette matière.

2.2 Un dispositif hybride

Comme on l'aura déjà lu ci-dessus, le dispositif proposé n'est aucunement novateur dans sa structure horaire puisqu'il se compose d'un cours face aux étudiants suivi de laboratoires. Il présente néanmoins certaines caractéristiques d'une approche par problème, en particulier la confrontation des étudiants, dès le début du cours, avec un problème réel pouvant être considéré comme "complexe" (nous reviendrons sur cette notion de complexité au §3.1).

Il s'agit donc d'un dispositif hybride qui ne se réclame pas d'une école pédagogique particulière et peut notamment s'insérer facilement dans un cursus classique: c'est un de ses intérêts. Il n'en présente pas moins par rapport à un tel cursus des "ruptures" manifestes qui sont discutées plus avant ci-dessous.

Rien n'exclut de le modifier dans un sens ou dans un autre. On se reportera notamment, pour une analyse des différents cadres théoriques possibles, à [1].

2.3 Enoncé du problème

Le problème (qui ne couvre pas tout le cours mais est emblématique de la partie analogique de celui-ci) est posé aux étudiants de la manière suivante:

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.

On dispose des informations suivantes :

- *Le récepteur AM fournit un signal d'amplitude supérieure à $5mV$ crête, avec une impédance de sortie d'environ $100k\Omega$.*
- *Le haut-parleur se comporte comme une résistance de 16Ω dans la plage des fréquences audio. Sa puissance est limitée à $500mW$.*
- *La plage des fréquences audio s'étend de $20Hz$ à $20kHz$.*
- *Le volume sonore doit être réglable.*

Le texte en italique reproduit ci-dessus constitue en fait les premières lignes figurant effectivement sur l'énoncé du troisième laboratoire proposé aux étudiants. Celui-ci est précédé d'un premier laboratoire permettant de se familiariser avec les instruments de mesure et la

problématique du filtrage, ainsi que d'un second laboratoire consistant en exercices de dimensionnement préparant à la conception de l'amplificateur audio (et inclus dans les huit heures évoquées au §1.1).

Dès le premier cours oral, il est néanmoins annoncé aux étudiants qu'il concevront et réaliseront eux-mêmes un amplificateur au moyen duquel ils écouteront la radio.

2.4 Solution proposée

Plusieurs solutions sont évidemment possibles pour répondre au problème précédeant. La solution vers laquelle les étudiants sont guidés est celle reproduite à la figure 3.

Pour maîtriser la durée de la manipulation et centrer les étudiants sur les objectifs pédagogiques visés, un certain nombre de contraintes sont en effet imposées. C'est notamment le cas du type d'amplificateur opérationnel à utiliser: le LM4864 pour l'étage de sortie et le CA3140A pour les autres étages.

La figure 3 montre le résultat attendu (voir aussi figure 2). Celui-ci découle des contraintes proposées (voir §2.3):

- le gain total du montage doit être de 800;
- avec les CA3140A, la bande passante demandée nous oblige à utiliser au moins 2 étages amplificateurs;
- l'impédance de source nous force à choisir un étage d'entrée non-inverseur;
- pour pouvoir annuler complètement le volume sonore, on choisit un 2^{ème} étage inverseur, avec un gain variable au moyen d'un potentiomètre.

Le schéma auquel nous aboutissons est relativement complexe. Voyons maintenant l'analyse pédagogique qui nous a mené à proposer d'emblée ce problème à des non-spécialistes.

3 ANALYSE PÉDAGOGIQUE

Nous regroupons dans ce paragraphe un ensemble d'éléments qui nous ont amenés au dispositif expliqué. Nombre de ces éléments, nous semble-t-il, sont transposables à d'autres situations de cours et d'autres matières.

3.1 Organisation de la matière

Revenons à la question posée en introduction: comment structurer un cours d'électronique?

Compte tenu de l'hétérogénéité du public visé et du fait que le cours évoqué sera le seul dans cette matière pour une fraction de ce public (voir §2.1), il découle immédiatement qu'il convient de se concentrer sur les notions jugées "les plus indispensables" en électronique. Mais quelles sont-elles?

En nous centrant sur les composants et en nous limitant au domaine de l'électronique analogique, on constate que la majorité des cours sont conçus sur base d'un cheminement démarrant par des notions de physique

des semi-conducteurs. En s'appuyant sur celles-ci, on y développe la structure de la diode et on en dérive les propriétés, puis on passe aux transistors et enfin aux amplis opérationnels. Cette approche se caractérise par le fait d'appréhender le comportement d'un composant ou d'un montage via l'analyse préalable de sa *structure*. On trouvera un exemple typique de cette approche dans [2]. Il s'agit d'une approche qu'on peut qualifier d'*associationniste* ou encore de *behavioriste* [1]. Nous suivrons [1] pour considérer que cette approche nous semble souffrir de nombreux inconvénients et en particulier:

- l'écart temporel entre l'enseignement des premières notions et leur application (donc la perception de leur utilité) est très important, de sorte qu'il en résulte un manque de sens pour l'étudiant. Ce manque de sens engendre une perte de motivation susceptible de dégrader la qualité de l'apprentissage [3].
- sous prétexte de la nécessité de présenter d'abord les "fondements indispensables" (la théorie des semi-conducteurs par exemple), des notions plus directement utilisables et plus souvent utilisées sont reportées à la fin du cours, ce qui implique une moindre maîtrise (voire une absence totale de maîtrise) de celles-ci par les étudiants.

A l'inverse, il nous semble possible de démarrer par des notions plus utiles malgré la difficulté *apparente* qu'elles présentent.

Dans notre cas, ceci consiste par exemple à considérer l'ampli opérationnel comme le premier composant analogique à enseigner (car il sera en effet rencontré bien plus couramment qu'un transistor discret). La *structure* d'un ampli opérationnel est en effet plus complexe que celle d'une diode ou d'un transistor (ce qui explique qu'il soit enseigné après ceux-ci dans une approche associationniste). Si l'on se base par contre sur le *comportement* du composant (en centrant notamment le cours sur ses caractéristiques, au sens électrique du terme), ce composant apparaît fort simple et les étudiants n'ont d'après notre expérience aucun mal à l'appréhender.

Or le comportement peut directement être lié à l'usage du composant: il est donc bien plus porteur de sens que la structure. Celle-ci peut être enseignée dans un second temps, pour un public plus spécialisé qui en saisit alors, lui aussi, l'intérêt (en l'associant alors par exemple à une analyse plus fine du comportement, incluant typiquement diverses imperfections).

Croire qu'il faut exposer la *structure* avant le *comportement* nous paraît en fait un leurre, en particulier sur base des deux arguments suivants:

- toute structure suppose de toute façon l'utilisation de "primitives" (c'est-à-dire d'éléments de base) dont il faut accepter le comportement sans justification. (La physique des semi-

conducteurs se base par exemple sur les électrons, les trous et le réseau atomique du semi-conducteur, qui pour être expliquées appellent des notions de physique quantique ne faisant initialement qu'éloigner l'étudiant d'une compréhension du composant). Quitte à admettre l'existence de primitives (dont par définition on ignore au départ la structure), pourquoi ne pas commencer cette démarche au niveau du composant lui-même? Ceci n'exclut en rien une compréhension plus approfondie plus tard et permet même de montrer que plusieurs niveaux d'analyse sont possibles.

- croire qu'on va du simple au compliqué parce qu'on s'intéresse d'abord à des éléments de structure fondamentaux (combien de cours d'électronique ou de physique ne commencent pas par la notion de charge électrique?) nous semble une erreur de raisonnement: dans une telle démarche, on débute en fait par des éléments *isolés* (mais pas *simples*) d'une structure *complexe*. Etant isolés et éloignés de la pratique, de tels éléments nous semblent au sens propre "incompréhensibles": ils ne peuvent être reliés à l'expérience concrète. A nouveau, commencer par un comportement simple mais directement appréhendable est bien plus porteur de sens et n'interdit aucun approfondissement ensuite.

C'est en tous cas ce que nous confirme notre expérience de plusieurs années, le cours que nous avons bâti sur ce principe étant particulièrement apprécié des étudiants (sans que les résultats soient moins bons que par une méthode d'inspiration behavioriste).

Commencer un cours par l'ampli opérationnel et par un problème du type de celui montré dans la figure 3 nous semble donc bien être l'approche la plus *simple* et la plus motivante pour les étudiants. La référence [4] est un bon exemple d'une approche du même type, qu'on peut qualifier de *systemique* [1].

3.2 Influence sur la motivation

D'après Rieunier notamment, la motivation est un des facteurs clés de l'efficacité de l'apprentissage. Contrairement à ce que beaucoup d'enseignants pensent, elle peut être provoquée dans une certaine mesure [3].

Nous avons déjà évoqué ci-dessus l'influence de l'organisation de la matière sur la motivation. C'est la raison pour laquelle nous indiquons, dès le premier cours, que les étudiants auront à concevoir et fabriquer de leurs propres mains un amplificateur audio pour écouter la radio. Vu leurs faibles connaissances en électronique, cet énoncé leur semble une réelle mise au défi, élément qu'on retrouve typiquement dans les dispositifs d'apprentissage par problème. Ce type de mise au défi nous semble un élément très efficace et facile à intégrer dans un cours.

Ajoutons le fait que l'étudiant, sans connaître la matière, doit pouvoir comprendre la problématique, d'où la nécessité de situer celle-ci dans un lien avec un thème qui lui est familier. C'est la raison pour laquelle le domaine de l'audio a été choisi comme fil rouge du cours (on y parle notamment également de table de mixage analogique ou numérique), celui-ci pouvant être directement appréhendé par les étudiants en termes d'application vu les centres d'intérêt de la tranche d'âge concernée.

Comme autre exemple de cette proximité des problématiques avec celles maîtrisées par les étudiants, nous renverrons à [5] qui explique comment, dans le même cours et en utilisant la notion de transfert pédagogique, la problématique de la résolution d'un circuit à diodes est expliquée aux étudiants via un "conte" impliquant un problème de logique élémentaire (que tout étudiant est donc à même de saisir indépendamment de ses connaissances en électronique).

3.3 Objectifs pédagogiques

Les objectifs pédagogiques poursuivis lors de la conception et le réalisation de l'amplificateur audio sont de plusieurs ordres.

En premier lieu, un certain nombre de notions très habituelles sont abordées comme:

- l'étage amplificateur inverseur/non-inverseur ainsi que le sommateur,
- l'adaptation d'impédance,
- le produit "gain.bande passante" d'un ampli opérationnel,
- le filtrage.

L'ampli audio permet également d'aborder en même temps des problématiques plus concrètes comme:

- le câblage et le dépannage d'un montage,
- l'alimentation des circuits,
- l'intégration (au sens microélectronique) d'un montage (voir étage de sortie du §4),
- le fait qu'un montage peut être vu et construit comme un ensemble de montage plus simples à interconnecter.

Enfin il poursuit de manière tout-à-fait consciente l'objectif de faire admettre aux étudiants (dont les motivations sont diverses, rappelons-le) que l'électronique est une discipline qui peut être utile, passionnante et ludique. D'après les commentaires qui font suite au laboratoire évoqué et au cours en général, cet objectif semble atteint dans les faits chez de nombreux étudiants.

Outre les objectifs pédagogiques fondamentaux cités ci-dessus, la réalisation d'un amplificateur audio "réel" en laboratoire nous a amené à aborder deux notions supplémentaires que nous détaillons ci-dessous: l'étage de sortie et l'ajout d'un égaliseur.

4 ETAGE DE SORTIE

4.1 Introduction

Les étages principaux de l'ampli audio sont réalisés au moyen d'ampli op CA3140A. La puissance consommée par le haut-parleur nous oblige à utiliser un troisième étage, de puissance, qui sera le LM4864 (voir figure 3). Le LM4864 constitue une nouveauté par rapport aux notions précédemment vues, puisque les amplificateurs opérationnels intégrés à ce circuit sont alimentés de manière non symétrique et que leur entrée non-inverseuse est polarisée.

L'étude de ce circuit permet aux étudiants d'appliquer leurs connaissances théoriques à un montage qu'il n'ont jamais vu, ni dans le cours théorique, ni dans les exercices.

4.2 Description du LM4864

La figure 1 montre le schéma de principe de l'étage de sortie :

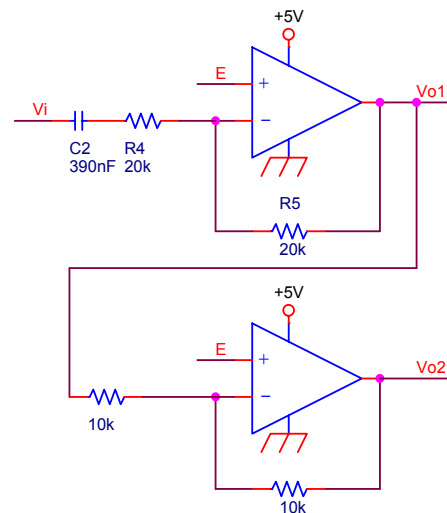


Figure 1 : L'étage de sortie

L'étude de ce montage permet aux étudiants d'utiliser le principe de superposition qu'ils ont vu de manière théorique dans le cours.

Nous leur demandons d'abord de comprendre le fonctionnement du circuit de manière intuitive, en considérant la capacité C2 comme un court-circuit pour le signal d'entrée V_i (supposé sinusoïdal de fréquence suffisamment élevée) et comme un circuit ouvert pour la tension de polarisation E (supposée continue).

Dans un deuxième temps, nous leur demandons d'étudier la fonction de transfert du montage pour qu'ils puissent :

- identifier que ce montage est un filtre passe-haut,
- calculer sa fréquence de coupure et vérifier qu'elle est compatible avec le cahier des charges,
- faire le lien avec le résultat de leur raisonnement intuitif et le comportement asymptotique

en hautes fréquences de la fonction de transfert du montage.

5 AJOUT D'UN ÉQUALISEUR

En ajoutant un égaliseur simple à notre amplificateur audio, nous pouvons également illustrer l'utilité des filtres.

Dans la notice du CA3140A, on trouve, comme exemple d'application un filtre de type Baxandall. Néanmoins, nous avons décidé que ce montage était trop complexe pour être utilisé dans le cadre de ce projet. En effet, l'étude complète de la fonction de transfert de ce filtre est un exercice long et essentiellement mathématique, qui n'apporterait rien aux étudiants au point de vue de la compréhension du fonctionnement d'un égaliseur.

Nous avons donc décidé de réaliser notre égaliseur au moyen de deux filtres, un passe-bas et un passe-haut, dont la fréquence de coupure vaut 600Hz. Nous utilisons des filtres passifs, que nous faisons suivre chacun d'un amplificateur inverseur dont le gain est réglable de 0 à -1.

Cette structure présente l'avantage didactique de séparer les fonctions en bloc distincts. De plus, elle présente un problème d'adaptation d'impédance entre les filtres et leur amplificateur, auquel les étudiants doivent faire face dans leur dimensionnement.

La structure finale de l'amplificateur audio est donnée à la figure 2 :

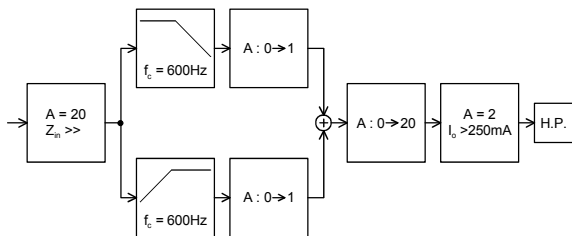


Figure 2 : Structure de l'amplificateur audio

Les étudiants doivent également justifier le choix de la position de l'égaliseur dans la chaîne d'amplification et transformer le deuxième étage amplificateur en sommateur.

Le choix de la fréquence de coupure des filtres nous donne l'occasion d'expliquer aux étudiants que l'oreille humaine a une sensibilité logarithmique à l'amplitude et à la fréquence des sons; ce qui nous permet de justifier, d'une manière satisfaisante pour les étudiants, l'habitude que les électroniciens ont d'utiliser une représentation bilogarithmique des fonctions de transfert.

6 CONCLUSION

Confronté au problème d'enseigner les principes fondamentaux de l'électronique à un public d'étudiants d'orientations diverses, nous avons choisi d'utiliser des exemples d'applications de la vie courante, pour susciter l'intérêt des étudiants.

Dans cette optique, nous illustrons les principes théoriques liés à l'utilisation des amplificateurs opérationnels en demandant aux étudiants de réaliser en peu de temps un amplificateur audio.

Alors que ce problème peut paraître complexe pour des étudiants abordant pour la première fois un cours d'électronique, nous avons justifié en quoi une telle approche peut précisément être plus simple, plus pertinente et plus motivante qu'une approche associationniste classique débutant par la théorie des semi-conducteurs. Inspirée de l'approche par problème, elle peut par ailleurs s'insérer dans un dispositif de cours classique sans difficulté.

Au final, les étudiants se révèlent particulièrement motivés par le fait que le projet leur permet de réaliser concrètement un montage électronique réaliste, ce qui rejaillit sur leur motivation à s'intéresser dans la durée à la discipline enseignée.

7 RÉFÉRENCES

- [1] Tardif, Jacques; Désilets, Mario; Paradis, Fernand, Lachiver Gérard. "Le développement des compétences: cadre conceptuel pour l'enseignement" in: Goulet, J. P. *Enseigner au collégial*. AGPC; 1995; pp. 157-168.
- [2] Floyd, Thomas L. "Electronique: composants et systèmes d'application. 5e édition ed". Repentigny: Editions Reynald Goulet; 2000.
- [3] Rieunier, Alain. "Préparer un cours – Tome 1: Applications pratiques". Paris: ESF Editeur; 2000.
- [4] Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith, "Microelectronic circuits (5e edition)", Oxford University Press, 2004
- [5] F. Robert, C. Boey, "Diodes, princesses et tigres: une étude de cas montrant comment modifier ses pratiques pédagogiques à la lueur d'outils théoriques", 8e Biennale Internationale de l'Education et de la Formation, Lyon, 11-14 avril 2006

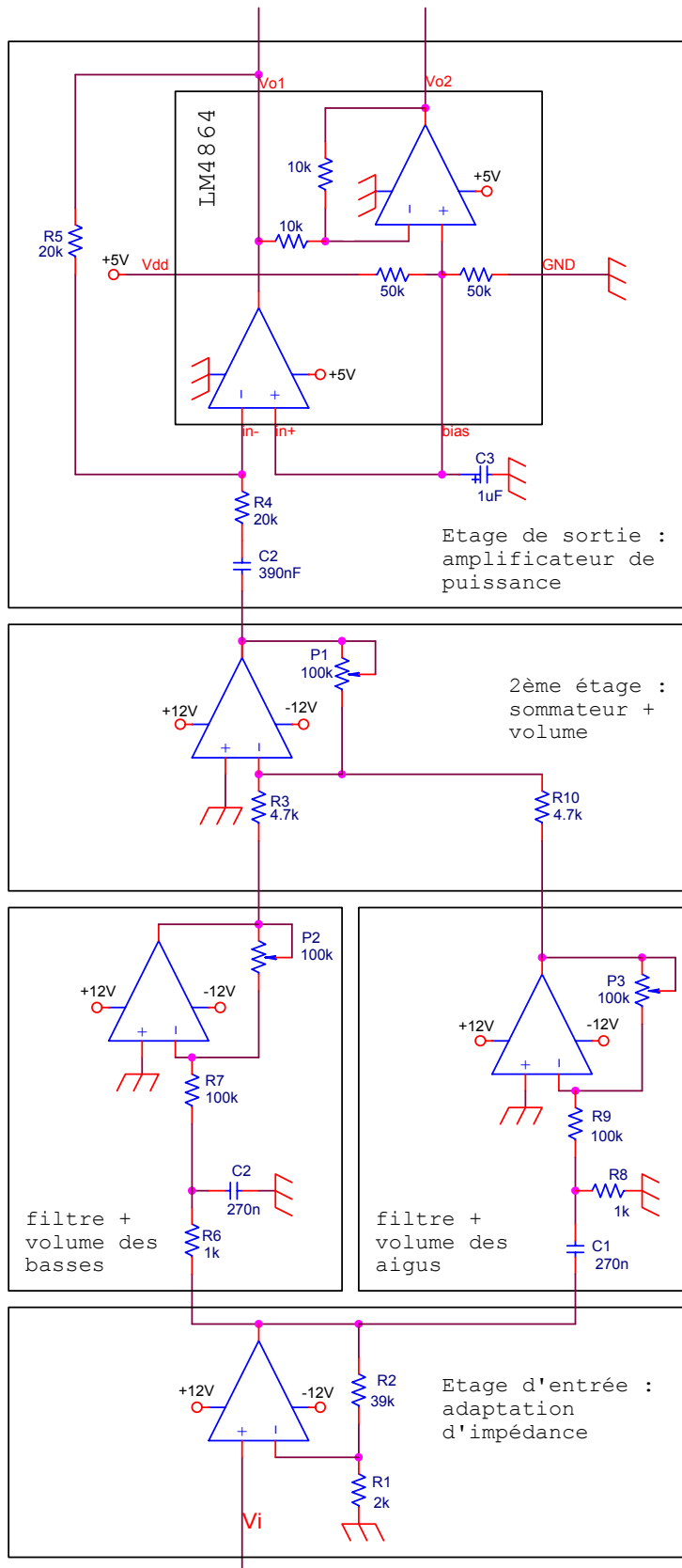


Figure 3 : schéma complet de l'amplificateur