

Raphaël Martin  
IMA4

**Rapport de projet IMA4  
Projet P72 – Mesure d'un courant simple**

Encadrants : Alexandre Boé, Xavier Redon et Thomas Vantroys

## **Remerciements**

Je tiens à remercier mes encadrants qui ont contribué à la réalisation de ce projet, tant pour les nombreux conseils qui m'ont été utiles notamment pour la partie électronique que pour le matériel fourni.

Je remercie également le service électronique pour avoir réalisé la fabrication des cartes électroniques nécessaire au projets.

## **Sommaire**

Introduction	3
État de l'art	4
Présentation du projet	6
Partie théorique	8
Réalisation technique	12
Bilan sur la réalisation	15
Conclusion	16
Annexes	17

# Introduction

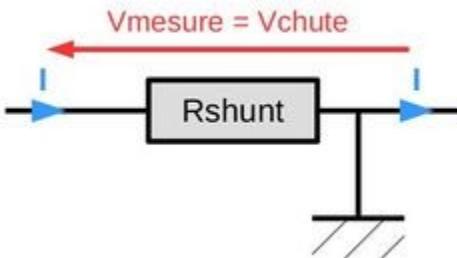
La mesure de courant est nécessaire pour déterminer la consommation d'un appareil. De nombreux fabricants proposent du matériel dédié, très fiable, coûteux et souvent limité à un seul domaine de mesure ce qui restreint les possibilités.

En effet, l'idée principale de ce projet est de créer un ampèremètre capable d'avoir une grande plage de mesure afin de mesurer à terme la consommation d'objets connectés. Ces objets ont la particularité d'utiliser des courants d'amplitude très variés : calcul par le biais d'un processeur, transmission de données, alimentation de capteurs ou encore le mode veille. Les consommations liées à ces différents modes de fonctionnement ne peuvent pas toutes être déduites par le matériel déjà embarqué dans l'objet. Par exemple la communication dépend beaucoup de l'environnement et l'appareil ne peut pas déduire de lui-même la consommation résultante sans ampèremètre.

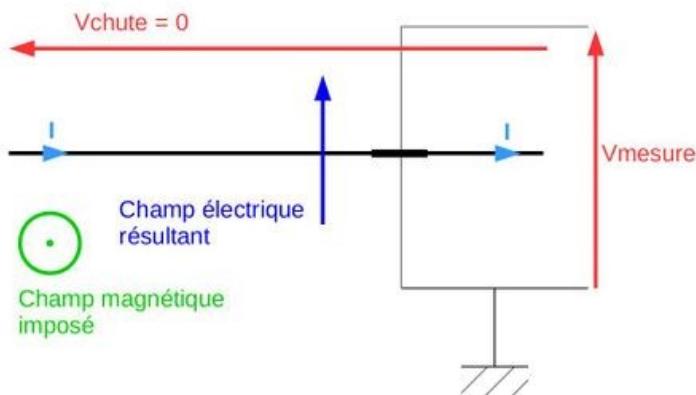
Ces caractéristiques n'étant pas assurées par le matériel déjà présent sur le marché et pour un faible coût, je me suis proposé pour réaliser ce projet ayant pour but d'assurer une mesure de courant à la fois précise et d'une grande dynamique.

## État de l'art

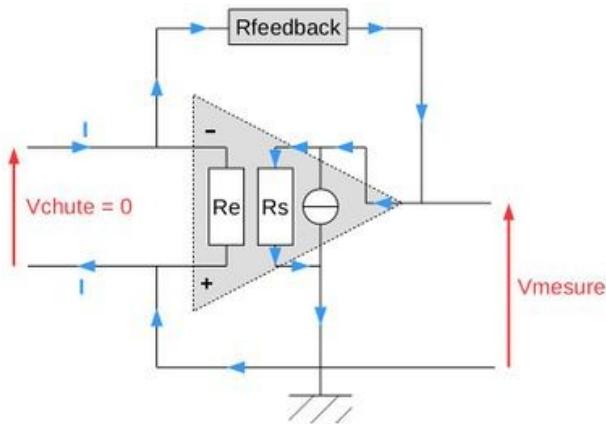
Le principe de l'appareil voulu en fin de projet est assez simple, il faut combiner plusieurs méthodes de mesure pour pouvoir mesurer petits et forts courants sans trop de compromis sur la précision. On retrouve plusieurs technologies :



La mesure par résistance de shunt est simple, largement utilisée mais trop imprécise pour de petits courants ( $<2mA$ ).

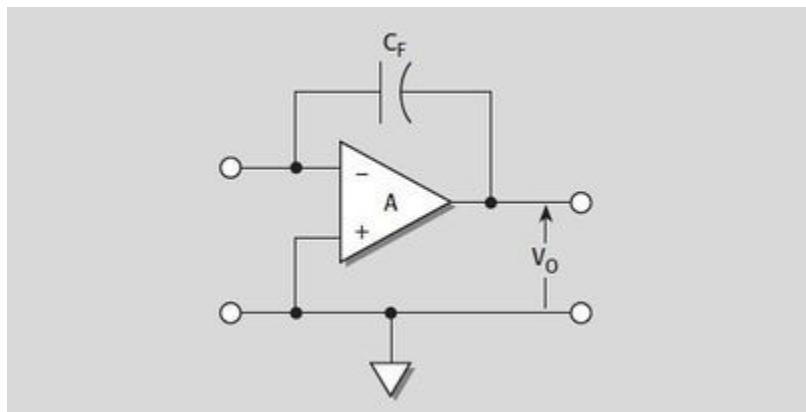
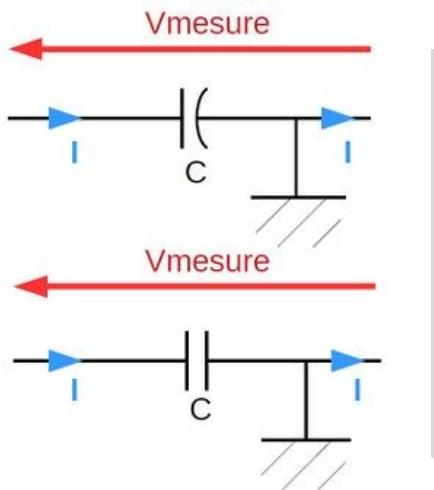


La mesure par effet Hall permet de mesurer de gros courants sans problème, mais est trop sensible à l'environnement pour être utilisée ici.



La mesure par résistance de feedback utilise un amplificateur opérationnel pour annuler la chute de tension même pour de grosse valeurs de résistance. Très précise pour de faible courant ( $<2mA$ ), mais limité par les caractéristiques de l'amplificateur pour de forts courants.

Une quatrième méthode de mesure, visiblement non appliquée en pratique pourrait être utilisée pour déterminer un courant. Il s'agit d'utiliser un condensateur et d'observer sa charge pour en déduire le courant passant.



Comme la tension aux bornes est proportionnelle à la charge, cette observation est facile à réaliser. Le montage de droite est un coulombmètre, donnant l'image de la charge ayant transité depuis la dernière décharge du condensateur par la tension  $V_o$ .

Pour mon prototype, je n'ai retenu dans un premier temps que deux méthodes de mesure : par shunt et par feedback. Ces deux méthodes sont complémentaires pour obtenir la dynamique de mesure voulue. Au dessus de 2mA j'utiliserais une mesure par shunt et en dessous, une mesure par feedback.

# Présentation du projet

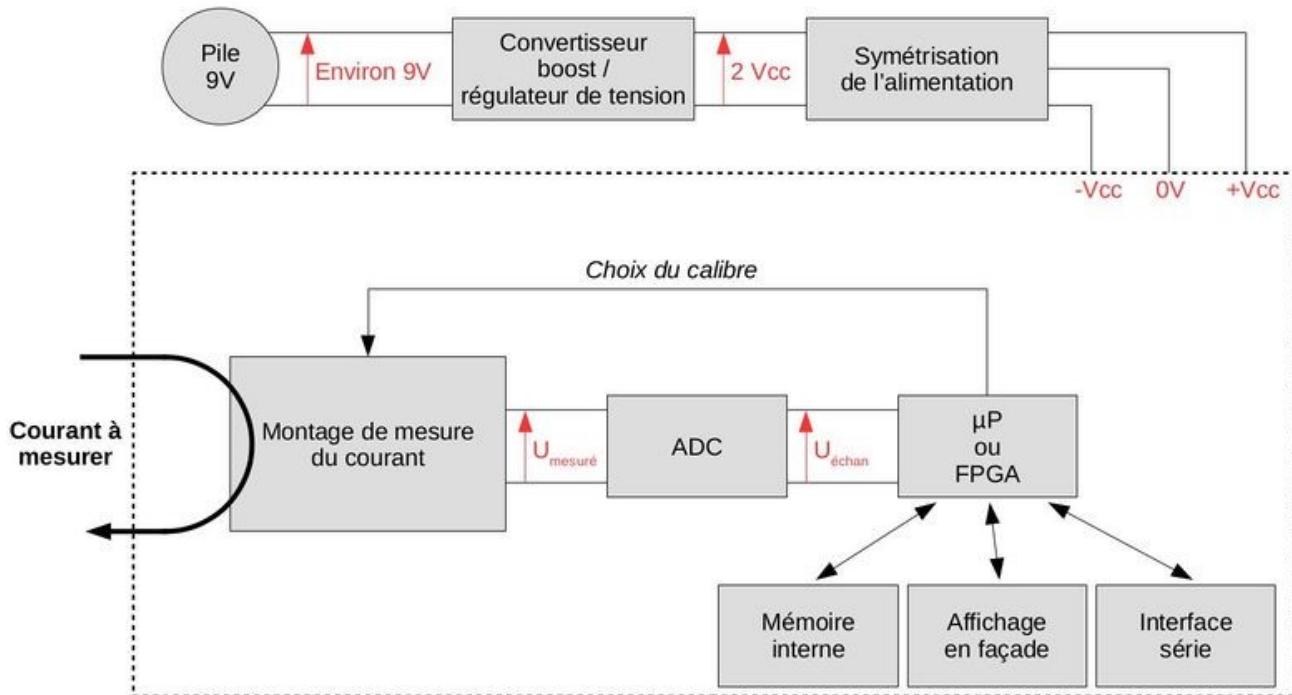
L'idée au départ du projet était de simuler un objet connecté avec un Arduino Uno en lui donnant diverses instructions nécessitant une consommation variée. Cette consommation serait mesurée par l'ampèremètre, construit autour d'une autre carte Arduino.

Le cahier des charges établi a permis de préciser les attentes du projet :

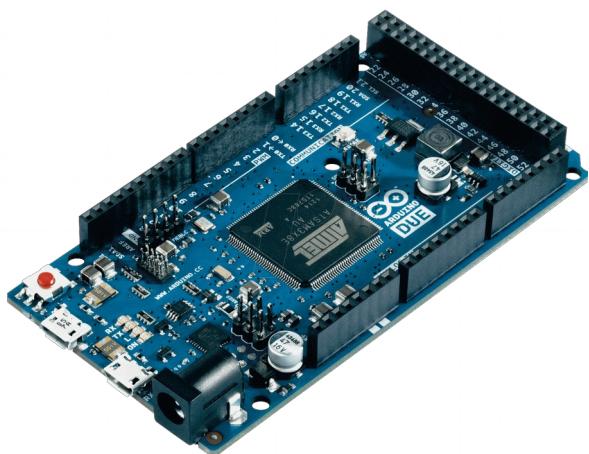
- Mesure jusqu'à 1A pour les "forts" courants afin de pouvoir mesurer la consommation de certains éléments gourmands autour du processeur
- Mesure d'une résolution minimale de  $0,1\mu\text{A}$  pour les "faibles" courants, ce qui correspond à peu près au mode veille de l'ATmega 328p
- Incertitude sur la mesure  $<0,5\%$  (3 chiffres significatifs)
- Minimiser les pertes de courant dues à la mesure ( $<5\%$ ) pour ne pas trop perturber le résultat
- Avoir une bande passante initialement au moins supérieure à 2,8kHz, ce qui correspond à plus du double de la vitesse maximale de changement d'état des différentes sorties de l'ATmega 328p, l'idéal étant de mesurer avec une rapidité d'environ une dizaine de fois au dessus de cette fréquence.
- La sélection du calibre de mesure doit être automatique
- Permettre l'enregistrement des mesures dans l'appareil ou à défaut utiliser une liaison série pour les transmettre à un ordinateur
- L'appareil de mesure devra être portable (autonome en alimentation d'énergie, léger et portable)

Afin de satisfaire ces critères, j'ai réalisé une étude poussée afin de déterminer un montage fonctionnel sur simulateur, pour enfin réaliser une carte électronique caractérisant les performances que l'on peut espérer avec un montage réel.

J'ai voulu séparer le projet en plusieurs blocs, étudié puis réalisé indépendamment. Ceci permet de faciliter les tests de chaque partie. J'ai créé le synoptique suivant afin de résumer l'architecture complète attendue :



Du point de vue matériel, je me suis orienté vers une carte Arduino Due pour ses 16 ADCs intégrés et son taux d'échantillonnage de 1MHz. Ce choix a pu m'éviter de prendre un ADC dédié pour le premier prototype. J'ai également choisi des amplificateurs OPAX277 pour leurs précision de mesure (faible bruit résiduel) et leurs bande passante de 1MHz également.



Carte Arduino Due



Amplificateur OPAX277

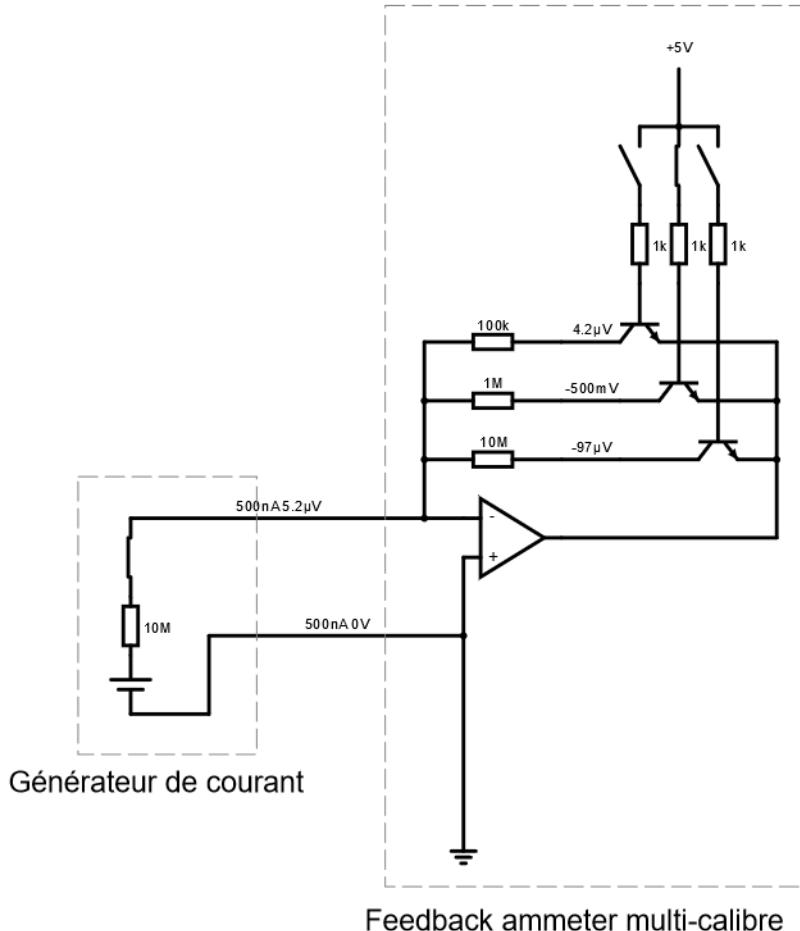
# Partie théorique

## Mesure par feedback :

En premier lieu, j'ai voulu mettre tous les montage de mesure en série. Ceci ne changeait pas les valeurs mesurées sur simulateur, mais en pratique ceci n'aurait pas pu être acceptable :

Chaque AOP doit délivrer un courant égal au courant mesuré, ce qui implique une forte consommation inutile de l'appareil de mesure puisque seul un calibre n'a besoin d'être utilisé à la fois. Pire, dans le cas de trop fort courant (mesurés normalement par shunt), les amplificateurs ne sont pas capable de délivrer suffisamment de courant ce qui abîmerais le matériel. En plus, ajouter des éléments au montage rajoute également des sources d'erreur de mesure.

Il a fallu donc concevoir un sélecteur de calibre notamment compatible avec la mesure par feedback. Voici la solution retenue à base de transistor npn :



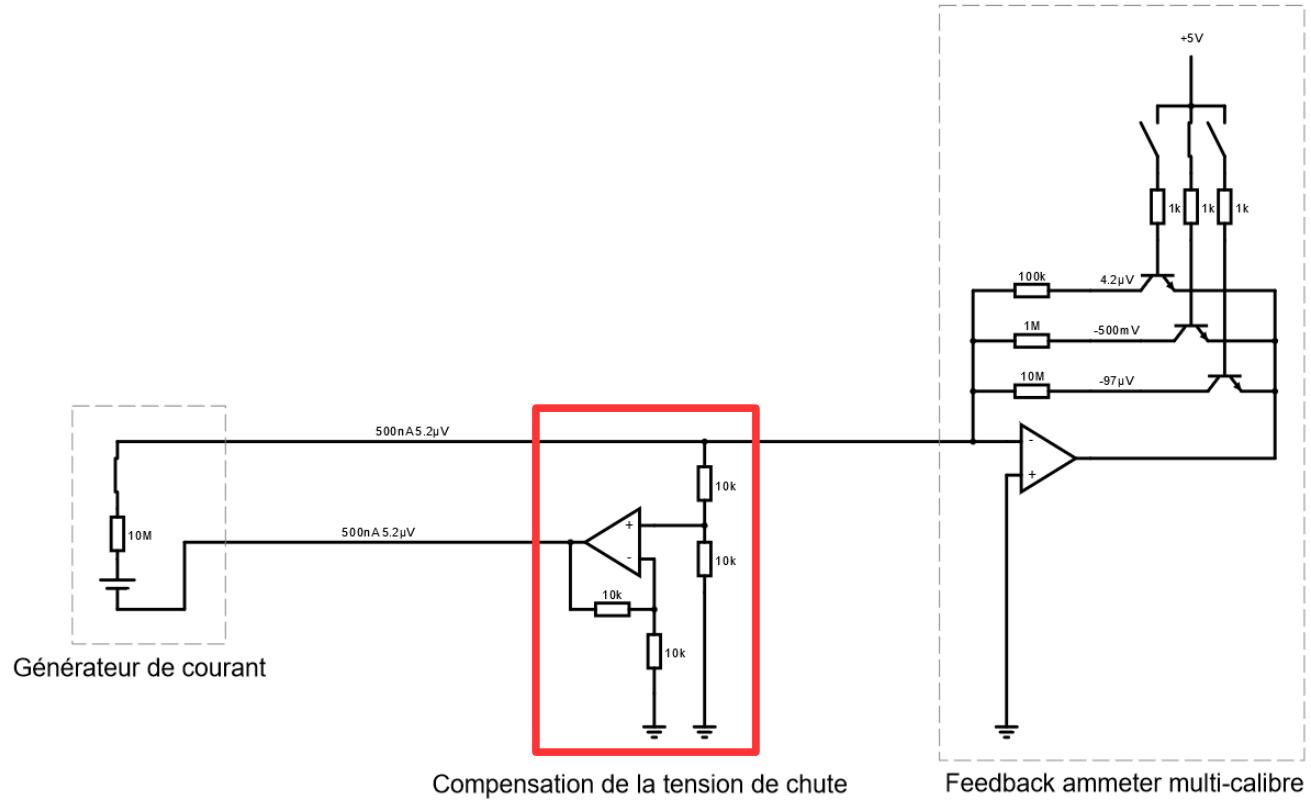
La disposition des transistors est très importante :

En effet pour de faibles courants, le courant de base n'est pas à négliger devant le courant de collecteur. Il faut donc faire attention à ce que le courant de base (fourni par l'appareil de mesure) ne circule pas dans l'appareil mesuré. J'ai réalisé de nombreux montage où le courant de base modifiait fortement le courant mesuré.

Cette remarque qui semble évidente m'a fait recommencer ce circuit de nombreuses fois jusqu'à ce que je comprenne pourquoi le courant circulant dans le générateur de courant pouvait être altéré par la mesure.

Comme on peut le voir sur le schéma précédent, il y a une différence de tension entre les deux bornes de l'AOP (ici de  $5.2\mu\text{V}$ ), c'est encore plus flagrant avec une mesure par shunt.

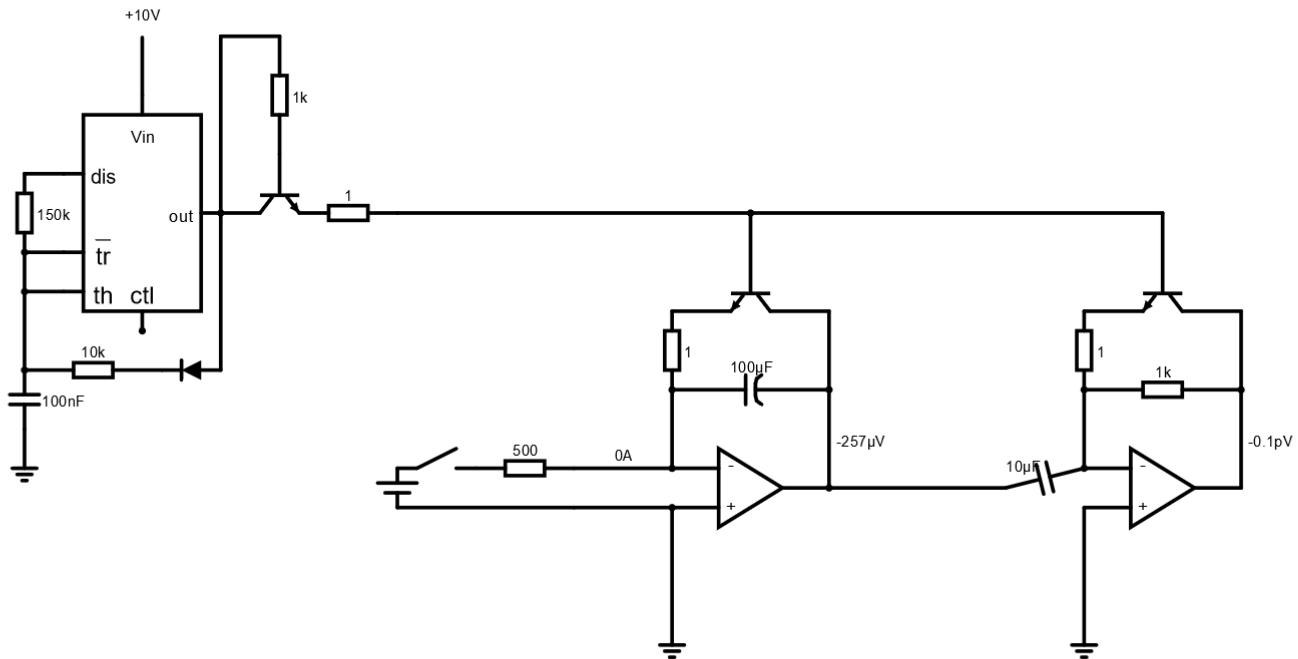
J'ai donc voulu tester un montage qui compenserait cette chute de tension, permettant donc entre autres d'utiliser une résistance de shunt importante sans trop altérer la mesure.



Le compensateur de chute de tension est à ajouter à l'entrée de l'appareil de mesure, il permet de rehausser le potentiel de sortie pour l'égaler à la tension d'entrée ce qui annule donc la chute de tension.

L'appareil mesuré n'ayant pas de masse commune avec l'ampèremètre car l'alimentation de ce dernier est flotante, ceci ne pose aucun problème.

## Mesure par charge/décharge de condensateur :

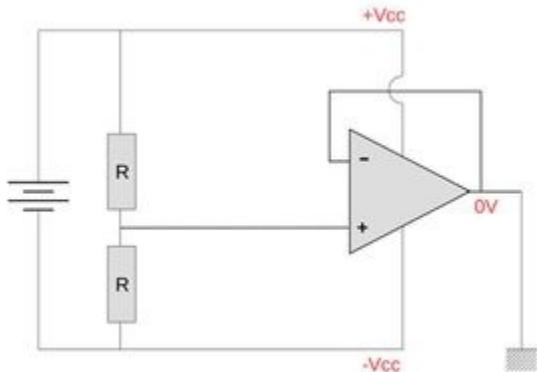


Ce montage est composé d'un coulombmètre, d'un déivateur et d'un générateur d'impulsion basé sur un timer 555. A terme, on peut utiliser directement une entrée de l'Arduino pour piloter la remise à zéro voir de l'adapter dynamiquement en fonction de ce qui est mesuré pour optimiser la fréquence de remise à zéro : durant la remise à zéro les valeurs mesurées sont erronées. Ce dernier point est très contraignant, mais je n'ai pas trouvé de solution, pour limiter le courant durant la décharge, il faut un temps de décharge conséquent durant lequel la mesure n'est plus possible (c'est pourquoi le second AOP est court-circuité pendant cette phase : la décharge engendre une variation de tension très forte donc un courant mesuré très fort même si cela est faux).

Il permet d'avoir en sortie une image en tension du courant instantané. Le générateur d'impulsion permet de commander la remise à zéro régulière du courantomètre afin de garantir que celui ci ne sature pas.

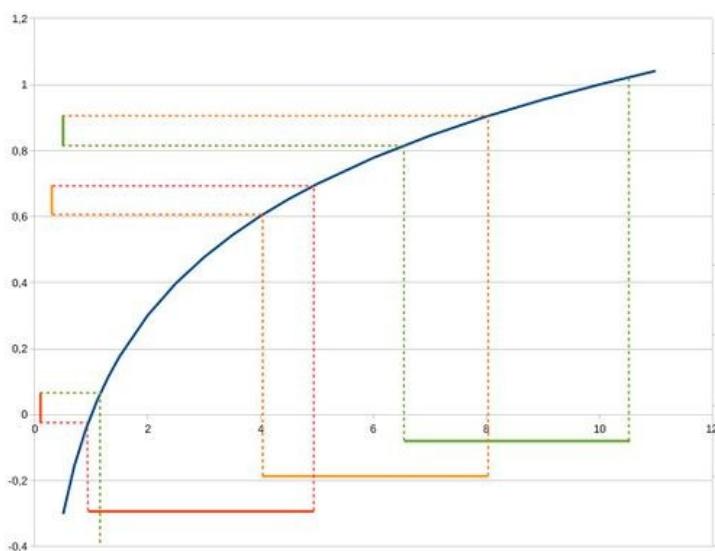
Ce montage utilisant des amplificateurs, il ne peut être réservé qu'au faible courant, toujours à cause de la limite de courant que ces derniers peuvent fournir.

## Symétrisation de l'alimentation :



J'utilise un amplificateur opérationnel monté en suiveur après un pont diviseur de tension afin de s'assurer de corriger le problème d'impédance dû aux résistances du pont diviseur.

## Choix du calibre :



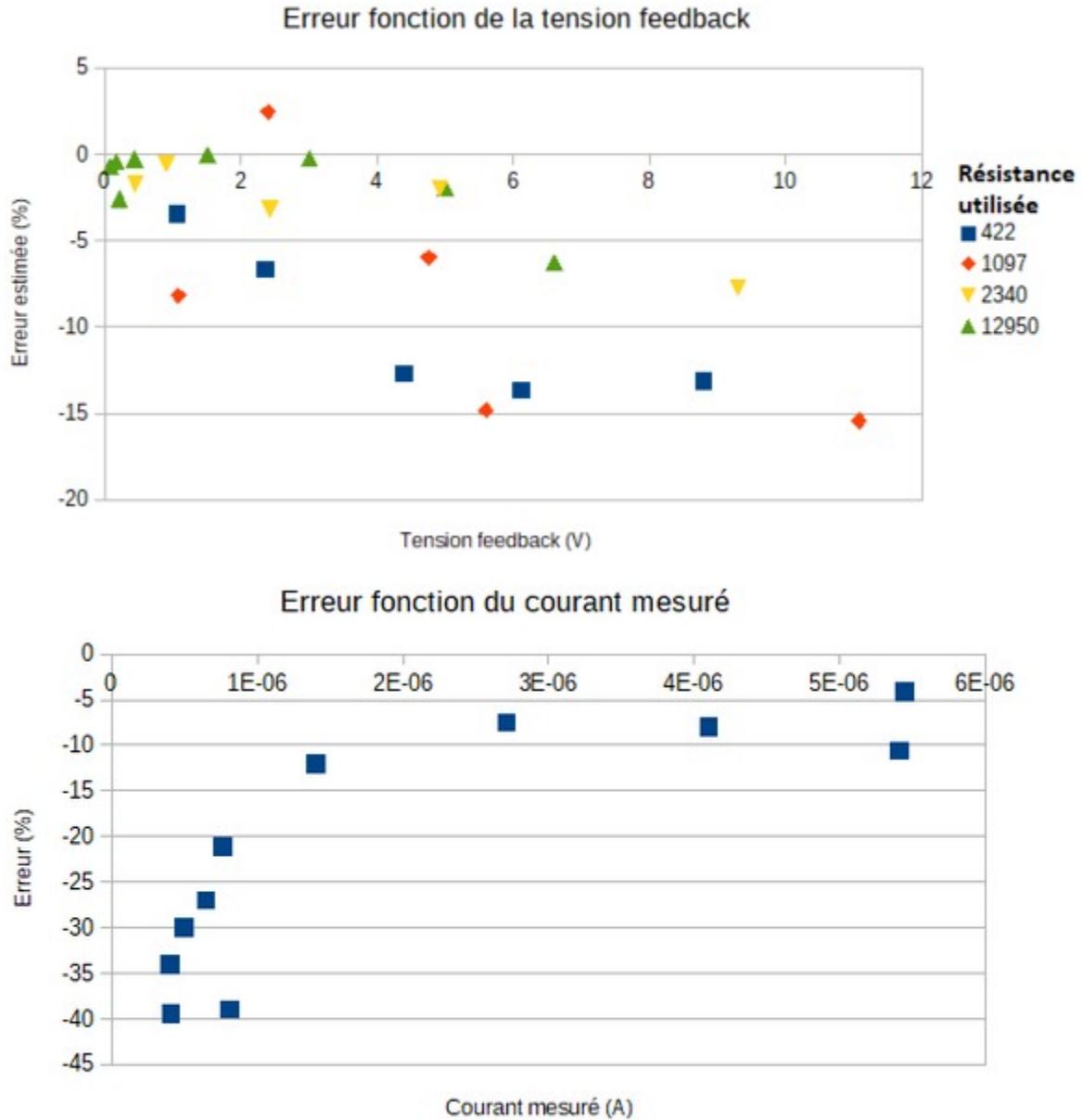
Afin de conserver une précision équivalente quelque soit le calibre utilisé, j'ai voulu séparer les décades en 3 zones égales en amplitude, et se chevauchant (pour l'hystéresis) en suivant cette loi : l'image par la fonction logarithme de zone de chevauchement est égale quelque soit la zone. Ceci afin d'avoir une transition progressive d'une décade à l'autre.

Finalement je n'ai pas retenu cette solution et j'ai préféré un calibre par décade de  $1\mu\text{A}$  à  $100\text{mA}$ .

Autour de  $2\text{mA}$ , les deux méthodes sont employés sur un calibre chacun afin de pouvoir comparer ces dernières.

## Réalisation technique

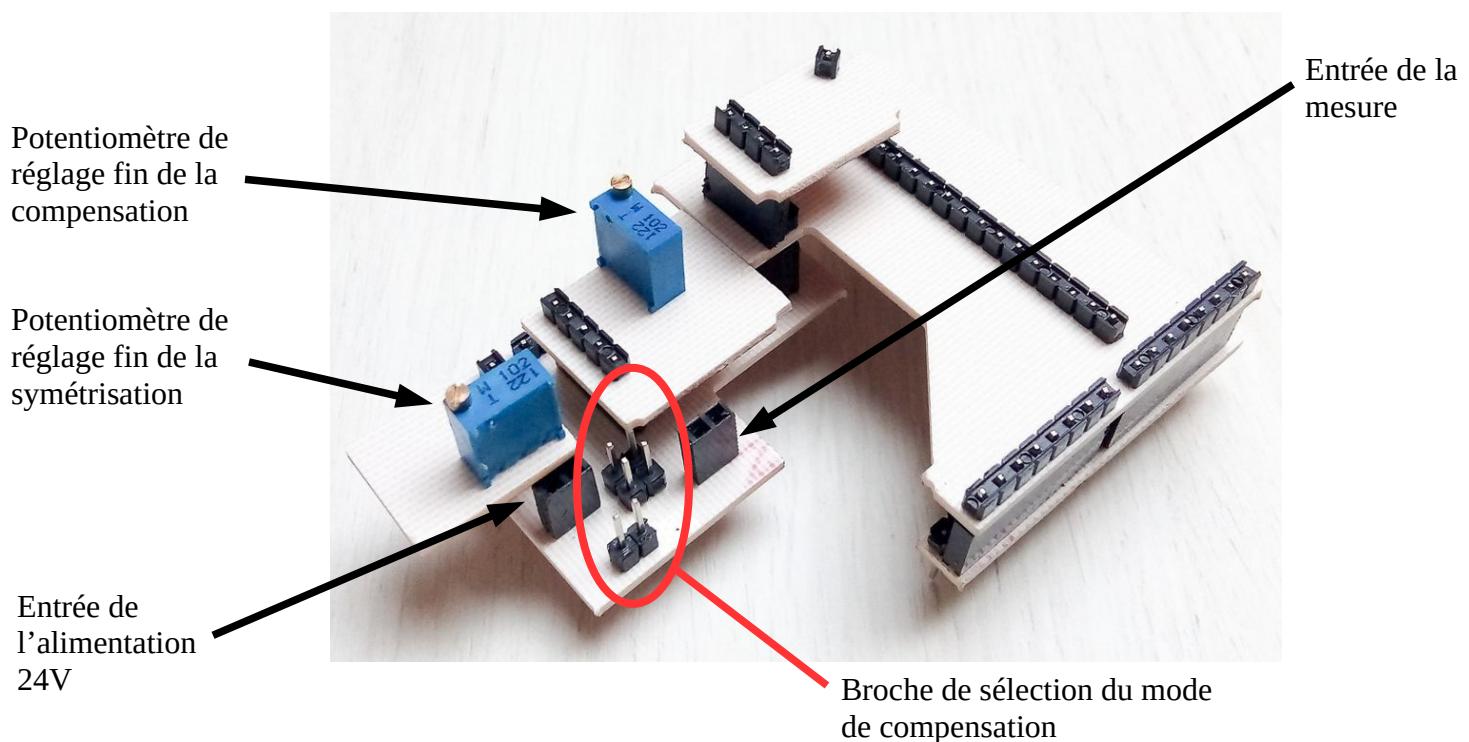
En premier lieu, j'ai réalisé quelques tests sur breadboard afin de déterminer grossièrement les limites du montage final.



Ces courbes m'ont permis de choisir le calibre minimal à utiliser dans l'appareil ( $1\mu\text{A}$ ) et de comprendre l'avantage à utiliser une procédure étalonnage : l'erreur ici est une erreur de fidélité et non de justesse.

J'ai ensuite réalisé le routage des cartes nécessaires à la réalisation du prototype :

- La carte d'alimentation qui sert à réaliser la symétrisation de l'alimentation nécessaire à l'alimentation des AOPs
- La carte de compensation qui sert à réduire la chute de tension en sortie d'appareil
- La carte mère qui permet de relier toutes les cartes ensemble et de choisir par le biais de broches en surface, l'activation ou non de la symétrisation
- Trois cartes superposées qui permettent la mesure de courant et la sélection de calibre



Le tout constitue un shield pour Arduino Due. Les potentiomètres de réglage permettent d'ajuster les différentes tensions avec une précision de l'ordre du  $\mu$ V.

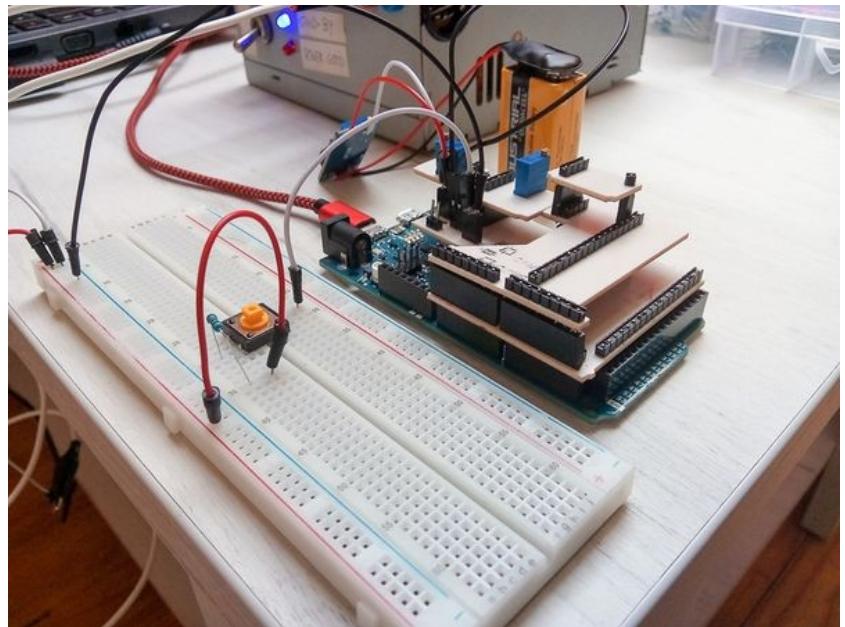


L'alimentation 24V est assurée par un convertisseur boost basé sur un MT3608 alimenté par une pile 9V. La fréquence de hachage étant de 1,2MHz, j'ai ajouté un condensateur céramique de petite valeur sur le shield pour découpler le +12V et le -12V afin de filtrer les parasites sur les conseils du service électronique.

Les cartes ont été réalisées séparément afin de garder une conception modulaire, je voulais au départ créer une variante de ce shield reprenant 4 des 6 cartes existantes permettant avec une nouvelle carte de réaliser la mesure par charge/décharge de condensateur.

Cette division en plusieurs blocs m'a également été d'une grande aide pour tester les fonctions indépendamment, en effet il est facile de mettre un bloc sur une breadboard afin de tester une unique fonction. Ceci m'a permis de régler quelques erreurs sur le circuit venant d'un problème de masse mal connectée et de valider également les cartes qui n'avaient pas de problème.

J'ai ensuite entamé la programmation sur Arduino. Je me suis rendu compte que le montage ne fonctionnait pas correctement : tous les ports analogiques renvoient une valeur nulle comme ci aucun transistor ne permettait la sélection de calibre.



Après avoir testé les cartes indépendamment, je me suis rendu compte que cette sélection de calibre fonctionnait comme prévu. Le problème vient en réalité de l'architecture de l'Arduino Due basé sur un cortex M3, les sorties logiques sortent du 3.3V et non du 5V. Comme j'avais dimensionné les résistances limitant le courant de base proche de la limite basse d'activation pour réduire les perturbations, la sélection n'est pas possible en 3.3V. Il aurait fallu changer toutes ces résistances et tester à nouveau le montage, cependant par manque de temps c'est ici que mon projet en est en fin d'année.

## Bilan sur la réalisation

La partie théorie est assez aboutie, de nombreuses solutions ont été trouvées pour réaliser le prototype. Les essais sur logiciel et sur breadboard montrent que l'on peut descendre sous le  $\mu$ A en précision à condition de créer une procédure étalonnage pour ajuster les valeurs lues.

Le prototype a été réalisé mais n'a pas pu être complètement testé car il est nécessaire de changer les résistances régulant le courant passant dans les transistors afin de l'adapter aux 3,3V de l'Arduino Due.

Seule la carte de sélection de calibre fait défaut, les autres cartes fonctionnent correctement.

Le montage était prévu pour évoluer et tester la mesure par charge/décharge de condensateur. Une interface embarquée était également prévue afin de simplifier la procédure d'étalonnage. Cependant par manque de temps le projet n'a pas pu être mené jusqu'à ce que j'avais prévu au départ.

Je n'ai également pas testé les limites de la vitesse de conversion analogique vers numérique pour ces faibles valeur de courant : tous les tests sur breadboard ont été fait en régime permanent.

Un certain nombre de difficultés rencontrées ont ralenti l'avancement de ce projet :

Une mauvaise organisation au début et un mauvais recul sur le projet m'ont fait passer beaucoup trop de temps une partie théorique conséquente alors que tout n'a pas été utilisé dans le prototype réalisé.

Un retard de plusieurs semaines dû à un problème dans une commande non payée par Lille 1 a freiné le projet dans les premiers test à faire sur breadboard.

Le choix de réaliser les cartes électroniques sur Fritzing m'a obligé à créer des composants qui sont absent des bibliothèques, n'ayant jamais fait cela, j'ai pris beaucoup plus de temps que prévu. Il en est de même pour la forme de la carte qui ne peut pas directement être réalisée sous Fritzing mais par un éditeur de graphisme vectoriel à côté.

Néanmoins, même si le prototype n'est pas pleinement fonctionnel, je connais l'origine de l'erreur. J'aurais aimé tout de même pouvoir faire des mesures sur ce dernier afin de comparer avec les résultats sur breadboard et de pouvoir conclure quand au potentiel gain de précision.

## Conclusion

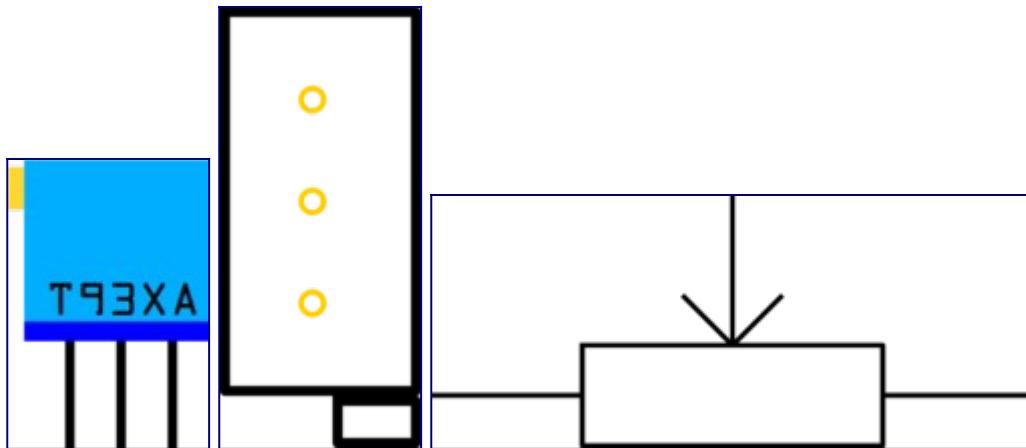
A travers ce projet, j'ai pu mener une réalisation assez complète de la théorie à l'expérimentation. Même si je ne suis pas allé jusque au bout, j'ai pu conclure quand à la précision que l'on peut attendre avec ce type de matériel (sous 1  $\mu$ A) ainsi que l'intérêt de l'étalonnage. Je ne pensais pas qu'il y aurait une différence aussi marquée entre théorie et pratique.

Le fait de devoir répondre à une problématique plus large que ce que j'ai l'habitude de faire en cours m'a donné un aperçu de ce que doit être la démarche d'un ingénieur lorsque le cahier des charges est à définir et lorsque l'on a le choix de la solution à apporter. De plus, j'ai appris de nombreuses choses sur la conception de carte électronique et sur la manière de choisir un composant pour une utilisation précise.

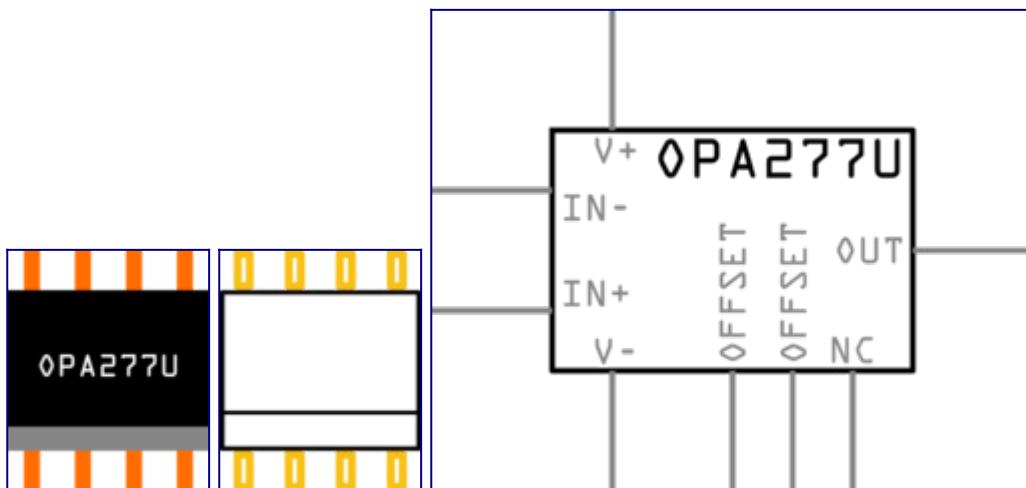
## Annexes

### Composants réalisés sous Fritzing :

Résistance variable T93XA

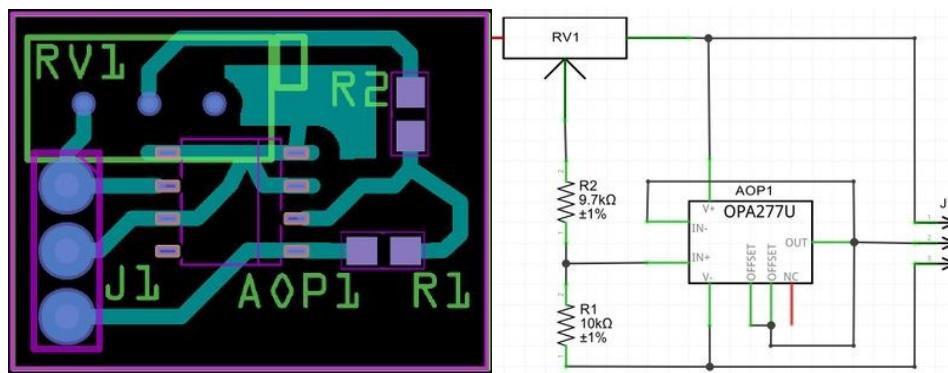


Amplificateur opérationnel OPA227U

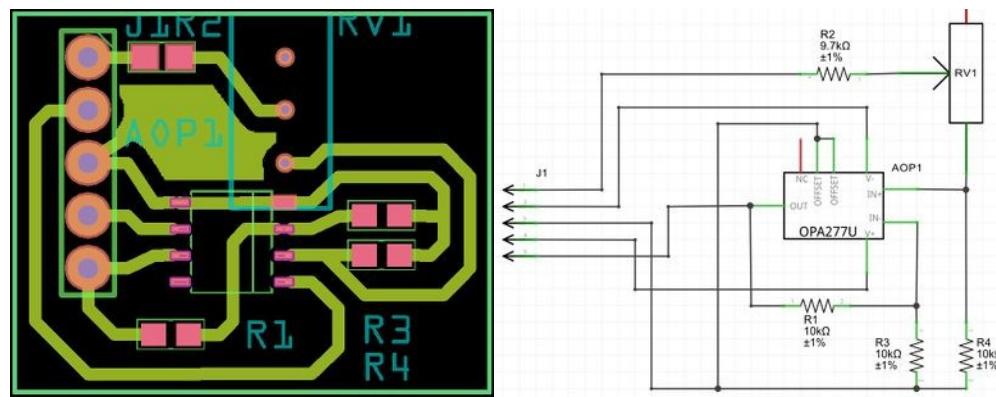


## Cartes électroniques réalisées:

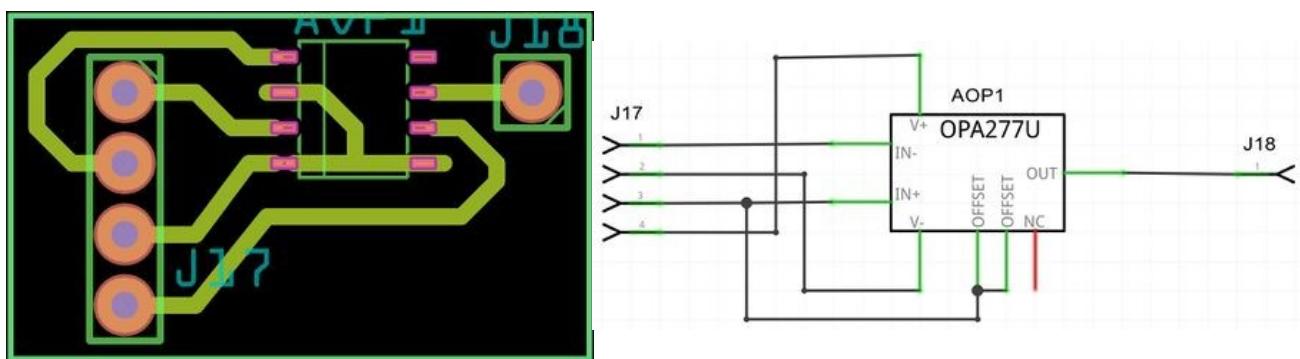
Carte d'alimentation



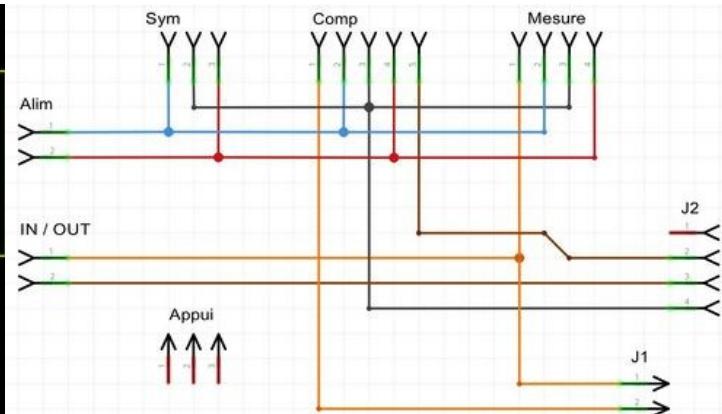
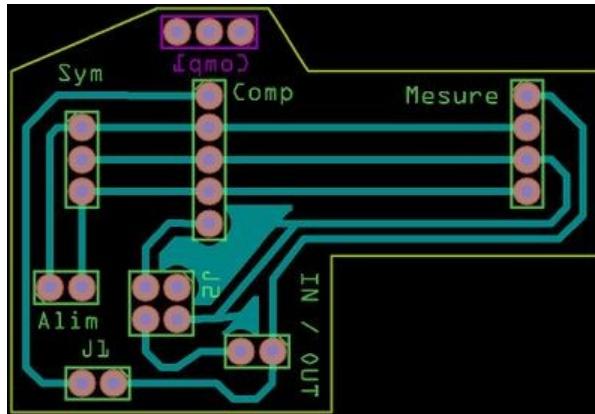
Carte de compensation



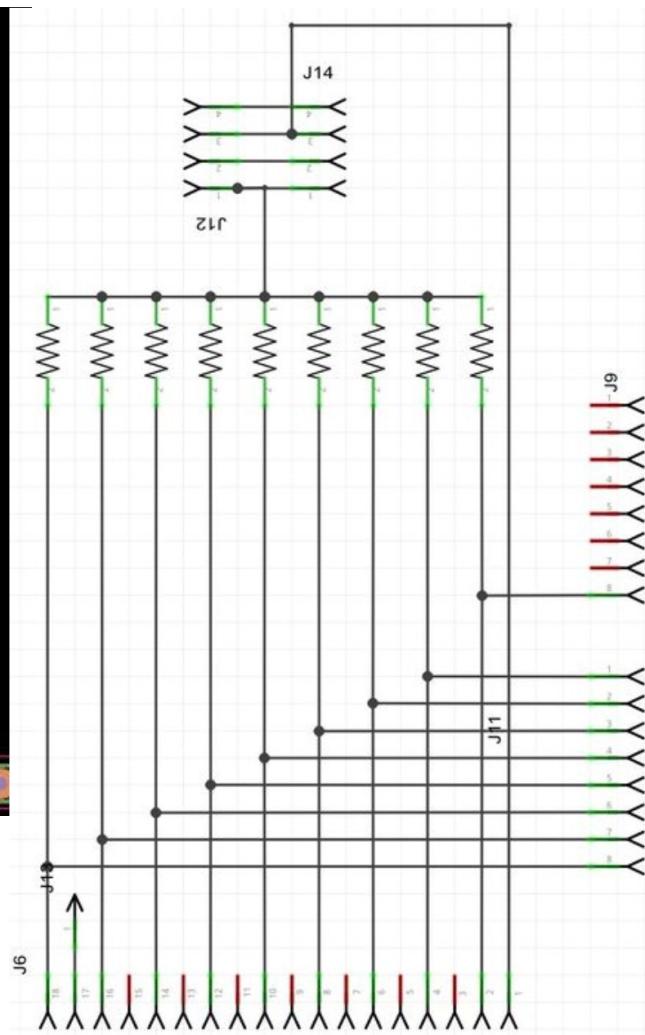
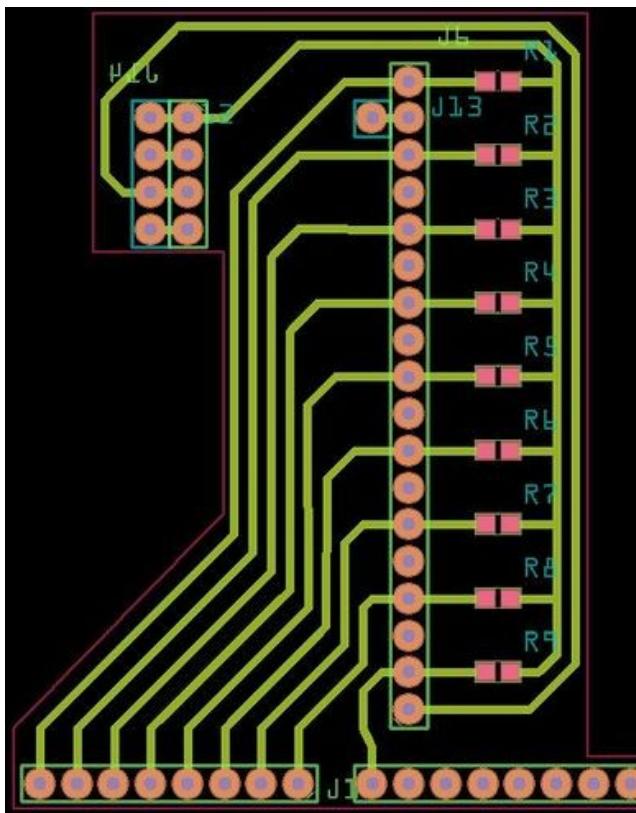
Carte feedback



Carte mère



Carte des résistances de calibres



Carte de sélection de calibre

