



PHY10 - RAPPORT FINAL

Etude d'une nacelle pour la mesure du champ électrique
atmosphérique

Avril 2024

Fouad Allahwerdi, Lise Brisson, Noé Garric, Adrien Goldszal, Olivier Phulpin



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier en premier lieu le chercheur Jean-Jacques Berthelier qui a initié ce projet. Il nous a donné la documentation scientifique nécessaire, des idées de conceptions de nacelle, son aide et des contacts quand nous en avons eu besoin.

Un grand merci également à notre tuteur Nicolas Lequette, doctorant au Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), qui nous a accompagné au cours du projet. Que ce soit pour mesurer l'avancée générale du projet ou nous aider pour des détails techniques (notamment des soudures un peu délicates), il a été présent pour nous les mercredi après-midi.

Nous remercions aussi toute l'équipe du Centre Spatial Etudiant, dirigée par Luca Bucciattini, pour leur aide à l'organisation, l'encadrement, et le financement de ce projet, ainsi que les membres du FabLab du DrahiXnovation Center, dirigé par Cyril Hasson, pour l'accès au matériel et leurs locaux.

Merci également à l'entièreté du LPP, en particulier Fouad Sahraoui, Malik Mansour, Ba Nadjirou ainsi que Fatima Mehrez pour nous avoir prêté du matériel, ainsi que de nombreux conseils sur la réalisation et l'expérimentation de notre électronique. Un grand merci à Alexis Jeandet, qui nous a éclairé sur des larges pans de l'électronique d'acquisition et nous a donné de nombreuses idées pour l'année prochaine.

Le soutien du Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace (LPC2E) nous a particulièrement motivé dans notre projet. Leurs chercheurs nous ont proposé d'organiser le lancement que nous n'avons malheureusement pas effectué, en nous offrant l'hélium, en nous prêtant du matériel (anneau et parachute) et en nous donnant deux radio-sondes. Merci à Xavier Vallières, Stéphane Chevrier et Gilles Chalumeau pour leurs précieux conseils et leur dose de réalisme sur ce qui était et ce qui n'était pas faisable en termes de lancers de ballons.

Enfin, nous remercions le Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD), en particulier Jean-Charles Dupont qui nous a apporté conseils et prêté leur station météorologique pour communiquer avec nos radio-sondes flambant neuves.

Nous remercions enfin le distributeur alimentaire du DrahiX qui nous a fourni des gaufres liégeoises à prix modiques pour travailler le ventre plein les mercredi après-midi.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction au projet	5
2	Théorie	6
2.1	Ionisation & Conductivité dans l'atmosphère	6
2.2	Le circuit électrique global de la Terre	7
2.2.1	Les orages : les générateurs du circuit	7
2.2.2	Le circuit électrique global de la Terre	7
2.3	Ondes électromagnétiques	8
3	Objectifs : Mesures et instrumentation	8
3.1	Mesures et instrumentation	8
3.1.1	Le champ électrique de l'atmosphère	8
3.1.2	La conductivité	9
3.1.3	Les aérosols chargés	10
3.1.4	Résonances de Schumann et autres ondes électromagnétiques	10
3.2	La nacelle et ses enjeux	11
4	Conception mécanique de la nacelle	12
4.1	Vue d'ensemble : cahier des charges	12
4.1.1	Trajectoire du ballon	12
4.1.2	Contraintes	12
4.2	La nacelle	16
4.2.1	Structure et matériau	16
4.2.2	Isolation thermique	17
4.2.3	La rotation de la nacelle	18
4.3	Les électrodes	19
4.3.1	Des électrodes en ABS conducteur	19
4.3.2	Des électrodes couvertes d'une peinture métallique	20
4.3.3	Des électrodes en métal	20
4.3.4	Uniformisation du potentiel des électrodes	20
4.4	Assemblage	21
5	Electronique & Instrumentation	22
5.1	Organisation des mesures	22
5.1.1	Préamplificateur	22
5.1.2	Filtrage	24
5.2	Signaux numériques et stockage	27
5.2.1	Conversion analogique-numérique	27
5.2.2	Stockage sur carte SD	32
5.2.3	Magnétomètre	34
5.2.4	Accéléromètres	38
5.2.5	Mesure de position GPS	38
6	Organisation du projet, Retour sur les objectifs & Enseignements	39
6.1	Répartition des tâches au sein du groupe	39
6.2	Retour sur les objectifs	39
6.3	Enseignements	39
7	Conclusion et perspectives	40

8	Annexes	42
8.1	Annexe 1 : code de la simulation numérique	42
8.2	Annexe 2 : schémas des électrodes	45
8.3	Annexe 3 : Filtres du préamplificateur	46
8.3.1	Filtrage DC	46
8.3.2	Filtrage AC - AC1, Passe Bas	46
8.3.3	Filtrage AC : AC2, Passe Haut d'ordre 2 : $f_c = 3Hz$	47
8.4	Annexe 4 : Filtrage	48
8.4.1	Filtre A3 : Passe Bas 3Hz d'ordre 2	48
8.4.2	Filtre A4 : Soustracteur à gain variable	49
8.4.3	Filtre 5 : Passe bande 3Hz $\langle \rangle$ 45Hz	49
8.4.4	Filtre A7 : Passe bas 2 kHz	50
8.5	Annexe 5 : Schéma électrique global du filtrage	50
8.6	Annexe 6 : Calibration du magnétomètre et approximation d'une ellipse par moindres carrées	52
8.6.1	Recentrer en une sphère	52
8.6.2	Trouver les paramètres de notre ellipse : l'algorithme des moindres carrés	53
8.7	Annexe 7 : Communication SPI avec le microcontrôleur	55
8.8	Annexe 8 : Echantillonnage avec une Arduino Mega	56

1

INTRODUCTION AU PROJET

La physique de l'atmosphère, et le circuit électrique qu'elle constitue sont des sujets de recherche actifs. Plus précisément, la conductivité et le champ électrique de l'atmosphère font l'objet de modèles théoriques, et de mesures expérimentales [2]. Les physiciens de l'atmosphère s'intéressent aux orages, aux phénomènes qu'ils engendrent et à leur impact sur le circuit électrique global de l'atmosphère. Les recherches sur le rôle des phénomènes de décharge plus complexes comme les Transient Luminous Events et des Terrestrial Gamma Ray Flashes, est aussi très important, ainsi que les ondes électromagnétiques comme les résonances de Schumann. Les résonances de Schumann, même si connues depuis les années 1960, sont utilisées par exemple pour des applications assez originales comme celle de contraindre la masse du photon [6]. Les enjeux ainsi que l'explication de ces phénomènes physiques sont détaillés dans la section suivante.

L'utilisation de ballons atmosphériques est particulièrement bien adaptée à l'étude de ces phénomènes physiques. Ils permettent, en effet, d'explorer une gamme d'altitude siège de la plupart des mécanismes qui sont à l'origine de l'électricité atmosphérique et les causes directes de nombreux phénomènes associés. Deux programmes français de recherches utilisant des ballons sont menés actuellement sous l'égide du CNES, le programme général STRATEOLE-2 [4] et le programme STRATELEC [3].

Dédié à l'étude des phénomènes atmosphériques au niveau de l'équateur terrestre, le projet STRATEOLE-2 repose sur le lâcher d'énormes ballons capables de voler plus de trois mois entre 18 et 20 km d'altitude à l'occasion de nombreuses campagnes entre 2020 et 2024. Le programme STRATELEC, qui vise à employer une instrumentation innovante pour la mesure des caractéristiques de l'atmosphère, est étroitement lié à STRATEOLE-2. Il a permis le développement de nouveaux détecteurs passifs comme des spectrophotomètres pour rayons gamma, de nouveaux récepteurs VHF, et de moulins à champ électrique qui devraient voir le jour d'ici 2024. L'ensemble de ces instruments sera testé lors d'une campagne de vols entre 2024 et 2025 dans le but de recueillir des données sur les tempêtes des tropiques.

Notre projet s'inscrit dans la continuité des programmes STRATEOLE-2 et STRATELEC, en partenariat avec le laboratoire Atmosphères, Observations Spatiales (LATMOS) et a pour objectif de tester et de développer un prototype de nacelle, ainsi que son instrumentation, utilisable dans certaines des missions du CNES.

Ce rapport est divisé en plusieurs parties.

- Dans un premier temps, une explication théorique de certains éléments importants autour des phénomènes électromagnétiques de l'atmosphère.
- Ensuite, une présentation des objectifs du projet, en termes de mesures et de conception.
- Vient une explication de la conception de la nacelle ainsi que son instrumentation.
- Enfin, un retour sur les objectifs et les apprentissages de ce projet particulièrement enrichissant.

2

THÉORIE

2.1 IONISATION & CONDUCTIVITÉ DANS L'ATMOSPHÈRE

L'atmosphère est souvent définie comme se situant entre la surface du sol et le bas de la couche conductrice de l'ionosphère, vers 80 km d'altitude [2]. L'impact de rayonnements cosmiques et de photons solaires vont entraîner l'ionisation de celle-ci : des électrons vont être arrachés de certains atomes neutres, et vont être très rapidement capturés par d'autres composants neutres, ce qui entraîne la création de "paires d'ions" positifs et négatifs. Les paires d'ions sont utilisées pour définir le taux d'ionisation de l'atmosphère et donc, sa conductivité.

L'atmosphère terrestre est composée de constituants neutres aux potentiels d'ionisation très élevés (O_2 : 12.1eV, N_2 : 15.6eV, NO : 9.3eV). Ainsi, la basse atmosphère est très faiblement ionisée, avec seulement certains rayons cosmiques très énergiques qui atteignent la surface terrestre et qui permettent une ionisation. A partir de 30 km, au niveau de la stratosphère, le rayonnement solaire joue aussi un rôle dans l'ionisation des particules.

Les paires d'ions présentes dans l'atmosphère entraînent l'existence d'une conductivité, σ qui augmente avec l'altitude. Même si l'on observe des variations importantes lors de mesures réelles, souvent dues aux différences des saisons, d'activité solaire, ou de processus comme les orages, le profil typique de conductivité est illustré sur la figure suivante.

An Overview of Earth's Global Electric Circuit and Atmospheric Conductivity

91

Fig. 5 Model conductivity profile for the atmosphere up to 80 km altitude; the *dashed line* variation is within a thundercloud. Also shown is the relaxation time τ , defined in the text. (From Rycroft et al. 2007)

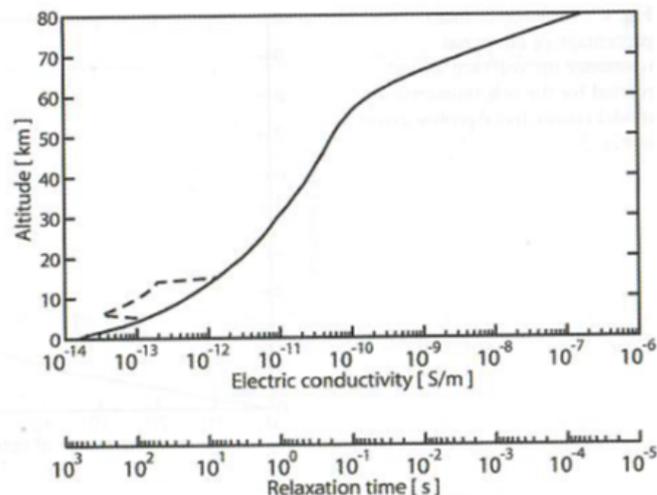


FIGURE 1 – Profil typique de la conductivité atmosphérique, Rycroft et al. SSR 2008

2.2 LE CIRCUIT ÉLECTRIQUE GLOBAL DE LA TERRE

2.2.1 • LES ORAGES : LES GÉNÉRATEURS DU CIRCUIT

Dans les nuages s'opère une séparation des charges entre particules de glace et gouttes d'eau liquide. Par conséquent, les charges positives se retrouvent en haut du nuage (8-12km) et les charges négatives à leur base (1-3km) [1]. Lorsque le niveau des charges électriques dépasse un certain seuil, celui du niveau de claquage de l'atmosphère locale, il se déclenche une décharge électrique, souvent sous forme d'éclairs. On peut donc voir les nuages comme une forme de "batterie", qui crée un courant vers l'ionosphère.

Il est important de noter que les éclairs ne sont pas la seule forme de décharge électrique. Des études récentes mettent en évidence l'existence de "Transient Luminous Events" (TLE), phénomènes lumineux liés à des décharges en haute atmosphère; ainsi que des "Terrestrial Gamma Ray Flashes" (TGF), flux de photons γ de grande énergie. Ces phénomènes sont encore mal compris et sont l'objet de recherches importantes à la fois théorique et par des observations.

2.2.2 • LE CIRCUIT ÉLECTRIQUE GLOBAL DE LA TERRE

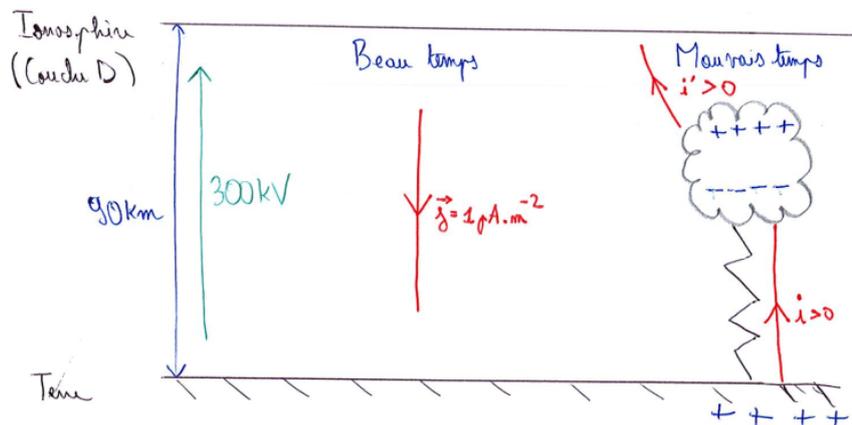


FIGURE 2 – Schéma électrique global de la Terre

Le circuit électrique global de la Terre comprend donc un générateur : les nuages orageux, et un circuit de retour de courant dans les zones calmes où l'atmosphère joue le rôle d'une simple résistance.

On peut ainsi voir l'ionosphère comme un conducteur parfait situé à 90 km d'altitude qui est porté à un potentiel d'environ 200-300kV par rapport à la surface de la Terre, considérée comme l'origine des potentiels électriques. Celle-ci se "décharge" dans les régions calmes. Il existe donc un champ électrique vertical continu important dans l'atmosphère, de l'ordre de 100 à 300 $V.m^{-1}$ proche du sol, et plus faible en haute atmosphère.

Il est important de noter que le champ électrique de l'atmosphère n'est pas complètement vertical. En particulier à haute latitude, le vent solaire interagit avec la magnétosphère de la Terre et entraîne des différences de potentiel au sein de l'ionosphère [1]. Au sein de l'atmosphère, ces différences créent un champ électrique horizontal d'une dizaine à une centaine de $mV.m^{-1}$.

2.3 ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Les phénomènes de décharge comme les éclairs, ELF et TGF entraînent l'émission d'ondes électromagnétiques (EM).

En modélisant l'atmosphère comme un guide d'ondes entre la surface de la Terre et la couche D de l'ionosphère, à 80km, considérés comme parfaitement conductrices, on observe que certaines ondes sont les modes propres du modèle, appelées résonances de Schumann. En effet, celui-ci a montré qu'en prenant en compte la courbure de la cavité Ionosphère - Terre, ces modes vérifient [5] :

$$f_n = \frac{c}{2\pi R} \sqrt{n(n+1)} \quad (1)$$

avec R le rayon de la Terre. En réalité mesurées à environ 7Hz, 14Hz, 21Hz car la conductivité de l'ionosphère n'est pas parfaite.

Les caractéristiques du spectre de ces ondes varient en fonction de nombreux paramètres, en particulier des orages, des perturbations aurorales, des décharges de hautes altitudes, et constituent elles aussi à ce jour des travaux de recherche.

D'autres types d'OEM sont émises par l'activité orageuse, dont les sferics, qui ont une fréquence de l'ordre du kHz.

3

OBJECTIFS : MESURES ET INSTRUMENTATION

L'objectif de ce PSC, en collaboration avec M. Jean-Jacques Berthelie, chercheur au LATMOS, est de développer une nacelle de ballon atmosphérique, ainsi que son instrumentation, pour la mesure de plusieurs propriétés physiques de l'atmosphère jusqu'à environ 25-30 km d'altitude. En particulier, un des enjeux du projet est le développement et la validation d'une instrumentation capable de mesurer des champs électriques forts lors de temps orageux, pouvant être utilisée par la suite dans des projets comme celui de STRATELEC.

Il est question de mesurer ou de détecter les éléments suivants : le champ électrique, la conductivité électrique, la concentration en aérosols chargés à différentes altitudes de l'atmosphère, ainsi que des ondes électromagnétiques de basse fréquence ($f \in [0, 2\text{kHz}]$), en particulier les résonances de Schumann.

3.1 MESURES ET INSTRUMENTATION

3.1.1 • LE CHAMP ÉLECTRIQUE DE L'ATMOSPHÈRE

La mesure des trois composantes du champ électrique atmosphérique, à la fois AC et DC, représente la mesure "de base" de l'électricité atmosphérique. L'objectif est de mesurer l'intensité et la direction du champ, le profil en altitude, les perturbations dues aux nuages, et permettre la comparaison avec le profil de conductivité.

La méthode proposée repose sur l'utilisation de 4 électrodes sphériques comme indiqué sur le schéma suivant :

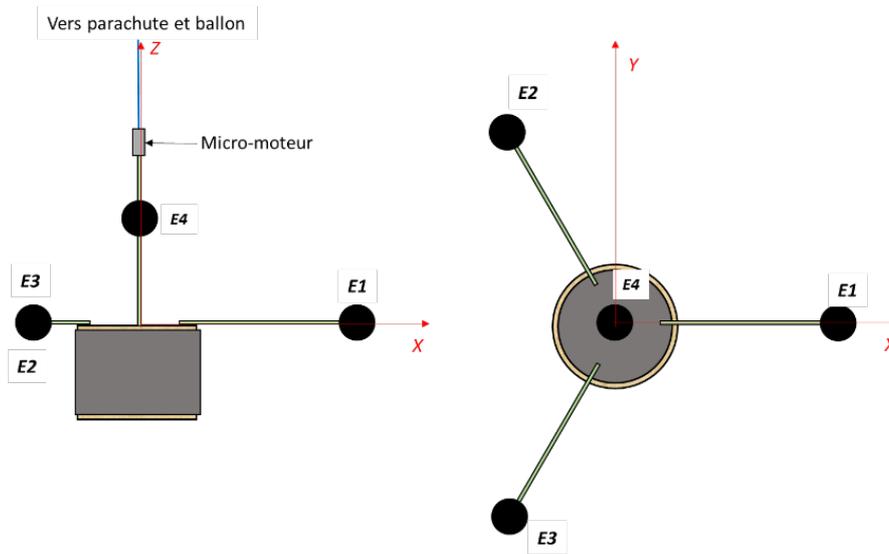


FIGURE 3 – Schéma de la nacelle (Source : Jean-Jacques Berthelier)

Trois électrodes dans le plan XY permettent de mesurer les composantes horizontales du champ électrique. Celles-ci sont liées à la nacelle par des bras en fibre de verre de 1 mètre. Une dernière électrode permet de mesurer la composante verticale du champ électrique.

La question de la rotation de la nacelle a été soulevée, celle-ci permettant de corriger les différences de mesures dues aux différences de potentiel de surface des électrodes. Même si ces différences sont potentiellement faibles et de l'ordre de quelques centaines de mV, elles pourraient jouer un rôle non négligeable car le champ électrique horizontal est faible lui aussi.

3.1.2 • LA CONDUCTIVITÉ

Pour mesurer la conductivité de l'atmosphère, on peut utiliser une méthode de *relaxation*. Une des électrodes est déplacée de son potentiel d'équilibre à intervalles réguliers. La conductivité est liée au temps de retour de celle-ci à son potentiel d'équilibre, qui sera mesuré. La mesure de la conductivité sous cette forme est intéressante car en plus du fait que peu de mesures ont été faites jusqu'à présent, elle nous permettrait de voir s'il y a des variations locales lors de traversées de nuages ou à cause de la pollution urbaine.

Cherchons une relation entre le temps de relaxation d'un conducteur chargé et la conductivité du milieu qui l'entoure [7]. Dans un milieu conducteur isotrope, la loi d'Ohm ainsi que la conservation de la charge et l'équation de Maxwell-Gauss nous permettent d'obtenir :

$$\begin{cases} \vec{J} = \sigma \vec{E} \\ \nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \rho = \rho_0 e^{-\frac{\sigma t}{\epsilon_0}}$$

On obtient

$$\tau = \frac{\epsilon_0}{\sigma}$$

la constante de temps avec σ la conductivité de l'atmosphère en $\Omega^{-1}m^{-1}$ et ϵ_0 la permittivité diélectrique du vide.

En considérant une électrode sphérique au bout d'un bras isolant de taille grande devant le rayon de la sphère, de charge Q , on peut écrire que pour une distance grande devant R ,

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

On rappelle par la loi d'Ohm que \vec{J} est la densité de courants dans le milieu telle que $\vec{J} = \sigma\vec{E}$

Les courants sortants de la sphère sont donc

$$I = 4\pi R^2 J = \frac{\sigma Q}{\epsilon_0}$$

Or

$$I = -\frac{\partial Q}{\partial t}$$

On a alors

$$Q = Q_0 e^{\frac{-\sigma t}{\epsilon_0}}$$

puis

$$V = V_0 e^{\frac{-\sigma t}{\epsilon_0}}$$

Enfin dans notre cas, l'excitation par un potentiel V_0 de l'électrode à $t=0$ produit un potentiel pour $t>0$ de

$$V = (V_0 - V_{eq})e^{\frac{-\sigma t}{\epsilon_0}} + V_{eq}$$

Cela nous permet d'obtenir la conductivité en mesurant le temps de relaxation par rapport à un potentiel V_0 appliqué à l'électrode jusqu'à son équilibre V_{eq} .

3.1.3 • LES AÉROSOLS CHARGÉS

Le rôle des poussières au sein de l'atmosphère, leur électrification et ses conséquences sur les mécanismes de déclenchement des éclairs, sur la météorologie, et sur les transports de particules sur de grandes distances, sont encore mal compris. [1].

Les poussières électrifiées, en particulier lors d'épisodes tels qu'on en observe de manière périodique, amenant des particules du désert du Sahara par exemple, génèrent des impulsions lors de leur impact sur les électrodes. Il convient de mesurer cet impact, dont l'amplitude est proportionnelle à la charge, pour essayer de mieux comprendre ces phénomènes.

3.1.4 • RÉSONANCES DE SCHUMANN ET AUTRES ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

La mesure des résonances de Schumann ainsi que d'autres signaux engendrés par des éclairs, ou encore des émetteurs au sol, est un moyen de vérifier le fonctionnement correct de la chaîne de mesures.

3.2 LA NACELLE ET SES ENJEUX

L'envoi d'un ballon dans l'atmosphère nécessite une autorisation de la Direction Générale de l'Aviation Civile (DGAC), qui possède des critères stricts. Même si des discussions avec le Laboratoire de Physique et de Chimie de l'environnement et de l'Espace (LPC2E), possédant un terrain de lancement à Orléans homologué nous permettaient de faciliter la démarche de lancement, plusieurs consignes étaient à respecter, notamment de ne pas dépasser un poids de 3 kilogrammes pour l'ensemble de la nacelle, ainsi que la nécessité d'utiliser des matériaux suffisamment friables pour éviter tout problème majeur lors de collisions potentielles avec des avions.

4

CONCEPTION MÉCANIQUE DE LA NACELLE

4.1 VUE D'ENSEMBLE : CAHIER DES CHARGES

L'objectif de cette section est de cerner les contraintes qu'imposent un vol atmosphérique.

4.1.1 • TRAJECTOIRE DU BALLON

Pour définir ces contraintes, intéresserons-nous à la dynamique du ballon lors du vol en cherchant l'ordre de grandeur caractéristique de la vitesse ascensionnelle. On applique le principe fondamental de la dynamique projeté selon l'axe vertical. L'ascension du ballon est le résultat de la compétition entre son poids et la force de traînée d'une part et la poussée d'Archimède d'autre part.

$$m\ddot{z} = \frac{-1}{2}\rho C_x S \dot{z}^2 - mg + \rho V g \quad (*)$$

Afin de considérer la diminution de la densité de l'air dans l'atmosphère, nous nous appuyons sur le modèle simple de l'atmosphère isotherme.

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g, \quad \text{avec} \quad P = \frac{\rho RT}{M_{\text{air}}}$$

$$\text{Soit} \quad \rho = \rho_0 \exp(-z/H) \quad \text{avec} \quad \rho_0 = \frac{P_0 M_{\text{air}}}{RT} \quad \text{et} \quad H = \frac{M_{\text{air}} g}{RT}$$

Le module odeint de Python permet d'obtenir une résolution numérique de l'équation du mouvement de la nacelle (*). Les valeurs prises pour la résolution numérique (Figure 4) sont : $V = 4,2 \text{ m}^3$, $M = 5 \text{ kg}$, $S = 12,5 \text{ m}^2$, $C_x = 0,5$, $\rho = 1,204 \text{ kg.m}^{-3}$, $g = 9.8 \text{ m.s}^{-2}$.

On observe sur la figure 4 un très court régime de transition au bout duquel la vitesse se stabilise à $v_{\text{stab}} = \sqrt{\frac{2(\rho V - m)g}{\rho C_x S}}$, ici à environ 3 m.s^{-1} . Avant d'éclater, le ballon arrive à une altitude entre 25 et 30 km où la poussée d'Archimède égale le poids.

Bien que ce modèle simple donne un résultat satisfaisant, l'hypothèse d'une température constante dans l'atmosphère est fautive aux altitudes considérées. Le profil de l'atmosphère de la figure 5 montre que la température chute drastiquement jusqu'à -56°C .

4.1.2 • CONTRAINTES

L'ensemble du ballon est constitué de trois éléments principaux (Figure 6) :

- la nacelle
- les électrodes
- les bras portant les électrodes

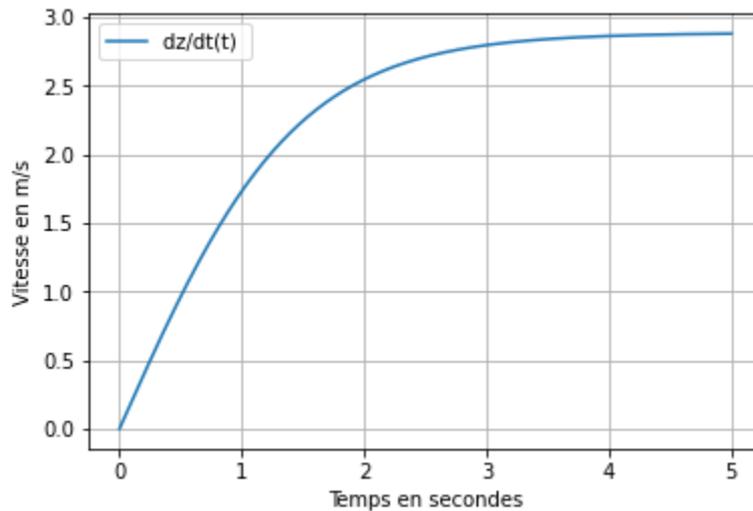


FIGURE 4 – Vitesse ascensionnelle par résolution numérique

Le rôle de l’anneau présent sur le schéma de la figure 6 sera détaillé dans la section assemblage.

Le profil de température de l’atmosphère ainsi que les conditions du vol vues précédemment imposent à la nacelle :

- de contenir l’ensemble de l’électronique.
- de ne pas excéder les 3 kg au total (en comprenant son contenu, les bras qu’elle porte, les électrodes, et la radiosonde M10 qui lui est adjointe) .
- d’être friable en cas de collision avec un avion .
- d’amortir un minimum les chocs lors de sa chute.
- d’isoler thermiquement l’électronique qu’elle contient car la température peut descendre jusqu’à -56°C à 12 km d’altitude. Or la température normale de fonctionnement des batteries est comprise entre 0 et 45°C . Il n’est pas recommandé de les utiliser en dessous de -20°C .

Les électrodes qui sont les instruments de mesure du montage nécessitent un soin particulier :

- Elles doivent être faites dans un matériau conducteur, un métal par exemple.
- Les quatre électrodes doivent avoir une surface externe sphérique lisse parfaitement identique afin d’assurer une conductivité uniforme .
- Elles doivent accueillir à l’intérieur chacune un accéléromètre afin de détecter d’éventuels bruits parasites.

Enfin, les bras sont un des éléments les moins contraints :

- Ils doivent être légers.
- Ils doivent être suffisamment résistants afin de porter une électrode au bout sans se rompre.

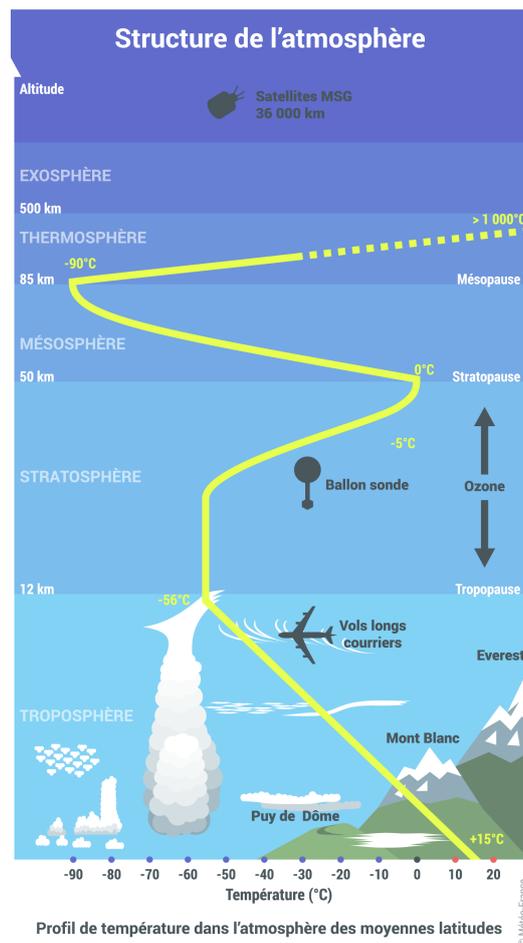


FIGURE 5 – Profil de température de l'atmosphère (source : météo France)

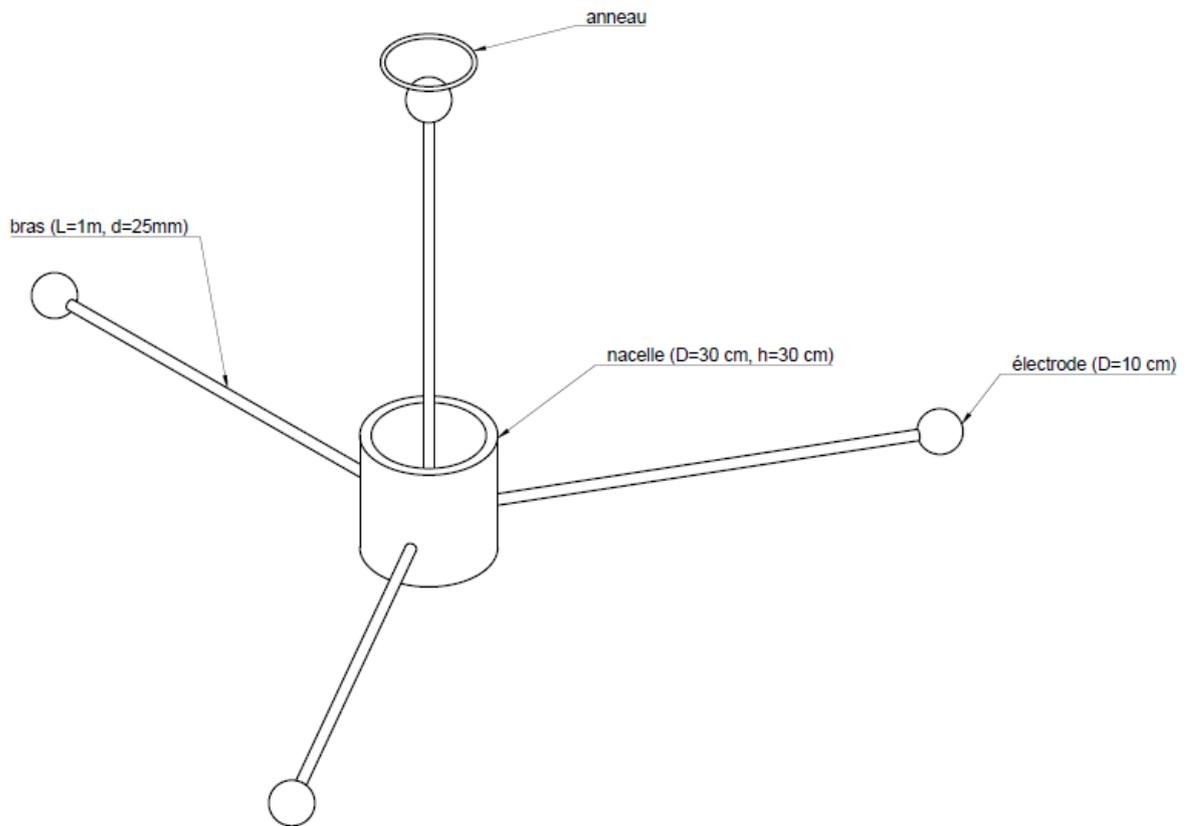


FIGURE 6 – Vue d'ensemble des composants de la nacelle

4.2 LA NACELLE

Les deux défis majeurs sur la fabrication de la nacelle sont le poids et l'isolation.

4.2.1 • STRUCTURE ET MATÉRIAU

En termes de poids et d'isolation, nous nous sommes orientés vers du polyuréthane expansé qui est un meilleur isolant que le polystyrène ($\lambda_{polyuréthane} = 0.022W.m^{-1}.K^{-1}$ et $\lambda_{polystyrène} = 0.034W.m^{-1}.K^{-1}$) pour une masse volumique équivalente ($35kg.m^{-3}$). Les dimensions de la nacelles sont contraintes par la taille de notre plus grand circuit imprimé, celui du filtrage. Nous avons donc choisi un rayon intérieur de 25 cm pour une hauteur de 30 cm également pour accueillir le circuit imprimé de 26 cm de long.

Nous avons d'abord envisagé de fabriquer un moule dans lequel nous pourrions couler la mousse expansive en bombe. Cependant, le démoulage s'avérait difficile : en l'absence d'agent démoulant, la mousse se cassait. Nous avons ensuite imaginé constituer une coque creuse et légère imprimée en 3D qui nous remplirions de mousse expansive. Cette coque, présentée sur les figures 7a et 7b, forme un cylindre à double paroi avec un fond alvéolé afin d'optimiser le poids tout en gardant une bonne résistance. Des trous renforcés par des renflements en biseaux sont destinés à tenir les bras des électrodes.

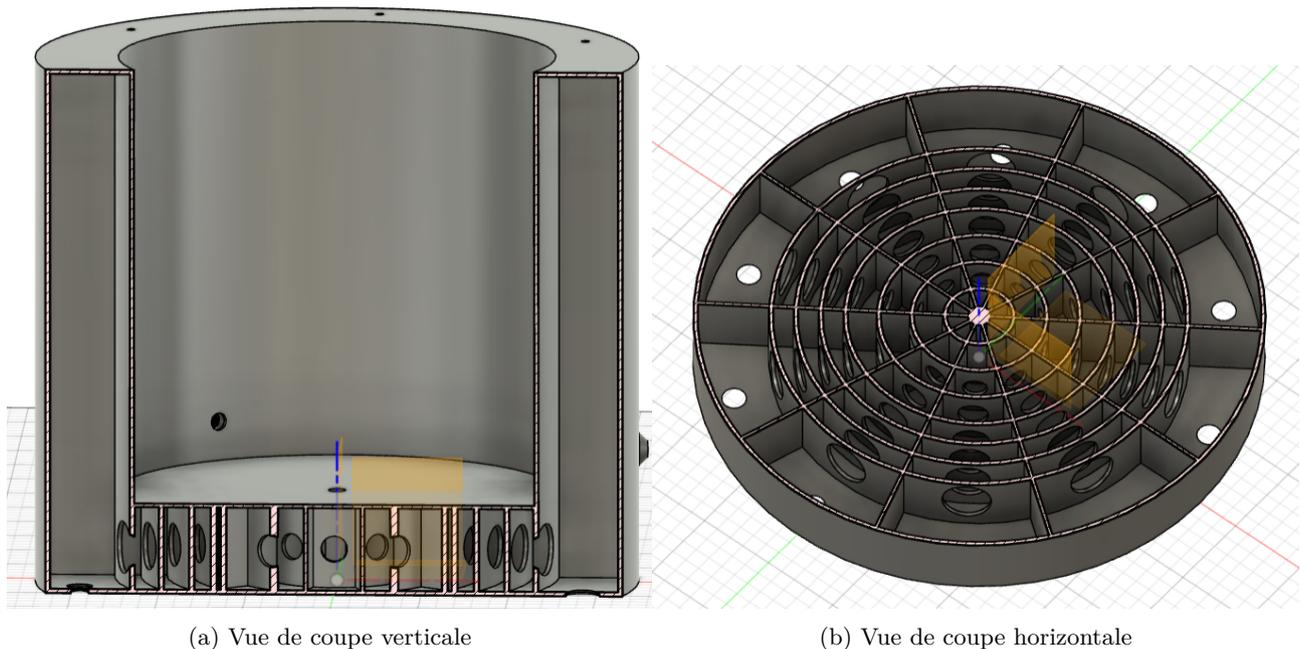


FIGURE 7 – Prototype envisagé de nacelle

Cependant, malgré les efforts pour alléger la coque, cette dernière pesait plus de 2kg, nous forçant à abandonner l'idée. Nous nous sommes rabattus sur une fabrication à partir de plaque de polyuréthane expansé que nous avons découpées afin d'obtenir un cylindre creux. Au vu des dimensions de la nacelle et des dimensions standard dans le commerce, nous avons opté une épaisseur de 5cm pour la nacelle. Le poids de la nacelle est ainsi de 860 g.

4.2.2 • ISOLATION THERMIQUE

Notre objectif d'isolation thermique est de conserver une température de 0°C à l'intérieur de la nacelle afin d'assurer le bon fonctionnement des batteries et de l'électronique. A l'aide d'une analyse numérique qui s'appuie sur la méthode des éléments finis, nous avons simulé la température à l'intérieur de la nacelle au cours de l'ascension. Le but de la simulation numérique est de prévoir si l'épaisseur de 5cm est suffisante pour isoler les composants électroniques. La température à l'intérieur de la nacelle vérifie :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \nabla^2 T = S$$

Où C_p est la chaleur spécifique du polyuréthane, λ sa conductivité thermique et S une source volumique de chaleur. Nous opté pour une condition limite de Fourier-Robin sur le bord extérieur .

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + h(T - T_{ext}) = 0$$

Où h est le coefficient de convection.

Paramètre	Valeur
Conductivité thermique du polyuréthane	0.022 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Conductivité thermique de l'air	0.024 $W.m^{-1}.K^{-1}$
Capacité thermique massique du polyuréthane	1423 $J.K^{-1}.kg^{-1}$
Capacité thermique massique de l'air	1004 $J.K^{-1}.kg^{-1}$
Masse volumique du polyuréthane	35 $kg.m^{-3}$
Masse volumique de l'air	1.2 $kg.m^{-3}$
Coefficient de convection	10 $W.m^{-2}.K^{-1}$

TABLE 1 – Valeurs des paramètres utilisés pour la simulation numérique

La simulation thermique effectuée sur FreeFEM++ et dont le code est en annexe 1 donne les résultats de la figure 8.

Elle prévoit une température d'environ -23°C lorsque la température extérieur est de -56°C . Un chauffage doit donc être installé afin d'assurer le bon fonctionnement de l'équipement.

Estimons le chauffage à apporter pour garantir une température de 0°C dans la nacelle.

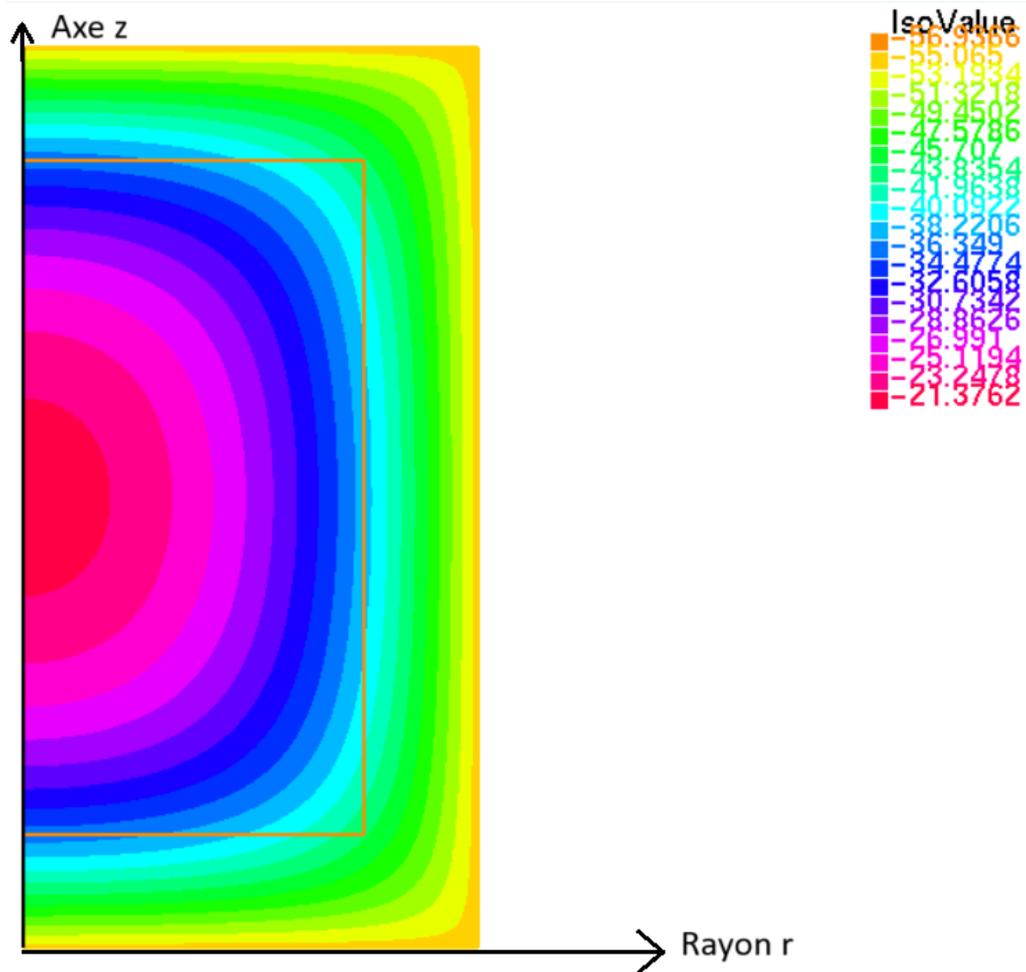
$$(T_{int} - T_{ext}) \frac{S_{int} \lambda}{e} = Q_{elec} + Q_{chauffage}$$

où S_{int} est la surface intérieur de la nacelle, e son épaisseur et Q_{elec} est la chaleur dissipée par l'électroniques. Soit,

$$Q_{chauffage} = (T_{int} - T_{ext}) \frac{S_{int} \lambda}{e} - Q_{elec}$$

$$Q_{chauffage} = 9W$$

Température extérieure moyenne sur la durée du vol	$T_{ext} = -23^{\circ}\text{C}$
Température intérieure admissible	$T_{int} = 0^{\circ}\text{C}$
Surface intérieure de la nacelle	$1.13 m^2$
Chaleur dissipée par l'électronique	$2 W$
Capacité thermique du polyuréthane	$\lambda = 0.022 W.m^{-1}.J^{-1}$

FIGURE 8 – Profil de température dans la nacelle à $T_{ext} = -56^{\circ}\text{C}$

Il convient d'acheter des dissipateurs de chaleur produisant une puissance de 8W. Cette puissance sera suffisante pour atteindre le seuil de 0°C dans la nacelle car nous avons négligé la chaleur apporté par le rayonnement du soleil et nous n'avons pas tenu compte de la masse de l'électronique et des batteries qui ont un effet important sur la capacité thermique globale.

4.2.3 • LA ROTATION DE LA NACELLE

Le ballon est équipé de 4 électrodes. Les 3 électrodes situées dans le plan horizontal sont chargées de mesurer la composante horizontale du champ électrique tandis que l'électrode dans le plan vertical mesure la composante verticale du champ électrique. Cependant, il est possible que les électrodes dans le plan horizontal ne détectent pas le champ électrique de l'atmosphère avec la même sensibilité car elles ne sont pas parfaitement identiques. En effet, deux électrodes ont des travaux de sortie différents et donnent donc deux potentiels différents pour un même champ électrique. La notion de travail de sortie sera abordée de façon plus approfondie dans la section suivante. Une solution est de faire tourner ces électrodes dans le plan horizontal autour de l'axe vertical, ce qui moyennerait la composante horizontale du champ.

Le premier prototype de la nacelle possédait un moteur attaché au bras de l'électrode vertical visant à le faire tourner (figure 3). Cependant, la nacelle étant plus lourde que le ballon (3kg contre 2kg), le ballon aurait

tourné à sa place.

Le deuxième prototype abordé était de créer des ailettes permettant de faire tourner la nacelle autour de l'axe vertical (à la façon d'un moulin à vent). L'axe vertical est fixe et la nacelle jointe aux ailettes effectue un pivot autour du bras de l'électrode verticale. Néanmoins, ce dispositif suppose qu'il y ait un écoulement d'air suffisant à la rotation des ailettes au cours du vol, ce qui n'est pas assuré d'autant plus que la densité de l'air chute en altitude.

Cette rotation améliore la précision des mesures mais n'est pas indispensable. Nous nous sommes donc dirigés vers un prototype sans rotation de la nacelle.

4.3 LES ÉLECTRODES

4.3.1 • DES ÉLECTRODES EN ABS CONDUCTEUR

Nous avons dessiné les électrodes comme les schémas en annexe 2. Il s'agit de deux demi-sphères qui s'emboîtent à l'aide d'un rebord et se fixent grâce à des vis. Dans l'une des demi-sphères, une pochette taillée en biseau est prévue pour accueillir un accéléromètre.

Les électrodes doivent être fabriquées avec un matériau conducteur afin de mesurer le champ électrique de l'atmosphère. De l'acrylonitrile butadiène styrène conducteur (ou ABS conducteur) nous a été proposé. Cette potentielle solution était attrayante par sa facilité car l'ABS conducteur permet d'imprimer l'électrode directement à l'imprimante 3D. Nous avons alors testé la conductivité de l'ABS conducteur qui est constitué de plastique (acrylonitrile butadiène styrène) avec du graphite, en nous appuyant sur la relation suivante vraie pour un fil conducteur :

$$R = \frac{L}{\sigma S}$$

Nous avons réalisé des pavés droits en ABS conducteur de longueur et de section différentes dont nous avons mesuré la résistance avec un multimètre. Puis, nous avons tracé le rapport longueur/section en fonction de la résistance.

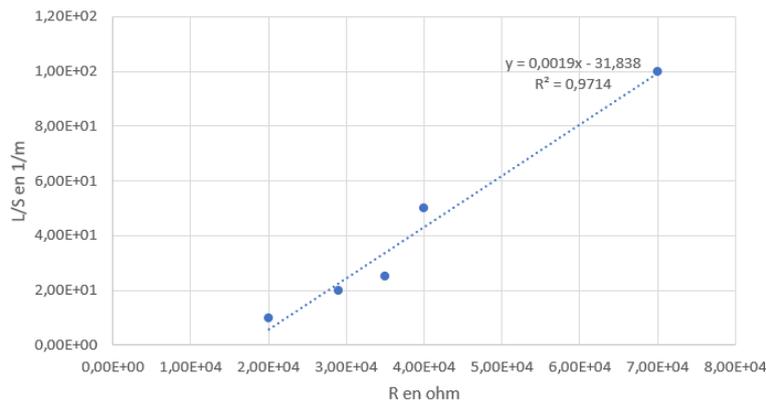


FIGURE 9 – Rapport L/S en fonction de la résistance R

Si le graphique obtenu semble être une droite, cette dernière ne passe pas par l'origine. Le graphique ne respecte donc pas la loi

$$R = \frac{L}{\sigma S}$$

Nous pouvons prédire ce résultat puisque l'ABS conducteur contient certes du graphite mais est essentiellement constitué d'ABS et donc de plastique, non conducteur. L'ordonnée à l'origine pourrait correspondre à la résistance du plastique d'où sa valeur élevée. Néanmoins, ce graphique nous permet d'estimer la résistance de l'ABS conducteur et de conclure que celui-ci n'est pas un bon conducteur. En effet, d'après le graphique, $\frac{1}{\sigma} = 1,9 \times 10^{-3} m \cdot S^{-1}$ soit $\sigma = 5,26 \times 10^2 S \cdot m^{-1}$. Or la conductivité électrique de la grande majorité des métaux est de l'ordre de $10^7 S \cdot m^{-1}$ c'est-à-dire 10^5 fois plus grand. Par exemple, le cuivre a une conductivité électrique de $5,96 \times 10^7 S \cdot m^{-1}$.

La solution que nous avons ensuite envisagé est celle consistant à couvrir l'électrode d'une peinture conductrice.

4.3.2 • DES ÉLECTRODES COUVERTES D'UNE PEINTURE MÉTALLIQUE

Les peintures conductrices vendues dans le commerce sont essentiellement de la peinture au graphite et de la peinture au nickel. Nous avons étudié les caractéristiques physiques et mécaniques de ces deux types de peintures afin de décider laquelle choisir. Les deux critères qui nous intéressent en particulier sont la conductivité et la plage de température sur laquelle le vernis reste conducteur.

Caractéristiques	Peinture au graphite 2	Peinture au nickel
Résistivité de surface (en Ω/m^2 pour $e = 50 \mu m$)	1000 - 2000	0.3 - 0.7
Plage de température	<300°C	-40 / +95 °C

Bien que le vernis au nickel présente une meilleure conductivité, il ne fonctionne pas en dessous de -40°C. Une peinture au graphite serait donc a priori appropriée. Néanmoins, établir une connexion électrique sur les électrodes pour mesurer leur potentiel nécessite une soudure. La soudure endommagerait à la fois le vernis conducteur et la sphère imprimée en plastique.

4.3.3 • DES ÉLECTRODES EN MÉTAL

La dernière solution que nous avons examinée est de faire usiner des demi-sphères creuses en aluminium par un prestataire extérieur. Faute de trouver un laboratoire de mécanique en capacité de fabriquer ces électrodes, nous avons établi un devis avec l'entreprise Delta Precis s'élevant à 3 900 euros. Trois perspectives sont envisageables : chercher un organisme pour sponsoriser cet achat, revoir le design des électrodes ou essayer une impression 3D en métal chez un autre prestataire.

4.3.4 • UNIFORMISATION DU POTENTIEL DES ÉLECTRODES

Les électrodes permettent de mesurer un potentiel V_i (différent pour chaque électrode i et égal au potentiel local de l'atmosphère) par rapport au potentiel de la nacelle qui joue le rôle de la terre. Le potentiel mesuré par une électrode inclut un terme correspondant au travail de sortie W_i du matériau de surface de l'électrode qui dépend de la nature de ce matériau et peut d'ailleurs être inhomogène sur une surface métallique ordinaire. Le champ électrique $E_{i,j}$ mesuré entre 2 électrodes i et j comporte ainsi un terme parasite dû à la différence des travaux de sortie des surfaces des 2 électrodes et s'exprime sous la forme :

$$E_{i,j} = \frac{V_i - V_j - \Delta W(i,j)}{d_{i,j}}$$

où $\Delta W_{i,j} = W_i - W_j$ est la différence des travaux de sortie des électrodes i et j et $d_{i,j}$ est la distance entre les électrodes i et j .

Le terme $\Delta W_{i,j}$ est minimisé en recouvrant les électrodes (comme la nacelle) d'une peinture au graphite dont le travail de sortie, beaucoup plus homogène que celui d'une surface métallique, est également assez bien reproductible d'une électrode à l'autre.

4.4 ASSEMBLAGE

Les bras de la nacelle sont des tuyaux en fibre de verre de longueur 1m, de rayon extérieur 10 mm, et de rayon intérieur 6 mm. Ils sont au coeur de l'assemblage puisqu'ils lient la nacelle aux électrodes. Ils contiennent également le câblage électrique permettant de mesurer le potentiel des électrodes et d'alimenter l'accéléromètre.

Deux problèmes se posent quant à la stabilité et aux positions des bras. Les bras horizontaux font 1m de longueur pour une nacelle de 35 cm de diamètre. Afin de minimiser l'effet de levier des bras, nous avons prévu d'accrocher l'extrémité des bras à la nacelle via des ficelles en nylon. De plus, le bras vertical risque de gêner la fixation du ballon à la nacelle. Les ficelles destinées à attacher le ballon à la nacelle pourraient s'enrouler autour de l'électrode et l'abîmer. Une solution est d'utiliser un anneau afin d'écarter les fils. Cet anneau est présenté sur la figure 12.

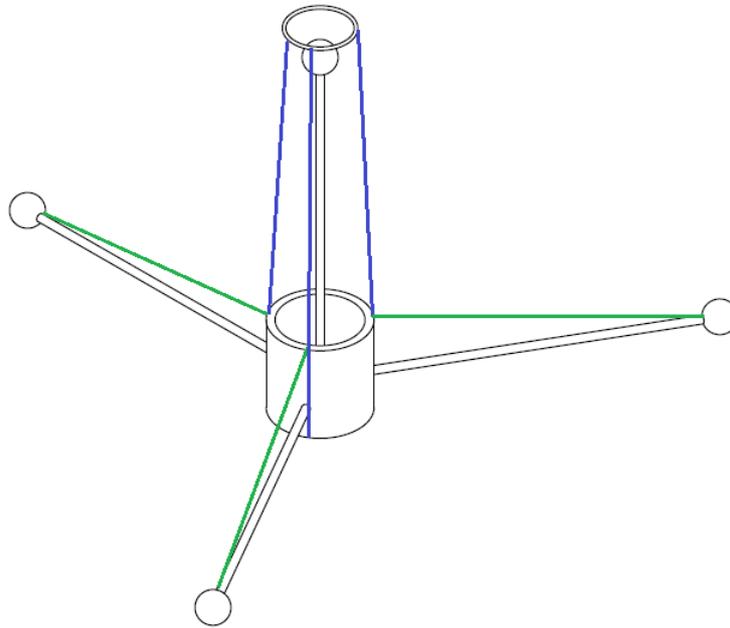


FIGURE 10 – Dispositif visant à protéger les bras (en vert les ficelles retenant les bras horizontaux et en bleu les ficelles reliées à l'anneau)

Faisons maintenant un bilan sur le poids de l'ensemble en l'absence de l'électronique.

Composant	Masse
Nacelle	860 g
Bras	90 g
électrode	estimée à 100 g
radio-sonde	150 g (dont 94g de piles)

TABLE 2 – Bilan sur les poids des composants du ballon

5

ELECTRONIQUE & INSTRUMENTATION

5.1 ORGANISATION DES MESURES

La principale problématique de ce projet consiste en la réalisation d'une instrumentation capable de :

1. s'adapter à l'étendue des potentiels électrostatiques de la stratosphère (jusqu'à plusieurs centaines de Volts) et à ses perturbations, notamment d'origine météorologiques.
2. réussir à discriminer des signaux de plus faible amplitude (résonances de Schumann, champs électrostatiques et électromagnétiques moyens et perturbations atmosphériques).
3. enfin traiter efficacement ces signaux numériquement avec une précision suffisante pour mettre en évidence les phénomènes susmentionnés.

L'électronique embarquée est donc constituée de trois étages :

1. Haute tension analogique (Préamplificateur)
2. Filtrage analogique basse tension
3. Traitement numérique basse tension

Si le voltage de l'étage HT est surtout déterminé par le potentiel extérieur, la basse tension correspond à une amplitude de $\pm 5V$. L'ensemble de l'électronique est alimenté par une batterie de même amplitude ($\pm 5V$) et le circuit HT *via* un convertisseur à gain contrôlé que nous avons fabriqué. Le contrôle du gain est primordial afin d'adapter l'alimentation du premier étage aux conditions électrostatiques extérieures.

L'organisation des mesures est la suivante :

Aux mesures du champ DC (0-3Hz) ainsi que celles correspondant aux Ultra Low Frequencies (ULF : 3Hz-45Hz, résonances de Schumann) et Very Low Frequencies (VLF : 45Hz - 2kHz, signaux associés aux éclairs), s'ajoutent :

1. Un magnétomètre qui permet d'obtenir l'orientation de la nacelle et donc, les composantes des champs AC et DC dans un repère lié à la Terre.
2. Une sonde GPS qui permet d'obtenir l'altitude de la nacelle ainsi que de suivre celle-ci pendant le vol par mesure de sécurité.
3. Des accéléromètres trois axes ajoutés sur les bras pour mesurer leurs vibrations parasites, qui peuvent gêner la mesure des résonances de Schumann.

L'ensemble de ces mesures ainsi que de l'électronique, sont détaillés dans la suite de cette partie.

5.1.1 • PRÉAMPLIFICATEUR

Le rôle du préamplificateur est principalement de mesurer le potentiel des électrodes sans le perturber. Chaque électrode est donc reliée par un câble coaxial (à l'intérieur du bras) à son préamplificateur correspondant.

Le préamplificateur nécessite tout d'abord une très forte impédance d'entrée [8], car la résistance de l'atmosphère R_p est elle aussi très élevée. Ainsi, si notre impédance d'entrée $R_{in} < R_p$ l'effet diviseur de tension des deux résistances va faire que la plus grande différence de potentiel sera mesurée à travers R_p et le signal mesuré

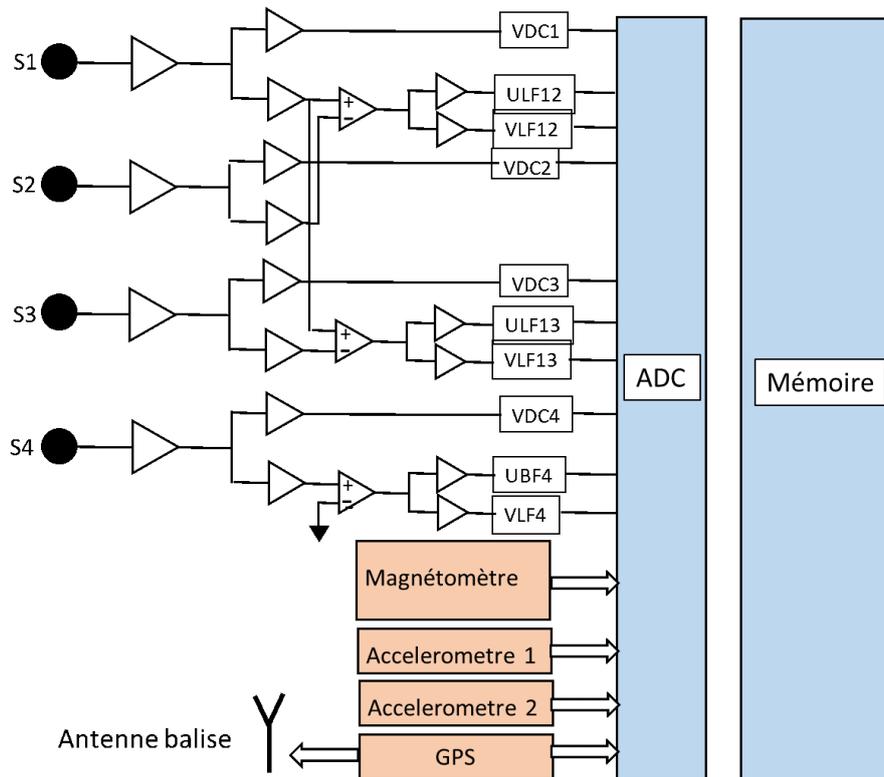


FIGURE 11 – Schéma de l'ensemble des mesures. Source : Jean-Jacques Berthelier

par l'électrode sera très atténué. Dans la littérature [2][8], on trouve des valeurs de l'ordre de $10^{12}\Omega$ pour la résistance de la gaine dans l'atmosphère entre 0 à 20 km.

Le préamplificateur est composé d'un amplificateur LMC6041, adapté à la mesure précise des potentiels faibles. Or, comme les champs électriques de l'atmosphère peuvent monter à plusieurs dizaines de kV/m, en particulier autour des orages, pour que l'amplificateur puisse suivre le potentiel de l'atmosphère, celui-ci est alimenté par des transistors "haute tension" qui permettent de faire flotter l'amplificateur entre +/- 150V.

Comme l'alimentation dans la nacelle est une simple batterie +5V/-5V, les besoins en haute tension des préamplificateurs sont fournis par un convertisseur LT->HT pour une tension de service HT autour de 150-200V. Ce convertisseur a été développé par nous même à l'aide de modules XP Power comme indiqué sur le schéma.

Le circuit préamplificateur doit aussi disposer d'un circuit de protection de l'amplificateur LMC6041 sous forme d'un *Command relay*. Celui-ci permet d'introduire une résistance (R_{10}) de $5G\Omega$ pour atténuer le potentiel de l'électrode lorsque celle-ci dépasse la limite de l'amplificateur.

Un deuxième circuit est mis en place pour réaliser les expériences de relaxation (*Cathode $Z+$ $Z-$*), en déplaçant le potentiel de l'électrode 4 de son potentiel de repos de manière périodique (environ toutes les 5 secondes).

Le préamplificateur a donc deux sorties, DC et AC (ULF+VLF). Deux filtres en sortie relient le potentiel de l'électrode au second étage de filtrage analogique en privilégiant les bandes de fréquences étudiées, ayant un gain statique d'un vingtième afin d'assurer le traitement analogique en basse tension et permettant d'éviter des phénomènes parasites aux fréquences de coupure et uniformiser le traitement à l'issue. Les détails des filtres du préamplificateur, leur évolutions suite aux problèmes rencontrés ainsi que le détail des composants sont en

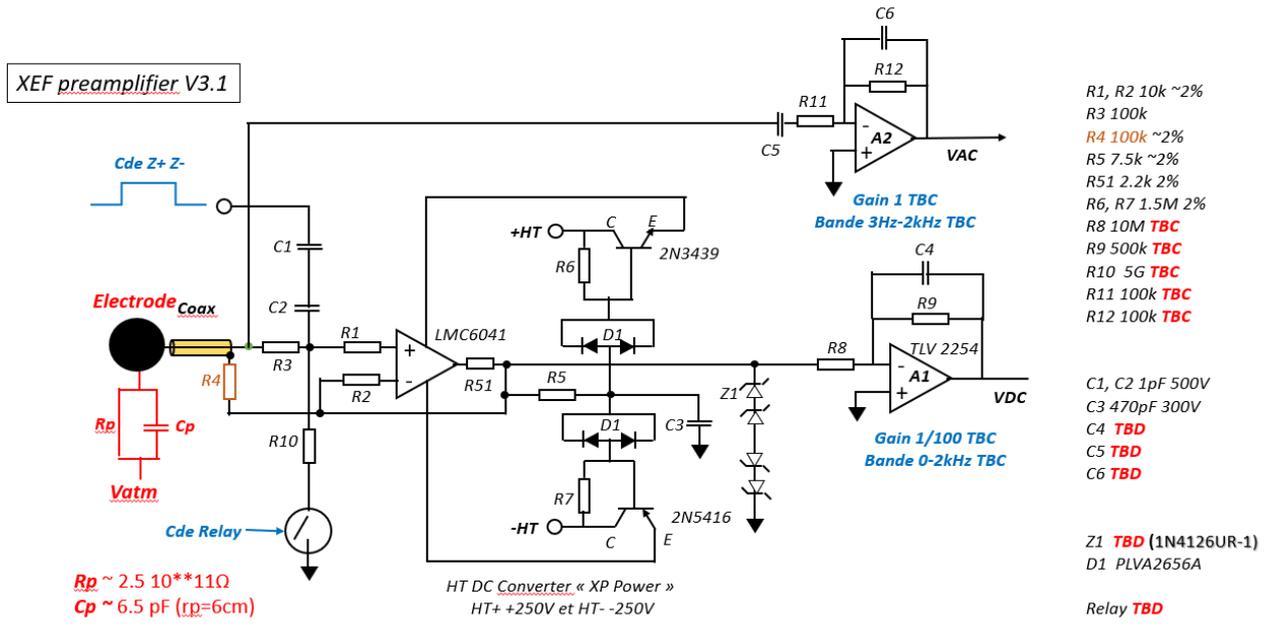


FIGURE 12 – Schéma du préamplificateur. Source : Jean-Jacques Berthelie

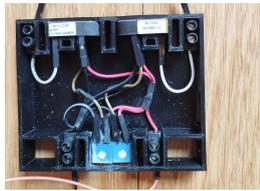


FIGURE 13 – Le convertisseur 5V/200V

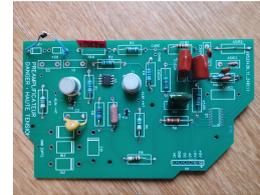


FIGURE 14 – Le circuit imprimé du préamplificateur

Annexe 3.

5.1.2 • FILTRAGE

L'objectif de l'expérience étant de connaître les potentiels et les valeurs de champs électrostatiques, on doit, en plus de mesurer individuellement les potentiels des électrodes, les comparer entre eux afin d'isoler la valeur des champs.

Le filtrage se situant entre le préamplificateur et le convertisseur analogique-numérique (ADC), il doit donc comporter deux grands types de sorties : les potentiels "bruts", étudiés en courant continu (sorties DC) et les potentiels différentiels (sorties tensions variables, ULF et VLF), comme indiqué ci-dessous :

Les trois bandes de fréquences étudiées sont :

- DC : courant continu, correspondant dans la pratique à la bande $\leq 3\text{Hz}$;
- ULF ($3\text{Hz} \leq f \leq 45\text{Hz}$) pour isoler les résonances de Schumann ;
- VLF ($45\text{Hz} \leq f \leq 2\text{kHz}$) pour le reste des perturbations atmosphériques.

Plusieurs filtres ont été utilisés pour cela :

- Des filtres A3 : Passe Bas 3Hz
- Des filtres A4 : Soustracteurs

- Des filtres A5 : Passe Bande 3Hz - 45Hz
- Des filtres A7 : Passe Bas 2kHz

Ci-joint en **Figure 17**, un schéma du filtrage, qui reprends les filtres A1 (<3Hz) et A2 (3Hz-20kHz) du préamplificateur, en plus du filtrage basse tension.

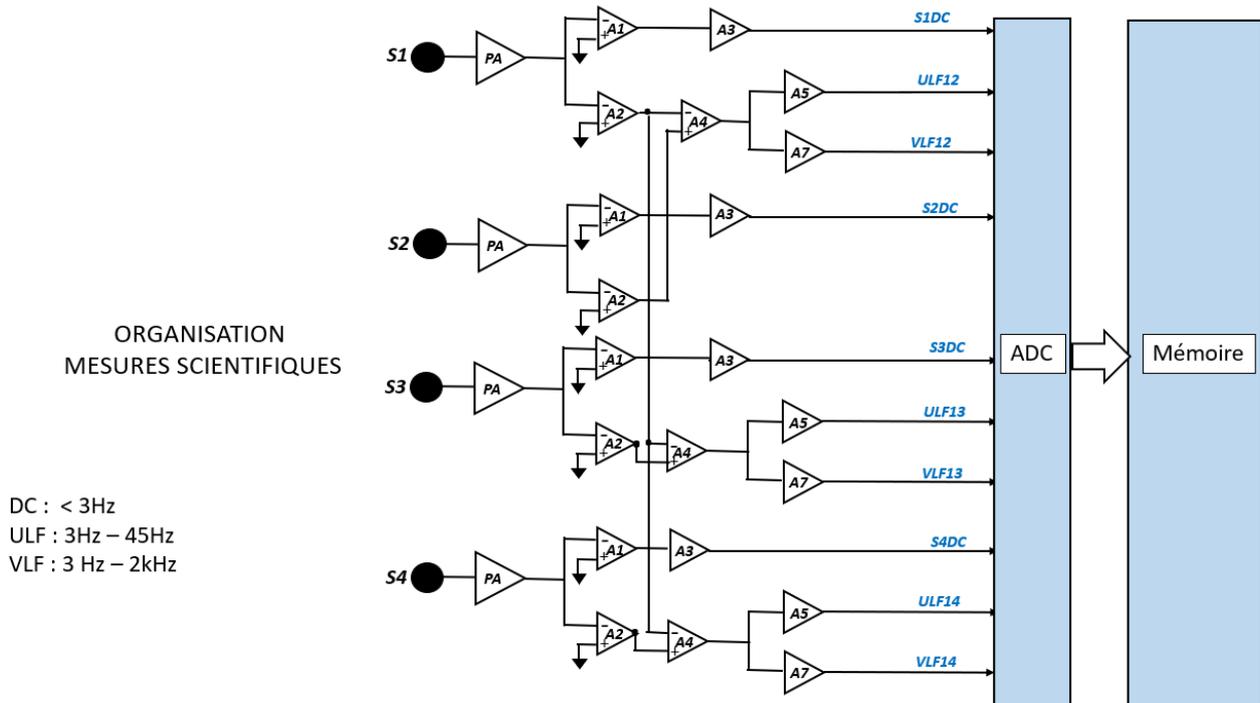


FIGURE 15 – Schéma de la ch. Mis à jour, d’après Jean-Jacques Berthelier

Il a été décidé d’utiliser, dans la mesure du possible, des filtres d’ordre 2 de Sallen Key, conseillés par Jean-Jacques Berthelier [9]. De plus, pour simplifier le développement des circuits imprimés (Printed Circuit Board en anglais, que nous abrègerons en PCB), l’utilisation de quads, regroupant à chaque fois quatre filtres, a été particulièrement utile.

Une attention toute particulière a été portée sur les montages soustracteurs (désignés A4 sur le schéma). En effet, en temps calme (autrement dit, seuls les champs électromagnétiques constants et les résonances de Schumann devraient être observés), la tension variable nominale entre deux électrodes est d’amplitude 200µV, mais en cas de gros temps (c’est à dire perturbé, notamment en cas d’orage proche) cette valeur se rapproche davantage de 10mV. Afin de pouvoir étudier précisément ces deux situations (pouvant intervenir au cours d’un même vol), la conception d’un soustracteur à gain variable était donc nécessaire. Trois pistes ont été étudiées (circuit d’amplificateurs en régime de saturation, commutation active par switch commandé avec l’enveloppe du signal, commutation passive par un montage non-inverseur de diodes en parallèles), pour des raisons de simplicité et de performances de circuits intégrés (notamment des multiplieurs nécessaires pour le système de commutation active), le système de commutation passive a été choisie.

Le système sature (5V) pour le cas de gros temps et fait correspondre une amplitude de 4,5V au cas de temps calme. Bien que l’on perde 0,5V de balayage en précision de mesure, cette solution est considérablement préférable à un cas de gain constant.

Les détails des filtres ainsi que les choix des composants sont indiqués en **Annexe 4**.

Après vérification, le filtrage fonctionne comme prévu pour les sorties directes et différentielles pour les

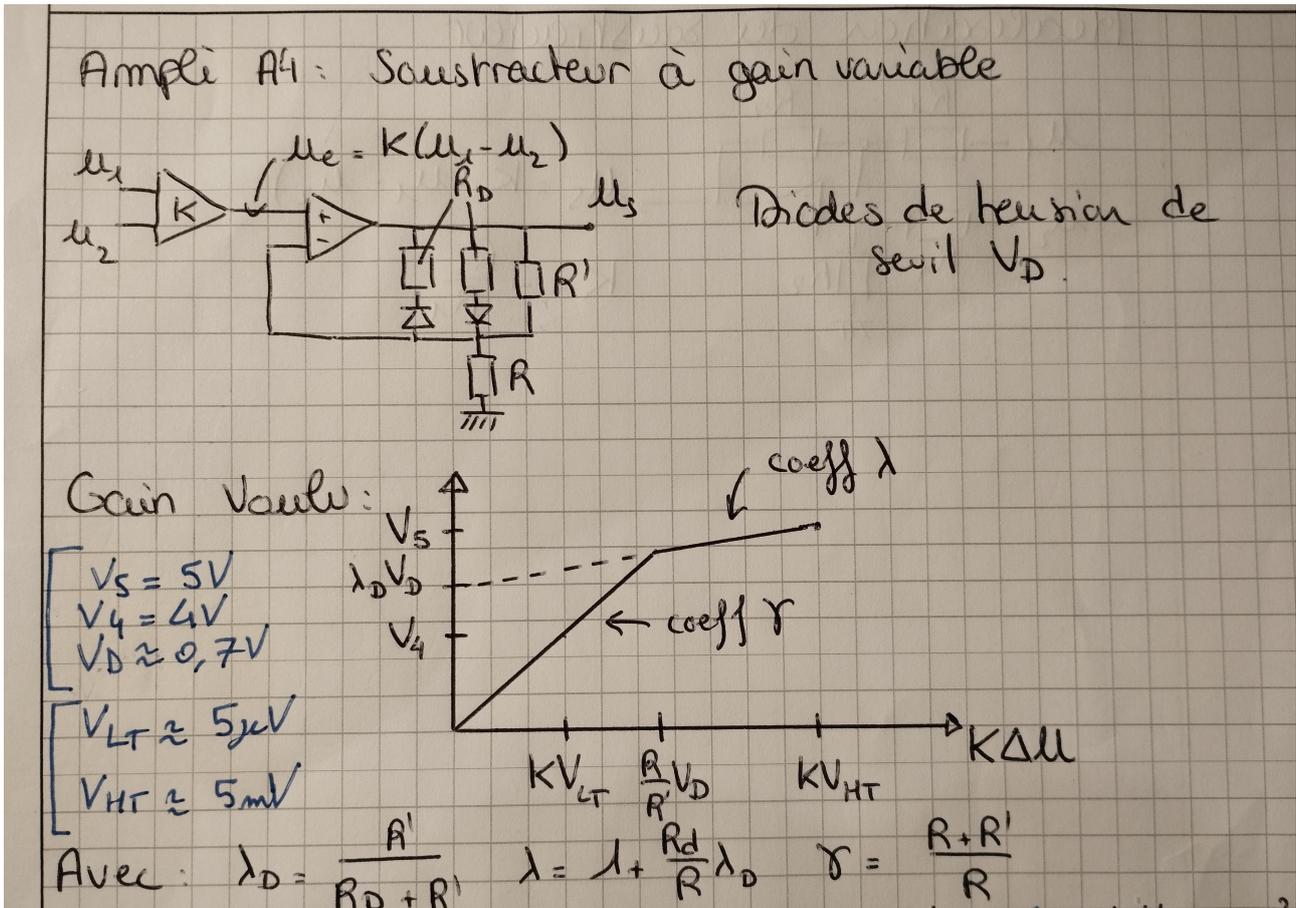


FIGURE 16 – Schéma du soustracteur à gain variable

mesures des champs à proprement parler. Grande dynamique de tensions donc besoin d'un système de gain variable pour ne pas faire saturer les filtres et profiter le plus possible de la plage $-5V/+5V$ disponible pour les amplis.

5.2 SIGNAUX NUMÉRIQUES ET STOCKAGE

Une fois les signaux récupérés puis filtrés par l'électronique analogique, se pose la question de leur traitement et de leur stockage. En outre, d'autres composants ont aussi besoin d'être interfacés : des accéléromètres, ainsi qu'un magnétomètre et une puce GPS. Tout ceci explique donc la nécessité d'une électronique numérique et en particulier d'un microprocesseur (cf figure ci-dessous)

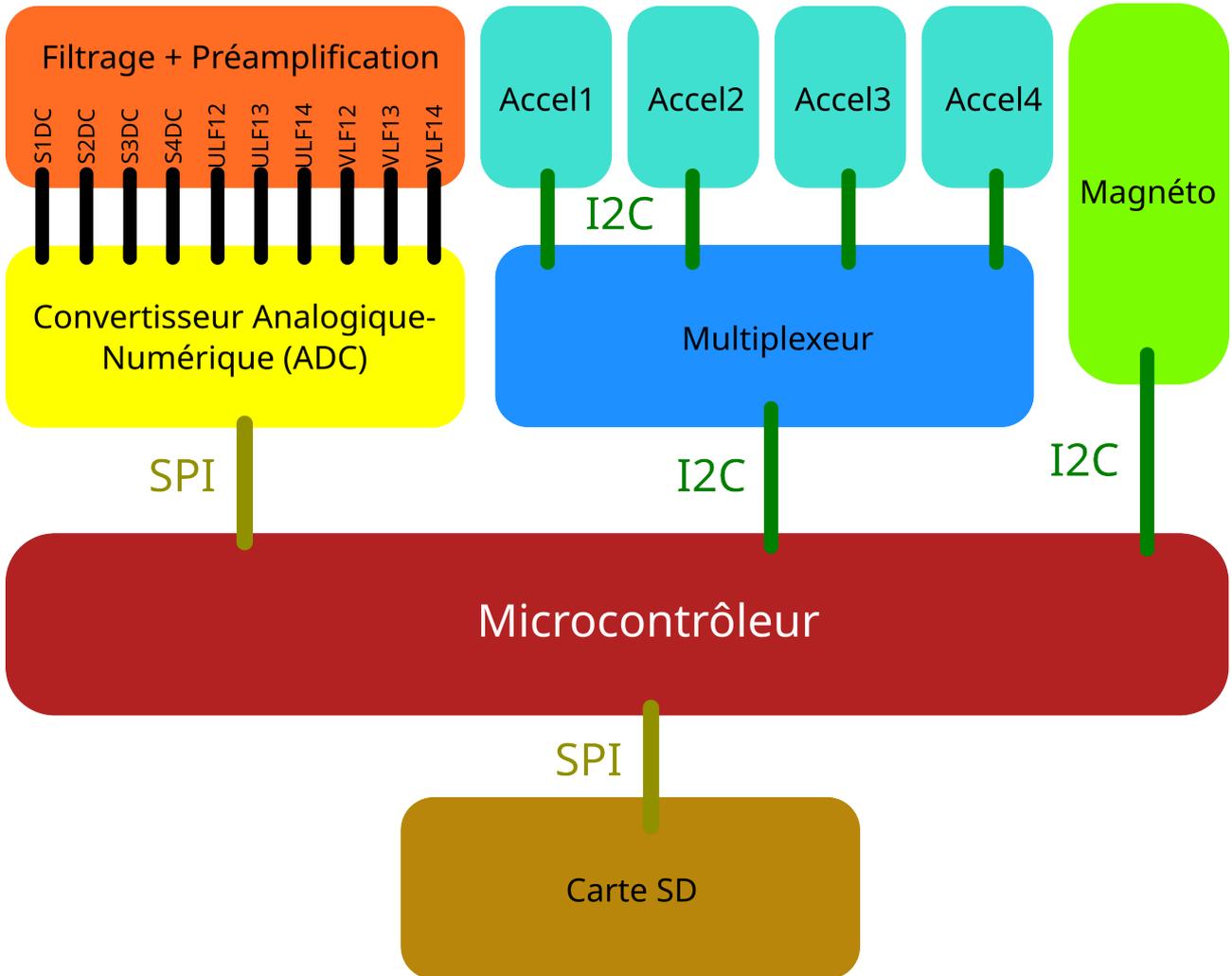


FIGURE 17 – Schéma de la chaîne d'acquisition

5.2.1 • CONVERSION ANALOGIQUE-NUMÉRIQUE

Intéressons nous d'abord aux signaux analogiques provenant des électrodes : ces signaux sont amplifiés, puis filtrés par gammes de fréquences. Pour que le microcontrôleur puisse les traiter, il faut d'abord les échantillonner grâce à un Convertisseur Analogique-Numérique (Analog-Digital Converter en anglais, que nous abrègerons en ADC).

Pour être plus précis, tous les signaux sortant du filtrage ne doivent pas être échantillonnés à la même fréquence. Le tableau ci-dessous donne d'ailleurs pour chaque voie la fréquence maximale f_{max} , et la fréquence

d'échantillonnage minimaux (f_{ech}) respectant le critère de Shannon

Voie	f_{max}	f_{ech}
S1DC	2kHz	4 kHz
S2DC	2kHz	4 kHz
S3DC	2kHz	4 kHz
S4DC	2kHz	4 kHz
ULF12	100Hz	0.2 kHz
ULF13	100Hz	0.2 kHz
ULF14	100Hz	0.2 kHz
VLF12	100Hz	0.2 kHz
VLF13	100Hz	0.2 kHz
VLF14	100Hz	0.2 kHz

TABLE 3 – Contraintes en fréquence en sortie du filtrage

Essayons de minorer la fréquence d'échantillonnage de notre ADC : le tableau précédent nous dit qu'il doit effectuer au moins $200 \times 7 + 4000 \times 3 = 13400$ conversions par seconde. En supposant que l'ADC travaille en continu (en qu'il ne puisse pas échantillonner plusieurs voies en même temps, ce qui est le cas pour tous les ADC testés), on obtient un temps d'acquisition majoré par $75 \mu s$ (et ce majorant est très optimiste).

Une autre grandeur à considérer est la précision de la mesure : un ADC opère entre 0 et une tension de référence V_{REF} , et subdivise l'intervalle $[0, V_{REF}]$ en $2^{n_{bits}}$ morceaux de même largeur $\Delta V = V_{REF} \cdot 2^{-n_{bits}}$. Cette largeur ΔV est appelée le *quantum* de l'ADC, et donne la précision de l'échantillonnage. On donne couramment la précision d'un ADC par le nombre de bits n_{bits} que contient le résultat de la mesure. Jean-Jacques Berthelie, qui nous a encadré pour ce PSC, nous a fixé comme objectif une résolution de 16 bits (en pouvant descendre à 14 bits éventuellement).

Nous voulons donc un ADC

- avec au moins 10 entrées
- **rapide**, avec un temps de mesure inférieur à $75 \mu s$ (dans une majoration très optimiste)
- **précis**, avec une précision supérieure à 14 bits

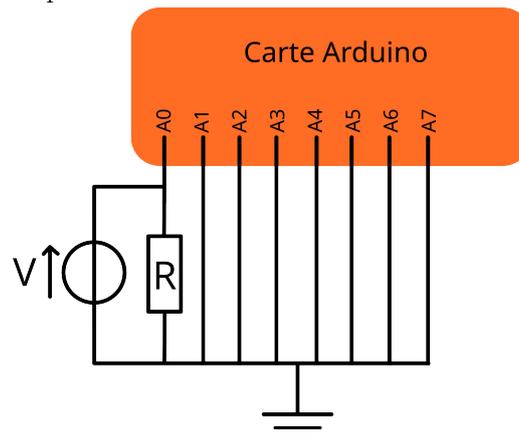


FIGURE 18 – Dispositif expérimental de test de l'ADC

La résistance R a pour valeur $1 \text{ k}\Omega$, la source de tension V est un générateur basse fréquence Keysight 33220A imposant une tension oscillant à 1 kHz entre 1 V et 3 V . Les 8 voies modélisent les difficultés liées à l'échantillonnage de multiples signaux. Même si nous visons 3 voies échantillonnées à 4 kHz et 7 voies à $0,2 \text{ kHz}$, ceci est un premier montage jouet

Nous avons d'abord travaillé avec un microcontrôleur **Arduino Mega 2560 Rev 3** [15], et son ADC interne **ATmega2560**. Il possède 16 entrées analogiques, ce qui est suffisant pour notre utilisation. Sa précision est de 10 bits, ce qui est insuffisant pour nos mesures. Quant au temps d'acquisition, il est de au moins 100 μs d'après [16]. Pour le réduire, nous nous sommes renseignés sur le fonctionnement de l'ADC interne à notre carte Arduino, et nous nous sommes intéressés au registre **ADCSRA**[17] de cet ADC (**ATmega2560**).

Numéro du bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Fonction	ADEN	ADSC	ADFR	ADIF	ADIE	ADPS[2]	ADPS[1]	ADPS[0]

TABLE 4 – Table du registre ADCSRA

Dans ce registre ADCSRA, nous avons utilisé les bits ADPS (pour *ADC Prescaler Select*). Si on note f_{ADC} la fréquence de fonctionnement de l'ADC, et f_{in} la fréquence du microcontrôleur, on a

$$f_{ADC} = \frac{f_{in}}{n(ADPS)}$$

ADPS	ADPS[2]	ADPS[1]	ADPS[0]	n(ADPS)
0	0	0	0	2
1	0	0	1	2
2	0	1	0	4
3	0	1	1	8
4	1	0	0	16
5	1	0	1	32
6	1	1	0	64
7	1	1	1	128

TABLE 5 – Table de l'ADPS

Initialement, le registre ADCSRA avait pour valeur 151 (ADPS = 7). En changeant sa valeur à 146 (ADPS = 2), nous avons réduit le temps d'acquisition de l'ADC de 130 μs à 26 μs (*cf infra*).

Nous avons donc utilisé le montage suivant pour tester ces deux configurations de l'ADC (*cf* Figure 19). Les résultats sont donnés en Figure 20 et le code en Annexe 8.

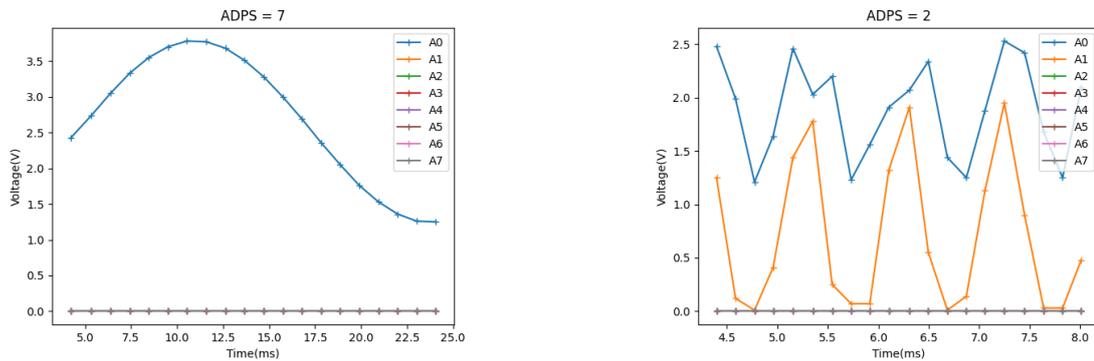


FIGURE 19 – Echantillonnage avec un ATMEGA 2560

Que dire de ces courbes ?

- Pour le **temps d'acquisition**, le réglage ADPS = 7 est insuffisant : les huit voies mettent plus d'une milliseconde à être échantillonnées. Notre temps d'acquisition maximal étant de 75 μs , cela ne peut

pas convenir. En revanche, pour le réglage $ADPS = 2$, les huit voies mettent moins de $200 \mu s$ pour être échantillonnées, ce qui donne un temps d'acquisition de $26 \mu s$, ce qui est satisfaisant.

L'ADC interne à la carte Arduino Mega est donc insatisfaisant, d'une part puisque sa précision nominale (10 bits) est trop faible, et d'autre part parce qu'il est incapable de satisfaire à la fois la contrainte de temps d'acquisition et la contrainte de précision de la mesure.

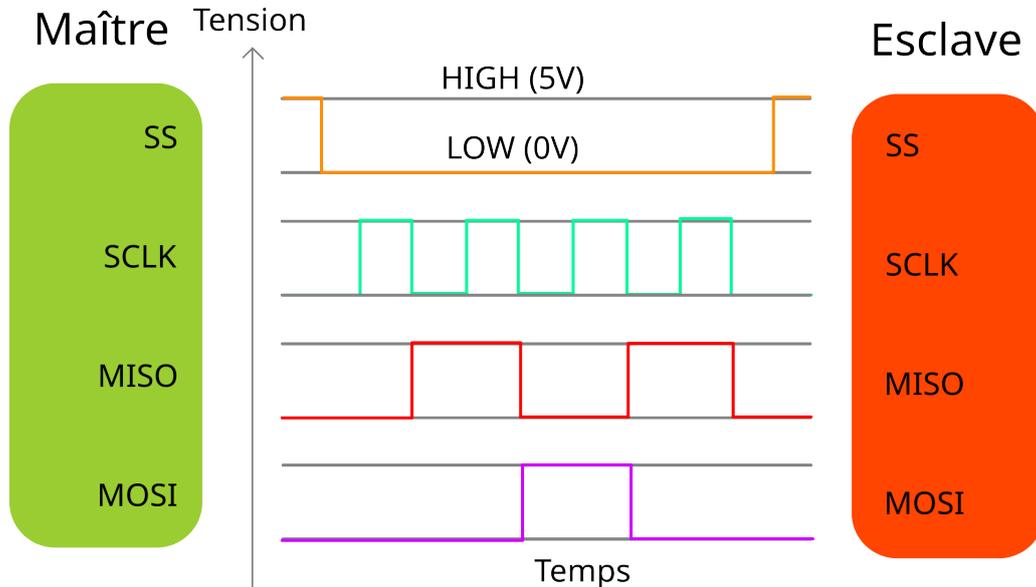


FIGURE 20 – Schema du protocole SPI

Ce schéma correspond aux paramètres $CPOL = 0$, $CPHA = 0$ (les plus courants). Dans cet exemple, les bits transmis sur MISO sont 0101 et 0010 sur MOSI.

Nous avons donc opté pour une seconde classe d'ADC, des composants externes à notre carte Arduino communiquant avec celle-ci grâce au protocole **SPI**. SPI consiste à partager 4 canaux entre un maître (ici la carte Arduino) et l'esclave (ici le microcontrôleur). Le maître fournit une horloge (canal SCLK), envoie des informations à l'esclave (canal Master Out Slave In), et réciproquement (canal Master In Slave Out). A chaque bord descendant de l'horloge, l'esclave et le maître modifient éventuellement l'état (HIGH ou LOW) de leur canal *Out*, et chaque bord montant de l'horloge, le maître et l'esclave lisent éventuellement l'état (HIGH ou LOW) de leur canal *In*. Il y a une quatrième voie, Slave Select, qui est initialement à l'état HIGH, et que le maître passe à l'état LOW pour commencer la transaction avec l'esclave (et repasse en HIGH une fois la transaction terminée).

Quels sont les avantages de ce protocole ?

1. sa **simplicité** : la librairie SPI d'Arduino IDE permet de communiquer simplement avec l'ADC
2. sa **rapidité** : en théorie, la fréquence de l'horloge peut atteindre la moitié de celle du microcontrôleur, soit $\frac{16MHz}{2} = 8MHz$. Ainsi, la transmission de 16 bits (un nombre raisonnable de bits pour une mesure d'un ADC précis) met au moins $2\mu s$. En prenant en compte le temps mis au microcontrôleur pour donner les instructions à l'ADC, la fréquence maximale réelle de l'horloge tolérée par l'ADC (inférieure à 8 MHz en réalité), on obtient des temps d'acquisition de l'ordre de $10 \mu s$.

Pour un premier prototypage, nous avons choisi un ADC MCP3208 [18]. Sa fréquence d'échantillonnage nominale maximale est de 100 kHz, et sa précision est de 12 bits

Nous avons testé son efficacité avec le même montage que précédemment, et avons obtenu les résultats suivants (cf Figure 22, et code en Annexe 7)

— le temps d'acquisition est de $390 \mu s$ pour huit mesures, soit environ **$49 \mu s$ par mesure**. Cette valeur est

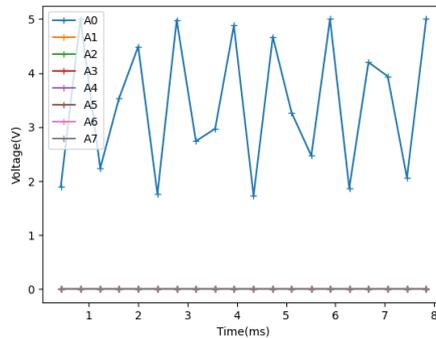


FIGURE 21 – Echantillonnage avec un MCP3208

cinq fois supérieure à la valeur nominale, ce qui peut s’expliquer par le temps que met le microcontrôleur à stocker les mesures en mémoire, et à réagir aux messages de l’ADC (cf Figure 23). Cependant, ce temps est inférieur à notre borne de 75 μ s, ce qui est satisfaisant.

- pour la **précision**, même si une calibration semble nécessaire (la tension oscillant entre 1V et 3V), on observe que la valeur de A0 n’influe pas sur celle de A1, ce qui est mieux que pour l’ATMega 2560 avec ADPS = 2
- cet ADC a une précision de 12 bits, ce qui est supérieur aux 10 bits de l’ATMega 2560, mais en dessous des 16 bits visés initialement.

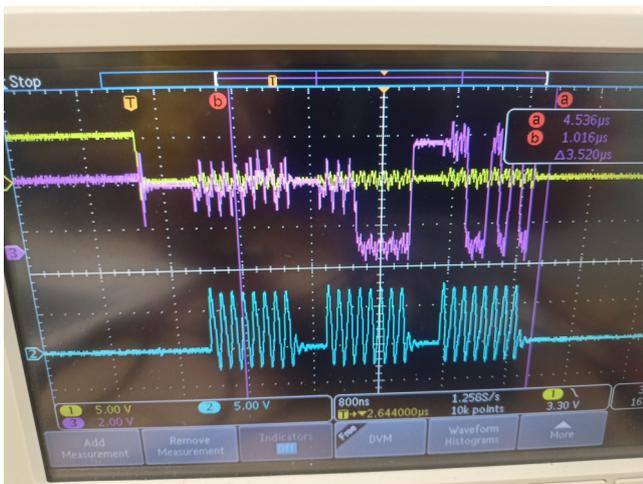


FIGURE 22 – Visualisation à l’oscilloscope d’une transaction SPI

En jaune, on a la tension du canal Slave Select (qui passe de 5V à 0V au début de la transaction. En bleu, l’horloge SCLK. En violet, la ligne Master In Slave Out.

On observe qu’entre les salves de 8 battements d’horloge, le microcontrôleur stocke dans une variable statique la valeur des 8 premiers bits reçus, et la transaction est interrompue pour 0,5 μ s. Ce type de délais explique en partie que le temps d’acquisition réel soit supérieur au temps d’acquisition nominal.

Nous nous sommes donc intéressés à un ADC plus précis (et tant qu’à faire plus rapide) : l’ADS8686S de Texas Instruments [19]. Cet ADC permet en théorie un temps d’acquisition de 1 μ s (plus en réalité lorsqu’on l’utilise avec une carte Arduino Mega), et une précision de 16 bits. Nous avons rencontré deux problèmes essentiels dans son utilisation

1. Cet ADC est fourni uniquement sous forme de Composant Monté en Surface (CMS), à souder donc sur un circuit imprimé dédié. Nous avons donc été retardés par la commande et la conception du dit circuit imprimé, la soudure difficile du composant à l'aide d'un four à refusion (cf Partie 7, et Figure 24), pour *in fine* ne pas réussir à faire fonctionner le composant
2. M. Alexis Jeandet, électricien au LPP, nous a fait remarquer que les circuits de filtrage réalisés de façon baroque dans nos circuits imprimés entraînaient *de toute façon* une perte de précision de notre mesure en dessous de 16 bits, ce qui rendait exagérée l'utilisation de cet ADC de haute précision.

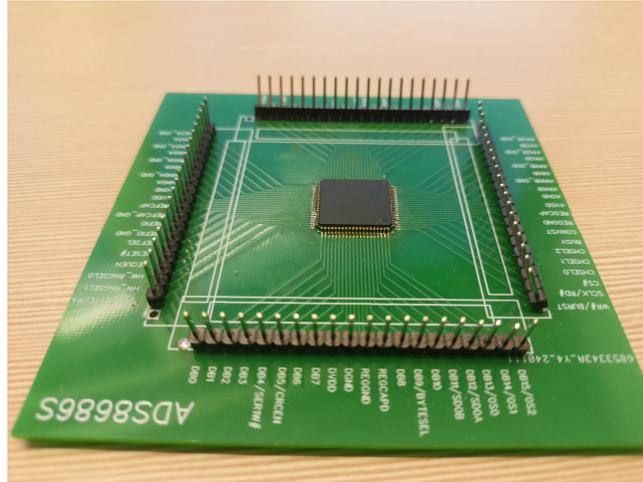


FIGURE 23 – Circuit imprimé et ADS8686S

Nous avons donc abandonné l'idée d'utiliser un tel ADC.

5.2.2 • STOCKAGE SUR CARTE SD

Une fois échantillonnées par l'ADC et transmises au microcontrôleur, les données doivent être stockées quelque part, et conservées pendant toute la durée du vol.

Une première idée serait de faire un grand tableau dans la mémoire vive du microcontrôleur, et de le remplir pendant le vol. Cependant, avec cette méthode, les seules mesures des potentiels par l'ADC (cf partie précédente) prendraient $13400 \times 2 \text{octets} \approx 2,7 \text{ko}$. Une carte Arduino possédant environ 8 ko de SRAM, cela signifie que la mémoire dynamique de la carte serait saturée avant trois minutes (et sans se préoccuper ni de la datation des mesures, ni des autres capteurs). Cette option est donc trop naïve.

Une deuxième idée serait d'utiliser un lecteur de carte SD interfaçable par SPI à la carte Arduino. Une carte SD de plusieurs Go permettrait de conserver les mesures jusqu'à l'atterrissage. Les mesures seraient écrites sur la carte SD au fur et à mesure pendant le vol. Le problème de cette méthode est le temps d'écriture sur la carte SD, au moins 1,9 ms pour écrire 8 flottants. Cela signifie qu'une mesure met six fois plus de temps à être échantillonnée qu'à être écrite sur la carte SD, autrement dit, seul 17% du temps serait consacré à la prise de mesures.

Une troisième idée serait de conserver la carte SD, et de construire, en mémoire, un tableau de flottants, dont chaque ligne contient les mesures à un certain instant. A chaque itération de la boucle, le programme remplit une nouvelle ligne du tableau. Lorsque la dernière ligne est remplie, toutes les valeurs du tableau sont écrites d'un coup sur la carte SD.

Cependant, le fait de procéder avec des *buffers* a ses limites, car la taille du buffer est limitée par la mémoire vive (RAM) du microcontrôleur, sur laquelle sont stockées les variables. Dans une Arduino Mega 2560 [15],

t(ms)	VA1	...	VMag
153	0.239 1	...	2.5e-5
427	0.765	...	-1.2e-5

TABLE 6 – Exemple de buffer

il y a 8 ko de RAM, ce qui permet de faire, pour un tableau de 8 colonnes (temps + 7 voies le plus souvent échantillonnées), au plus 220 lignes (on suppose que les tensions et le temps sont écrits sous forme de flottants). De plus, le temps d’écriture sur la carte SD ne diminue pas sensiblement avec cette méthode, il est juste regroupé lorsque le buffer est recopié sur la carte SD.

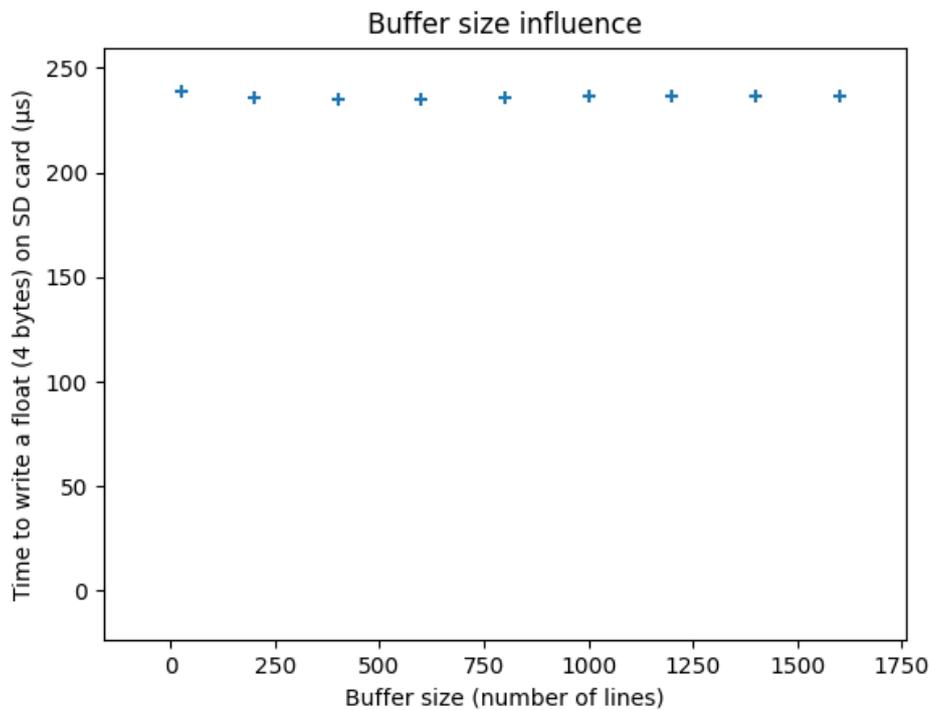


FIGURE 24 – Influence de la taille du buffer sur la vitesse d’écriture
Le microcontrôleur est un Arduino 2560 Mega, et la carte SD est une LSMICRO128GU3.

Nous observons que, peu importe la taille du buffer, la vitesse d’écriture plafonne à 1 mesure toutes les 240µs.

Nous n’avons pas eu le temps de tester d’autres idées, mais M. Alexis Jeandet nous a suggéré des perspectives d’amélioration, telles que l’utilisation d’un microcontrôleur plus adapté, par exemple de la série STM32H7[20]. Cela aurait plusieurs avantages

- un ADC **interne**, précis (16 bits), rapide (temps d’acquisition optimal de 0.36 µs) et avec 36 entrées analogiques ;
- un lecteur de carte SD interne, ce qui permet une **écriture plus rapide** grâce au Direct Memory Access (DMA)

- un ADC interne, avec une horloge synchronisée sur l'horloge interne du microcontrôleur (donc **stable au cours du temps**)

Précisons ces deux derniers points : une manière différente d'écrire les mesures sur la carte SD serait de configurer l'ADC pour qu'il écrive directement les mesures sur cette dernière (grâce au DMA), sans même créer de système de fichiers (ceci causait des pertes de temps dans l'écriture avec la librairie SD de Arduino). Le problème réside alors dans l'horodatation des données : comment retrouver la date de chaque mesure (nécessaire pour la rattacher à son altitude) ? Sachant que l'horloge de l'ADC (d'après le point précédent) dérive peu au cours du temps, il suffirait par exemple d'écrire sur la carte SD au milieu des données l'heure réelle à une certaine périodicité (toutes les cinq minutes par exemple).

Pour obtenir cette heure réelle, il est possible d'utiliser une Real Time Clock, composant contenu dans certains microcontrôleurs (dans le STM32H7 mais pas dans l'Arduino Mega par exemple). Ce composant doit être alimenté par une petite pile pour garder l'heure même lorsque le microcontrôleur est éteint.

Tout cela reste encore à développer et à préciser, et nous laissons ce travail aux éventuels élèves de la promotion X2023 qui reprendront ce projet.

5.2.3 • MAGNÉTOMÈTRE

En première approximation, il est possible de considérer le champ magnétique terrestre comme celui d'un dipôle magnétique de moment magnétique \vec{m} centré sur l'axe formé par le pôle Nord et le pôle Sud magnétiques de la Terre et traversé par un courant I . La loi de Biot et Savart nous permet alors d'obtenir le champ magnétique en tout point à l'extérieur de ce dipôle à distance r .

$$B(\vec{r}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{d\vec{l}(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

Pour $r \gg r'$ On peut appliquer un développement limité et obtenir la formule du champ magnétique pour tout point dans l'atmosphère :

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi R^3} [3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r} - \vec{m}]$$

On peut donc en particulier faire l'approximation que le vecteur \mathbf{B} reste constant lors du trajet de la nacelle, qui sera au plus d'une trentaine de kilomètres dans l'atmosphère.

Dans le repère terrestre géographique, le sens et la direction du champ magnétique sont définis par deux angles, l'inclinaison \mathbf{I} et la déclinaison \mathbf{D} , angle entre le nord géographique et le nord magnétique.

$$B = B_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos(I) \cos(D) \\ \cos(I) \sin(D) \\ \sin(I) \end{bmatrix} \quad \text{Champ magnétique dans le repère terrestre} \quad (2)$$

Connaître l'orientation de la nacelle En mesurant le champ magnétique dans la nacelle, on peut connaître son orientation par rapport au nord magnétique, puis, en connaissant la déclinaison D , on obtient l'orientation dans le repère terrestre.

On fait ici une deuxième approximation, que l'axe Z reste vertical. Ceci est suffisamment vrai lorsque la nacelle est bien équilibrée et qu'elle monte régulièrement c'est-à-dire après que les mouvements erratiques au départ aient été suffisamment atténués. D'après des vols expérimentaux, au dessus de 1 ou 2 km et, bien sûr, en l'absence de turbulences dans l'atmosphère.

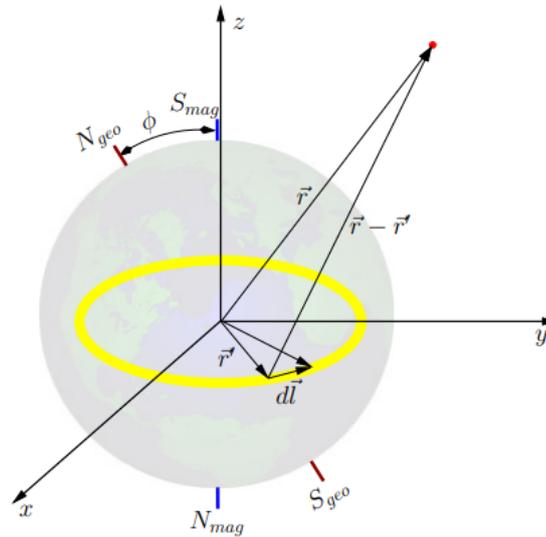
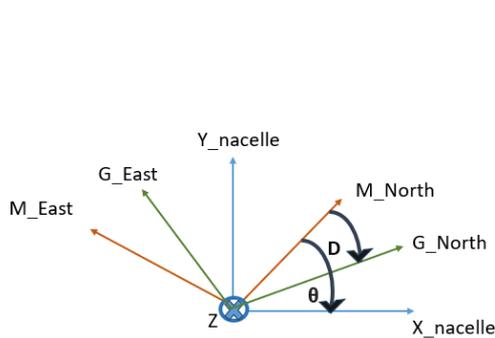
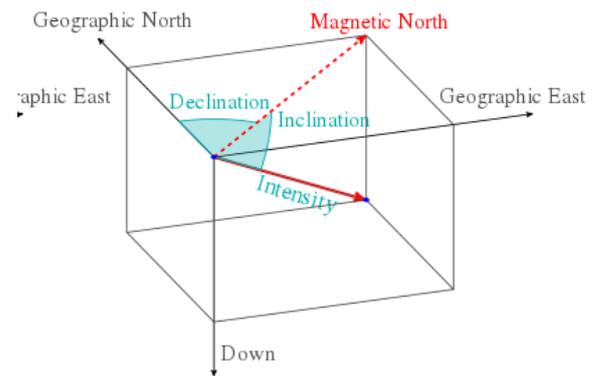


FIGURE 25 – Champ magnétique terrestre dans l’approximation $r \gg r'$ (Source : [14])



(a) Mesure des angles et repère de la nacelle



(b) Déclinaison et Inclinaison (Source : Wikipédia Commons)

On utilise le magnétomètre pour mesurer l’angle entre l’axe X de notre magnétomètre (donc dans le repère de la nacelle), et le Nord Magnétique que nous noterons θ , obtenu par le rapport entre les composantes du champ magnétique selon X et Y mesurées par le magnétomètre. En connaissant l’inclinaison D au niveau de notre position sur Terre, récupérable sur le site officiel des agences météorologiques on obtient l’orientation de la nacelle :

La connaissance de

$$\theta - D \pmod{2\pi} \tag{3}$$

permet de connaître l’orientation de la nacelle.

Quel magnétomètre utiliser ? On utilise ici un composant GY-511, contenant un LSM303DLHC facilement interfaçable avec Arduino par un Bus I2C. Il contient un magnétomètre et un ADC qui mesure les trois composantes du champ magnétique. Du côté de la fréquence d’échantillonnage, nous voulons avoir une mesure de l’orientation de la nacelle toutes les 60 ms approximativement. D’après nos tests, le LSM303DLHC met environ 2 ms à mesurer les trois composantes du champ magnétique, ce qui est suffisant. De surcroît, des

optimisations en travaillant dans les registres d'acquisition et de transmission I2C sont sûrement possibles.

La norme du champ magnétique étant constante, la représentation des points mesurés sur un graphe en 3D devrait donner une sphère parfaite, cependant, on observe souvent que cela n'est pas le cas : on obtient souvent une forme ellipsoïdale, non centrée en 0. Il faut ainsi calibrer le magnétomètre.

Sources de distorsion

1. Les **erreurs d'instrumentation** dépendent de chaque appareil de mesure et peuvent se présenter sous différentes formes. [12] Il y a par exemple un facteur d'échelle, qui peut être représenté par une matrice 3x3 diagonale :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Il y a aussi les problèmes de non orthogonalité des axes du capteur, modélisées sous la forme d'une matrice de changement de base :

$$\mathbf{N} = [\mathbf{n}_x \quad \mathbf{n}_y \quad \mathbf{n}_z] \quad (5)$$

Et enfin un offset :

$$\mathbf{b}_{so} = [b_{so_x} \quad b_{so_y} \quad b_{so_z}]^T. \quad (6)$$

2. Les **interférences magnétiques** sont dues à des composants ferromagnétiques dans la nacelle qui créent des distorsions. Celles-ci sont de deux types : les distorsions dues à un champ magnétique permanent (Hard-Iron) et celles occasionnées par un champ magnétique induit (Soft Iron).

Les distorsions **Hard-Iron** sont dues à des aimants permanents ou une hystérésis magnétique (rémanence de matériaux ferromagnétiques). Celle-ci peut être modélisée par un biais :

$$\mathbf{b}_{hi} = [b_{hi_x} \quad b_{hi_y} \quad b_{hi_z}]^T. \quad (7)$$

Les distorsions **Soft Iron** sont dues à l'interaction entre un champ magnétique extérieur et des matériaux ferromagnétiques. Cela peut entraîner des changements à la fois en intensité et dans la direction du champ détecté par le capteur. On peut donc l'écrire sous la forme de la matrice 3x3 suivante :

$$\mathbf{A}_{si} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (8)$$

A l'aide des différentes sources de distorsion présentées ci-dessus on peut alors écrire le modèle suivant. Soit \mathbf{h}_m le vecteur des composantes lues par l'appareil et \mathbf{h}_{corr} les composantes corrigées.

$$\mathbf{h}_m = \mathbf{SN}(\mathbf{A}_{si}\mathbf{h}_{corr} + \mathbf{b}_{hi}) + \mathbf{b}_{so} \quad (9)$$

Ou encore :

$$\mathbf{h}_m = \mathbf{A}\mathbf{h}_{corr} + \mathbf{b} \quad (10)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \mathbf{SN}\mathbf{A}_{si} \\ \mathbf{b} &= \mathbf{SN}\mathbf{b}_{hi} + \mathbf{b}_{so}. \end{aligned} \quad (11)$$

\mathbf{A} étant la matrice combinant les effets d'échelle, de mauvais alignements et de soft iron.
 \mathbf{b} le vecteur des biais combiné

Comment calibrer ? L'objectif principal est donc de corriger et de calibrer notre magnétomètre, dont les mesures nous donnent plus une forme d'ellipsoïde, qu'une forme de sphère de rayon \mathcal{F} que l'on cherche.

En effet, la condition de normalisation... :

$$\mathbf{h}_{corr}^T \mathbf{h}_{corr} = \mathcal{F}^2. \quad (12)$$

...donne bien, en développant, une forme quadrique, qui ici est une ellipsoïde :

$$\mathbf{h}_m^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{h}_m - \quad (13)$$

$$2\mathbf{h}_m^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} + \quad (14)$$

$$\mathbf{b}^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} - \mathcal{F}^2 = 0. \quad (15)$$

On peut alors poser :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \quad (16)$$

$$\mathbf{u} = -2\mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \quad (17)$$

$$j = \mathbf{b}^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} - \mathcal{F}^2. \quad (18)$$

Et obtenir la même expression :

$$S : \mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{u} + j = 0 \quad (19)$$

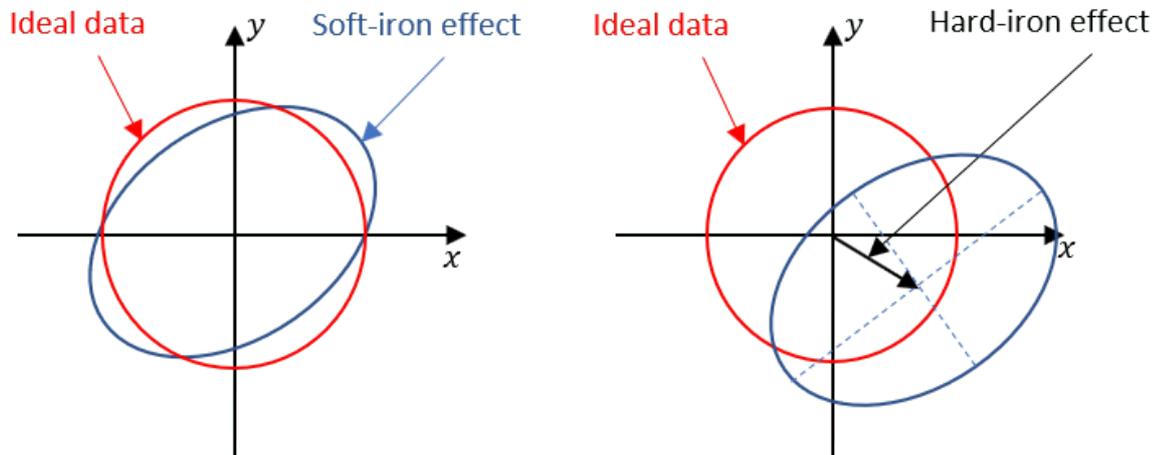


FIGURE 27 – Effets des distorsions sur les mesures du magnétomètre (coupe dans le plan XY) Source : Mathworks MagCal

La calibration consiste à estimer les paramètres Q , u et j de l'ellipsoïde, en utilisant par exemple un algorithme des moindres carrés [10] [13], puis de transformer l'ellipsoïde en une sphère centrée en 0, de norme \mathcal{F} [11] en appliquant :

$$\mathbf{h}_{corr} = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{h}_m - \mathbf{b}) \quad (20)$$

Le détail de la transformation et de l'algorithme d'estimation des paramètres est en **Annexe 6**.

5.2.4 • ACCÉLÉROMÈTRES

Au cours du vol les bras de la nacelle vibrent à des fréquences qui dépendent de leur rigidité et de la masse de la sphère en bout de bras et peuvent être dans la gamme des résonances de Schumann et donc induire des signaux parasites qu'on pourrait confondre avec celles-ci. Il est donc important de mesurer en vol les vibrations des bras.

Pour cela, il est utile d'installer quatre accéléromètres, sur chacun des bras de la nacelle, pour mesurer les vibrations avec une bande passante qui couvre celle des résonances de Schumann, donc 0 à 50 Hz.

Les accéléromètres que nous avons choisis sont des accéléromètres avec breakout board MMA8451 de chez Adafruit faciles à interfacer avec un microcontrôleur. Ils ont leur propre Convertisseur Analogique Numérique (ADC) 14 bits, donc d'une bonne précision, et communiquent avec le microcontrôleur par un protocole I2C.

Le protocole I2C est un protocole de communication sériel entre un maître et plusieurs esclaves qui utilisent deux pins.

- SCK (parfois appelé SCL) qui permet de relier les horloges internes de transmission et de réception des bits du maître et de l'esclave, contrôlées par le maître.
- SDA qui permet de transmettre les données sous forme de messages, avec un identifiant de l'esclave puis des data frames.

Un des problèmes rencontrés a été celui de l'adressage. En effet, les quatre composants étant identiques, ils avaient tous la même adresse et aucune communication n'était possible par I2C. Passer sur une seconde adresse était possible grâce à un pin d'adressage mais cela ne convient pas pour plus de deux instruments.

Une solution a donc été d'utiliser un multiplexeur. Celui ci permet, à travers un système de switch directement programmable en I2C, de basculer d'un composant à un autre de manière particulièrement efficace.

Il y a évidemment aussi besoin d'une certaine calibration des accéléromètres, pour corriger des problèmes de non-orthogonalité des axes par exemple. La procédure est quasiment identique à celle des magnétomètres pour lesquels la calibration est d'autant plus importante qu'il y a des distorsions dues à l'environnement extérieur.

5.2.5 • MESURE DE POSITION GPS

Pour le suivi GPS du ballon, nous utilisons une radiosonde M10 scientifique. Celle-ci envoie un signal à une certaine fréquence (une fois par seconde) vers la station avec laquelle elle a été appairée. Ce signal contient la position GPS de la sonde, la température ambiante, la force du vent et le taux d'humidité. Nous avons initialement prévu d'utiliser une fonctionnalité de la radiosonde lui permettant de rajouter à ce signal les données d'un instrument scientifique additionnel. L'objectif était alors d'utiliser un port série de notre carte Arduino comme port de sortie de notre "instrument additionnel". A chaque envoi de données vers le sol, la carte Arduino envoie la valeur du potentiel des électrodes. Ce faisant, nous pourrions rapatrier une partie de nos données pendant le vol, et avoir quelque chose si la carte SD contenant les mesures est endommagée à l'atterrissage.

Nous avons cependant constaté que le débit de données serait majoré par 100 o/s, ce qui est largement insuffisant pour nos observations (cela permet de transmettre 20 flottants par seconde, et notre instrumentation en génère au moins 30 000 par seconde). Nous avons donc abandonné cette idée, libre aux groupes suivants de revenir dessus.

6

ORGANISATION DU PROJET, RETOUR SUR LES OBJECTIFS & ENSEIGNEMENTS

6.1 RÉPARTITION DES TÂCHES AU SEIN DU GROUPE

- Prototypage et fabrication de la nacelle et des électrodes : Lise BRISSON et Fouad ALLAHWERDI
- Conception et gestion de l'électronique analogique embarquée : Olivier PHULPIN
- Electronique numérique, échantillonnage et stockage : Adrien GOLDSZAL et Noé GARRIC

6.2 RETOUR SUR LES OBJECTIFS

Ce projet, proposé par Jean-Jacques Berthelier, a été particulièrement formateur. Celui-ci nous a permis de découvrir la démarche de développement et de conception d'un projet spatial, avec l'interaction de plusieurs agents, des questions non seulement théoriques, mais aussi très pratiques, de conception et de logistique.

Les objectifs initiaux de ce projet étaient particulièrement élevés, ce qui avait déjà été soulevé par l'équipe des coordinateurs PSC du département de physique lors de notre première réunion. Alors que deux lancers de ballons, en temps calme et orageux avaient été prévus au cours de l'année, ainsi qu'une analyse des données, les objectifs ont dû être revus à la baisse au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Face aux retours des chercheurs du LPC2E, du LMD, ainsi que des coordinateurs, il a été convenu de se concentrer sur la fabrication de la nacelle et de son instrumentation, plutôt que de se précipiter à faire un lancer et de risquer de tout perdre en conséquence d'une préparation de mauvaise qualité. Les questions de rotation de la nacelle, ainsi que de lancers en temps orageux se sont aussi très rapidement avérées compliquées et ont dû être mises de côté.

6.3 ENSEIGNEMENTS

Ce PSC nous a tout d'abord fait comprendre l'importance d'être plus réaliste en terme de planning et d'organisation d'un projet de la sorte, nécessitant l'interaction de nombreuses entités, ainsi que de nombreux composants. Le fait d'avoir eu besoin de réadapter les objectifs tout au long du projet, ainsi que d'avoir longuement hésité sur le fait de développer une instrumentation par temps orageux ou non, de part sa difficulté supplémentaire, a retardé la conception de la partie électronique analogique.

L'importance d'une organisation rigoureuse et d'une capacité d'anticipation s'est avérée cruciale très rapidement, en particulier lors de questions de logistique. L'achat de composants nécessitait systématiquement le passage par, à la fois le Centre Spatial Etudiant (CSEP), et le Laboratoire de Physique des Plasmas (LPP), ce qui pouvait fortement ralentir l'avancement si les commandes n'étaient pas anticipées longtemps à l'avance. Par manque de composants, dû à la longueur et au retard des commandes, nous n'avons fini de monter les circuits en faisant des compromis qu'à la fin de mars 2024.

Ce projet nous a fait prendre conscience du poids de la communication. Rencontrer des chercheurs, des ingénieurs et des techniciens spécialisés dans les domaines qui nous intéressaient nous aurait permis d'avancer efficacement et de cerner des difficultés plus rapidement. Le LPC2E a par exemple résolu la question de l'hélium que nous n'avons pas réussi à nous fournir chez AirLiquide en tant qu'élèves. Ce laboratoire nous a aussi offert une radiosonde M10. Le LMD et le LPC2E nous ont aidé à réadapter nos objectifs en pointant la gêne occasionnée par le bras vertical pour le ballon et ont proposé une solution (l'anneau).

Nous avons appris de nouveaux savoir-faire grâce à la fabrication des composants du ballon comme la soudure et l'utilisation d'un convertisseur analogique numérique. Néanmoins, nous avons d'abord sous-estimé la technicité de ces savoir-faire. Prenons l'exemple de l'apprentissage du fonctionnement du four à refusion, pour souder des composants électroniques montés en surface. Les PCB commandés fin 2023 ont été reçues au début de l'année 2024. Le principal enjeu était la soudure des composants essentiels (amplificateurs, convertisseurs et ponts de diodes). Ceux-ci étant au format SOIC (*Small outline integrated circuit*), leur soudure à la carte à la main aurait été longue, fastidieuse et aurait pu résulter en de faux contacts.

Nous avons donc appris par-nous même à utiliser le four à refusion (chauffe la carte avec les composants placés et de la pâte à braser, permettant une soudure propre et uniforme) du CSEP présent au Drahi'X, abandonné jusqu'à aujourd'hui. Nous avons cherché des procédés permettant d'étaler correctement la pâte à braser sur la carte, sinon des faux contacts auraient été susceptibles d'apparaître.

Finalement, au bout de trois semaines d'efforts, nous avons trouvé une méthode pour appliquer la pâte à l'aide d'une seringue de l'infirmerie. Sur l'ADC, quelques faux contacts étaient apparus (quatre doublons sur 80 pins) mais ont été corrigés au fer à souder. Si cette étape est techniquement une perte de temps, elle est une expérience intéressante. Nous avons ainsi appris que si une approche bricolée est suffisante pour faire un premier prototype, un montage plus précis nécessite des techniques industrielles.

7

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Concevoir un ballon atmosphérique fut un défi pour notre équipe. Ce projet était non seulement intéressant par sa portée scientifique mais aussi formateur par le panel des domaines abordés (mécanique, électronique, physique, informatique). Nous avons à la fois touché au côté théorique et pratique du sujet. Nous avons étudié la théorie des phénomènes atmosphériques pour mieux les comprendre et donc les mesurer. Nous avons aussi appris à utiliser ou à concevoir les instruments de mesure. En ce sens, le PSC nous a beaucoup appris.

Partager ses idées tant au sein de l'équipe qu'autour de nous s'est révélé être essentiel à l'avancement du projet. En effet, le travail en équipe demande une adaptation constante aux demandes et aux attentes des autres membres car les différentes parties du ballon ne sont pas indépendantes. Par exemple, il est nécessaire de connaître les dimensions des PCB pour pouvoir faire la conception mécanique de la nacelle. Faire part de ses difficultés et de ses potentielles solutions à l'extérieur fut stimulant et épanouissant.

En somme, ce projet nous a beaucoup appris, tant en compétences techniques d'électronique et de bricolage qu'en réalisme dans la gestion de projets. Nous sommes convaincus qu'avec une ou deux années de travail supplémentaires, il pourrait conduire à un lâcher de ballon, et sommes favorables à ce qu'un groupe d'X2023 reprenne et approfondisse ce PSC.

RÉFÉRENCES

- [1] Simões, F., Pfaff, R., Berthelier, J.-J., & Klenzing, J. (2012). A Review of Low Frequency Electromagnetic Wave Phenomena Related to Tropospheric-Ionospheric Coupling Mechanisms. *Space Science Reviews*, 168(1), 551-593. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9854-0>
- [2] Michael J. Rycroft · R. Giles Harrison · Keri A. Nicoll, Evgeny A. Mareev (2008). An Overview of Earth's Global Electric Circuit and Atmospheric Conductivity *Space Science Review*, 137, 83–105. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9368-6>
- [3] Defer, E., Célestin, S., Pallu, M., Farges, T., Kolmašová, I., Santolik, O., Trompier, F., Hertzog, A., Vargas, A., & Venel, S. (s.d.). An Overview Of The Stratelec Project (Stratéole-2 Atmospheric Electricity).
- [4] Strateole-2. (2017, mai 31). Strateole 2. <https://strateole2.cnes.fr/fr/strateole-2>
- [5] Schumann, W. O. (1952). Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift für Naturforschung A*. 7 (2) : 149–154 <https://doi.org/10.1515/zna-1952-0202>
- [6] P. C. Malta, J. A. Helayel-Neto (2022). Constraining the photon mass via Schumann resonances *Physical Review D* <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.116014>
- [7] Christine Olson Seubert (1977). ATMOSPHERIC CONDUCTIVITY MEASUREMENTS FROM 15 to 35 KILOMETERS *University of Houston : Thesis*
- [8] F. S. Mozer and R. Serlin (1969). Magnetospheric Electric Field Measurements with Balloons *Journal of Geophysical Research, Space Physics*
- [9] F. Legrand (2009). Filtres actifs de Sallen-Key *Site web personnel* : <https://www.flegrand.fr/scidoc/docmml/sciphys/electro/sallenkey/sallenkey.html>
- [10] Qingde Li, John G. Griffiths. (2004) Least Squares Ellipsoid Fitting
- [11] <https://sites.google.com/view/sailboatinstruments1/b-presentation>. Implementation of the Least Squares Method and Mathematical Elements
- [12] <https://teslabs.com/articles/magnetometer-calibration/>. A way to calibrate a magnetometer
- [13] https://github.com/gmarull/gmarull.github.io/blob/master/_posts/2015-12-06-magnetometer-calibration.md. Calibration programme
- [14] J.E. Garcia-Farieta, A. Hurtado. (2024) *Simulation of charged particles in Earth's magnetosphere : an approach to the Van Allen belts*
- [15] Documentation Mega 2560 Rev3 (2024, 11 janvier), Arduino,
- [16] Documentation analogRead() (2024, 14 Janvier), Arduino, <https://www.arduino.cc/reference/>
- [17] ATmega8A Data Sheet, Microchip, <https://onlinedocs.microchip.com/pr/GUID-80B1922D-872B-40C8-A8A5-0CBE009FD908-en-US-3/index.html?GUID-80858615-729B-4FC6-97DF-4755FEF75CEB>
- [18] MCP3208 Datasheet, Microchip, <https://ww1.microchip.com/>
- [19] ADS8686S Datasheet, Texas Instruments, <https://www.ti.com/lit/gpn/ads8686s>
- [20] STM32H7 Datasheet, ST Microelectronics, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32h743vi.pdf>
- [21] FreeFEM Team. (2024). FreeFEM++ Documentation. Récupéré de <http://doc.freefem.org/>

8

ANNEXES

8.1 ANNEXE 1 : CODE DE LA SIMULATION NUMÉRIQUE

```

load "msh3"
load "medit "

//

// Constantes
//

// Dimensions de la nacelle
real R = 20; //en cm
real r = 15;
real L = 40;
real l = 30;
int n = 30; //pas du maillage
real alt =0; // altitude de la nacelle en m

// Constantes physiques
real k1 = 119.5; //coefficient de diffusion de l'air converti en cm2/
min
real k2= 2.32 ; //coefficient de diffusion du polyurthane en cm2/min
real h = 4545.45; // coefficient de convection/k2 = 4545.45 cm-1
real S = 5.8; // chaleur fournie par l'lectronique (en J.cm3.s-1)
int Deltat = 1; //en minutes
int temps =0; //en minutes
real Text = 15; //temperature exterieur a altitude 0m

//Maillage 2D de l'interieur de la nacelle

int exterieur = 4;
int interieur = 3;
int axerot = 0;

border Left1(t=0, (L-1)/2){x=0; y=t; label = axerot;};
border Left2(t=0, (L-1)/2){x=0; y=(L+1)/2 + t;label = axerot;};
border Top(t=0, R){x=t; y=L;label=exterieur;};
border Right(t=0, L){x=R; y=L-t;label=exterieur;};
border Bottom(t=0, R){x=R-t; y=0;label=exterieur;};

border left(t=0, l){x=0; y=(L-1)/2 + t;label = axerot;};

```

```

border top(t=0, r){x= t; y=(L-1)/2;label = interieur;};
border right(t=0, l){x=r; y=(L-1)/2 + t;label = interieur;};
border bottom(t=0, r){x=r - t; y=(L+1)/2;label = interieur;};

plot(Left1(-n) + Left2(-n) + Top(-n) + Right(-n) + Bottom(-n) + left(-n
)
+ top(n) + right(n) + bottom(n), wait=true);

mesh Th = buildmesh(Left1(-n) + Left2(-n) + Top(-n) + Right(-n) +
Bottom(-n) + left(-n)
+ top(n) + right(n) + bottom(n));

plot(Th, wait=1);

//*****
// Espace d'elements finis
//*****
fespace Vh(Th,P2);
Vh uh,vh;

Vh Air = (0<x<r)*((L-1)/2<y<(L+1)/2);
Vh Iso = (0<x<r)*((0<y<(L-1)/2)+((L+1)/2<y<L))+ (x>r); //fonction
indicatrice sur l'isolant de la nacelle
func Tinit= 15;
Vh Ti = Tinit;

problem Laplace(uh,vh) = int2d(Th)(2*pi*x*uh*vh) //integrale de temps
+ int2d(Th)(2*pi*k1*Air*Deltat*x*(dx(uh)*dx(vh)+dy(uh)*dy(vh))) //
integrale sur l'interieur de la nacelle
- int2d(Th)(2*pi*S*Air*Deltat*x*(vh)) // flux de chaleur de l'
lectronique
+ int2d(Th)(2*pi*k2*Iso*Deltat*x*(dx(uh)*dx(vh) + dy(uh)*dy(vh))) //
integrale sur la partie isolante
+int1d(Th, exterieur)(2*pi*x*Deltat*h*uh*vh) //condition de Fourier
- int1d(Th, exterieur)(2*pi*x*Deltat*h*Text*vh) //condition de Fourier
- int2d(Th)(2*pi*x*Ti*vh); // integrale de temps

```

```

while (temps < 167) { // Ascension jusqu' t=167 minutes
Laplace; // FreeFem calcule uh et le stocke

temps = temps + Deltat; // En minutes
alt = 180 * temps; //la nacelle monte en altitude une vitesse de
3m/s
Text;

if (temps < 56) { //la temperature est d finie selon 3 paliers d'
altitude
Text = 15 - 0.0057 * alt;

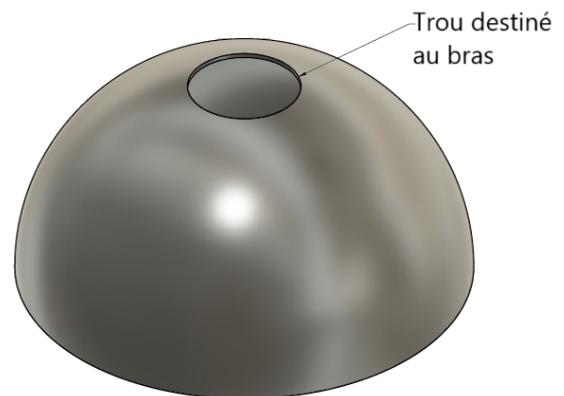
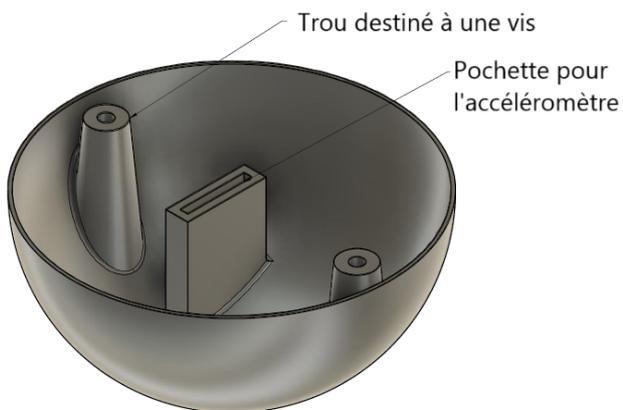
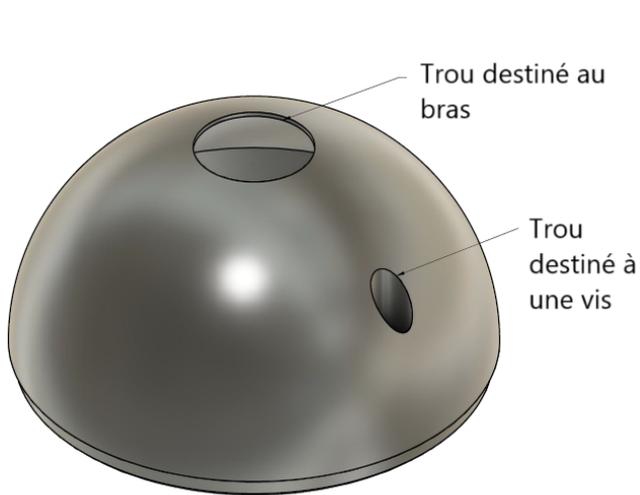
```

```
} else if(temps < 112){
    Text = -56;
}
else if(temps < 168){
    Text = -56 +0.0026*(alt -20000);
}

cout << "temps_□:□" << temps << endl;
cout << "altitude_□:□" << alt << endl;
cout << "Text_□:□" << Text << endl;
Vh Ti = uh;

plot(uh, fill=1, dim=2, value=10, wait=1, cmm=temps); }
```

8.2 ANNEXE 2 : SCHÉMAS DES ÉLECTRODES



8.3 ANNEXE 3 : FILTRES DU PRÉAMPLIFICATEUR

8.3.1 • FILTRAGE DC

On utilise un passe bas d'ordre 1 de fréquence de coupure théorique 3Hz :

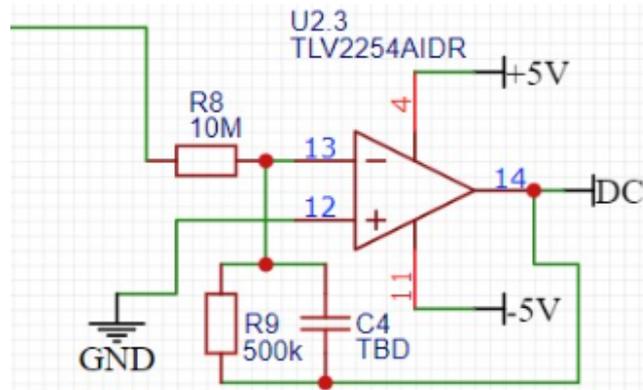


FIGURE 29 – Filtre DC

— On veut diviser le signal par 20 pour passer de HT +/- 100V à +/- 5V et donc on pose

$$\frac{R_9}{R_8} = 20 \quad (21)$$

En outre, il est important d'avoir une impédance d'entrée la plus élevée possible.

— On a

$$\omega_c = \frac{1}{R_9 C_4} \quad (22)$$

Et on veut une fréquence de coupure à 3Hz. Avec $C_4 = 0,15 \mu F$, $R_8 = 10M\Omega$ et $R_9 = 470K\Omega$, on obtient $f_c = 2.3Hz$

8.3.2 • FILTRAGE AC - AC1, PASSE BAS

- Idée initiale

Pas de fréquence de coupure définie mais l'objectif est ensuite de filtrer tout ce qui est au dessus de 2Khz (à l'aide du filtre A5). On est initialement parti sur un filtre Sallen Key conseillé par Jean-Jacques Berthelier, passe bas d'ordre 2 qui, de par les limitations des composants, à une fréquence de coupure de 3 KHz.

On a

$$\omega_c = \frac{1}{RC_1} \quad (23)$$

On pose

$$A51R1 = A51R2 = 100k\Omega$$

$$A51C1 = 3.3 * 10\mu F$$

$$A51C2 = 6.8 * 10\mu F$$

On obtient une fréquence de coupure à 3 KHz

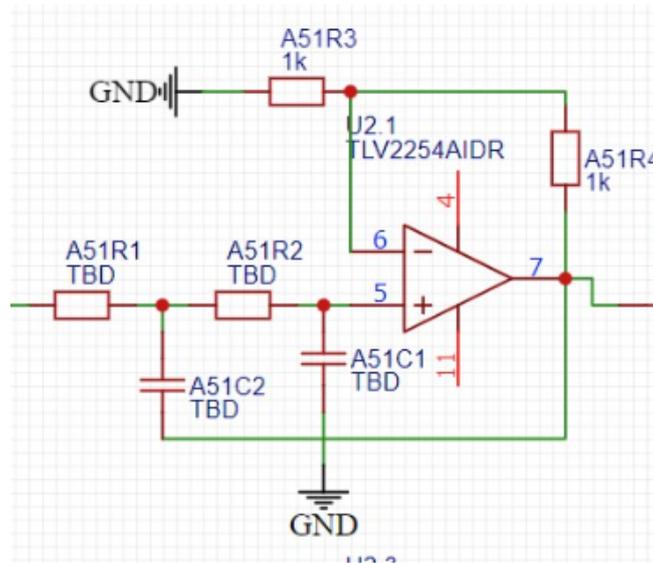


FIGURE 30 – Schema de la V1 du filtre AC1

- Limites et inconvénients

1) Les filtres de Sallen Key ne fonctionnent pas comme des simples filtres d'ordre 2 dès que K est différent de 1. Certains phénomènes particuliers se produisent (pic) au niveau de la fréquence de coupure. Donc 2.7Khz devrait suffire mais on est à la limite. Quelle que soit la fréquence, il risque d'y avoir des perturbations

2) On veut un Gain

$$K = \frac{1}{20} \tag{24}$$

Pour diviser le signal et le faire passer à 5V.

Pour avoir un gain de 1/20, on calcule la fonction de transfert :

$$V_s = \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)V_e \tag{25}$$

Le gain de 1/20 est donc pas réalisable avec les composants que nous possédons.

- Nouvelle idée

Changement de filtre, passage sur un filtre du premier ordre, peut être moins performant au niveau de la discrimination des fréquences. On peut supposer qu'avec le filtre A5, passe bas qui suivra en aval, cette baisse de qualité sera compensée. Peut être monter la fréquence de coupure pour s'assurer d'un bon filtrage.

8.3.3 • FILTRAGE AC : AC2, PASSE HAUT D'ORDRE 2 : $F_c = 3Hz$

On utilise un filtre de Sallen Key d'ordre 2. Ici, on a déjà K = 1, ainsi que pour tous les filtres par la suite.

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \tag{26}$$

On pose

$$A52R1 = A52R2 = 100k\Omega$$

$$A52C1 = A51C2 = 0.47\mu F$$

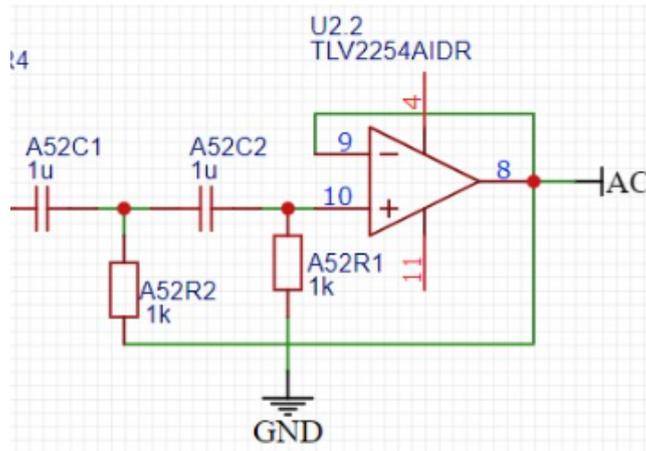


FIGURE 31 – Sallen Key passe haut d’ordre 2 : AC2

On obtient une fréquence de coupure à 3.38 Hz

8.4 ANNEXE 4 : FILTRAGE

8.4.1 • FILTRE A3 : PASSE BAS 3Hz D’ORDRE 2

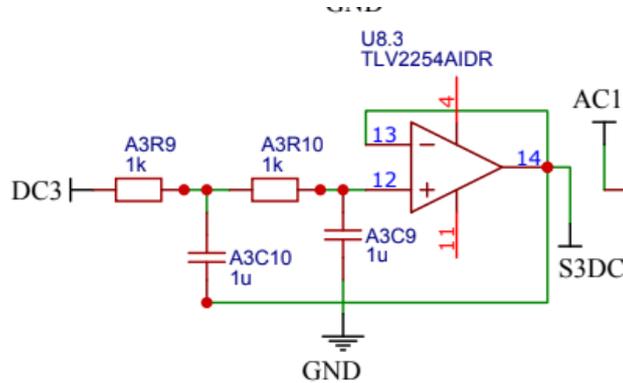


FIGURE 32 – Filtre A3

On pose $A3R9 = A3R10 = R$, $A3C10 = C2$, $A3C9 = C1$. Pour que le filtre de Sallen Key se comporte comme un filtre passe bas d’ordre 2 classique, on doit choisir $C2 = C1$ [9].

La fréquence de coupure est alors est :

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC_1}$$

On pose :

$$R = 25k\Omega, C_2 = C_1 = 4.7\mu F$$

On obtient

$$f_c = 2.9Hz$$

8.4.2 • FILTRE A4 : SOUSSTRACTEUR À GAIN VARIABLE

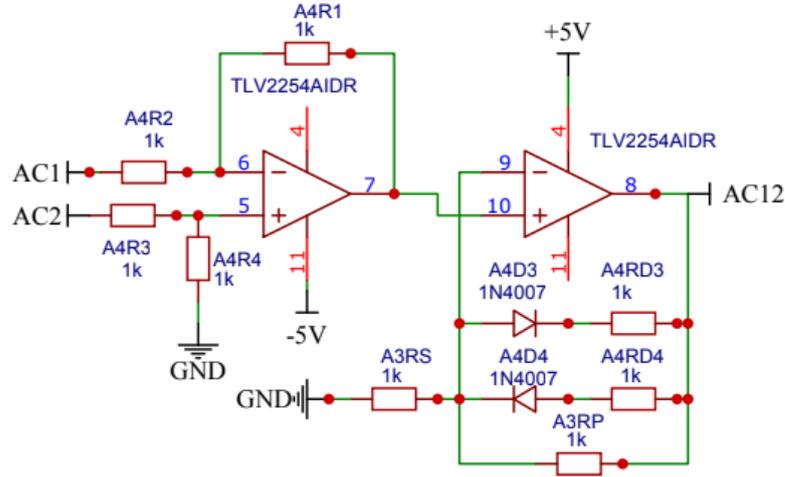


FIGURE 33 – Filtre A4 : Soustracteur à gain variable

Tout d’abord, regardons la partie soustracteur du filtre. On pose $A4R2 = A4R3 = R1$, $A4R1 = A4R4 = R2$. On a alors, un gain

$$K = -\frac{R2}{R1}$$

Pour la partie à gain variable, on pose : $A3RS = R$, $A3RP = R'$, $A4RD3 = A4RD4 = Rd$

On rappelle : $\lambda_d = \frac{R'}{R_d + R'}$, $\lambda = 1 + \frac{R_d}{R} \lambda_d$, $\gamma = \frac{R + R'}{R}$

On pose

$$p = \frac{R'}{R}, d = \frac{R_d}{R}$$

Par calcul on obtient :

$$p = \frac{V4}{KV_{LT}} - 1, d = \frac{V5 - Vd - KV_{HT}}{KV_{HT}(1 + p) - V5}$$

S’imposent en plus deux conditions sur K :

$$K \ll \frac{V4}{V_{LT}}, K < \min\left(\frac{V5 - Vd}{V_{HT}}, \frac{V4}{V_{LT}}\right)$$

Avec $R1 = 47\Omega$, $R2 = 27k\Omega$, $R = 33\Omega$, $R' = 47k\Omega$, $R_d = 15\Omega$, on obtient $K = 500$ qui vérifie les contraintes.

8.4.3 • FILTRE 5 : PASSE BANDE 3Hz <> 45Hz

On utilise deux filtres Sallen Key d’ordre 2. Ici encore, pour le passe bas $K = 1$, on doit poser $C2 = C1$ pour obtenir un filtre d’ordre 2 classique. Passe bas : On pose :

$$A51R7 = A51R8 = R = 47k\Omega$$

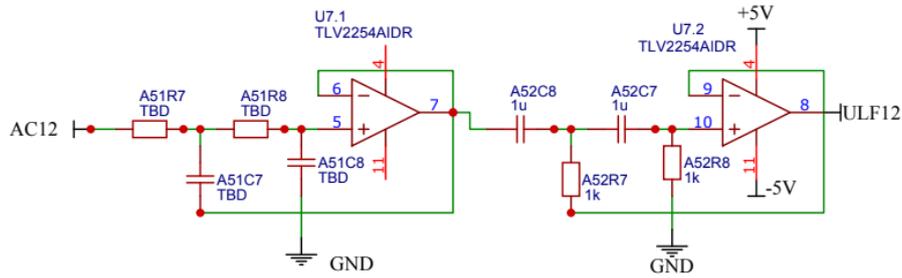


FIGURE 34 – Filtre Passe Bande A5

$$A51C7 = A51C8 = C = 68nF$$

On obtient

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 49Hz$$

Passé haut : On pose :

$$A52R7 = A52R8 = 680k\Omega$$

$$A52C8 = A52C7 = 68nF$$

On obtient

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 3.5Hz$$

8.4.4 • FILTRE A7 : PASSE BAS 2 kHz

Sallen Key d'ordre 2 : $C = 1.5nF$, $R = 47k\Omega$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = 2.25kHz$$

8.5 ANNEXE 5 : SCHÉMA ÉLECTRIQUE GLOBAL DU FILTRAGE

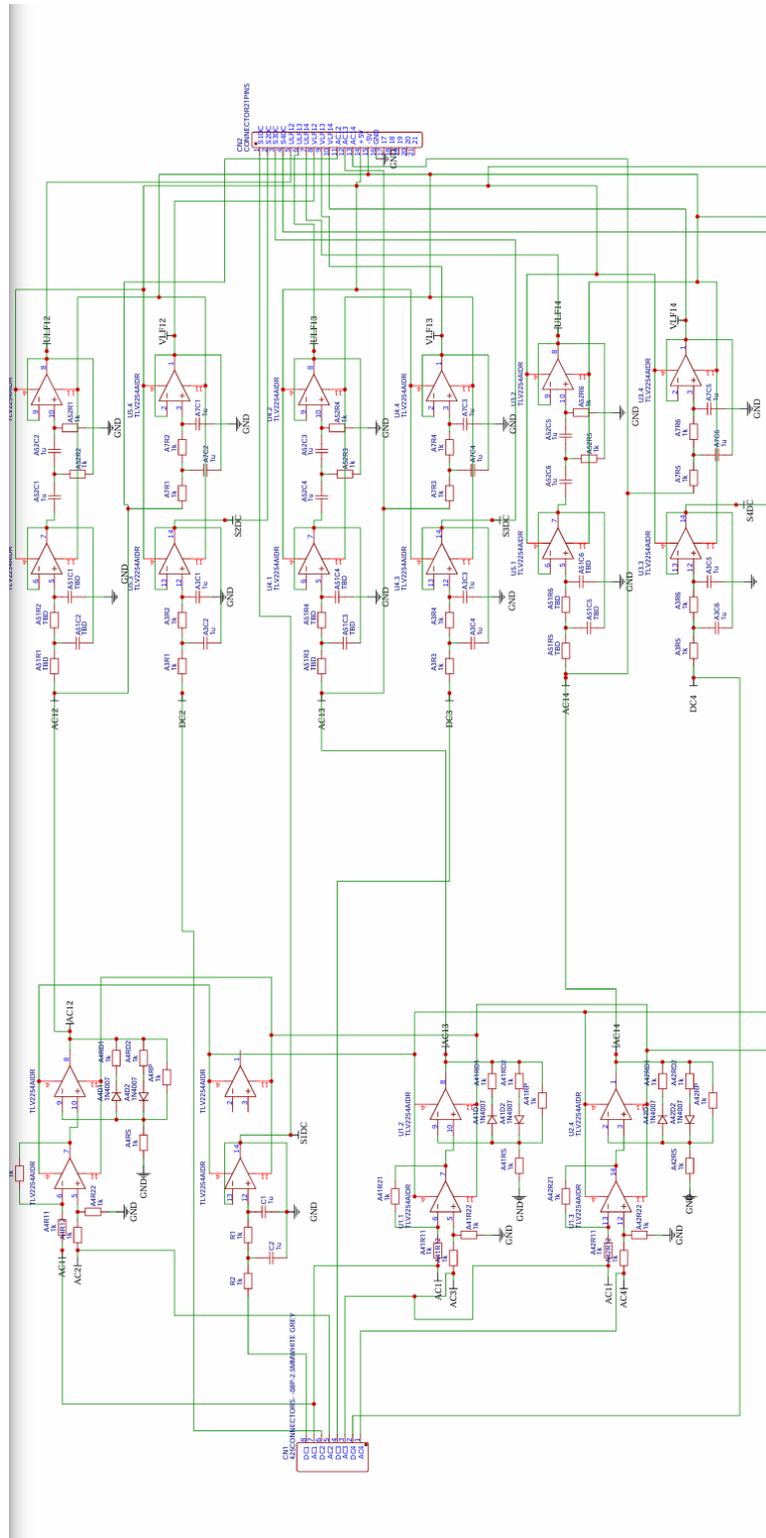


FIGURE 35 – Schéma électrique global du filtrage

8.6 ANNEXE 6 : CALIBRATION DU MAGNÉTOMÈTRE ET APPROXIMATION D'UNE ELLIPSE PAR MOINDRES CARRÉES

8.6.1 • RECENTRER EN UNE SPHÈRE

On va chercher à recentrer en $(0,0)$ une ellipse en une sphère de rayon F . Pour cela, procédons en 5 étapes, appliquées à toutes nos mesures du champ :

Étape 1 On recentre l'ellipse en soustrayant $\hat{\mathbf{b}} = -\frac{1}{2}\mathbf{Q}^{-1}\mathbf{u}$ aux composantes.

Étape 2 On aligne les axes principaux de l'ellipse avec les axes x , y et z du repère, en appliquant la rotation inverse $\mathbf{V}^{-1}(=\mathbf{V}^T)$

Étape 3 On met à l'échelle les demi-axes b et c de l'ellipse avec ceux de a en appliquant une transformation, permettant d'obtenir une sphère de rayon \mathbf{a} :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{b}{a} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{c}{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\frac{\lambda_3}{\lambda_1}} \end{pmatrix} \quad (27)$$

Étape 4 On fait à nouveau une rotation, dans l'autre sens, pour retourner dans l'orientation initiale, à l'aide de \mathbf{V}

Étape 5 On adapte le rayon de notre sphère à la norme du champ magnétique \mathcal{F} voulue.

La transformation suivante est donc :

$$\begin{pmatrix} x_{corr} \\ y_{corr} \\ z_{corr} \end{pmatrix} = \frac{\mathcal{F}}{a} \mathbf{V} \sqrt{\frac{1}{\lambda_1}} \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\lambda_2} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\lambda_3} \end{pmatrix} \mathbf{V}^{-1} \begin{pmatrix} x - \hat{b}_x \\ y - \hat{b}_y \\ z - \hat{b}_z \end{pmatrix} = \frac{\mathcal{F}}{\sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{u} - J}} \mathbf{Q}^{1/2} \begin{pmatrix} x - \hat{b}_x \\ y - \hat{b}_y \\ z - \hat{b}_z \end{pmatrix} \quad (28)$$

8.6.2 • TROUVER LES PARAMÈTRES DE NOTRE ELLIPSE : L'ALGORITHME DES MOINDRES CARRÉS

Pour pouvoir faire notre transformation, il nous faut donc plusieurs paramètres de l'ellipse (Q , u et j). De nombreux algorithmes permettent d'approcher un nuage de points par une ellipse. Nous allons ici utiliser et implémenter l'algorithme des moindres carrés de Li et Griffiths dont la méthode est détaillée en annexe.

```
def __ellipsoid_fit(self, s):
    """
    Parametres : s, l'ensemble des mesures (M,N) M=3 (x,y,z) et N
                 le nombre de mesures
    Renvoie : Q, u, J (array 3*3, array 3*1, float: parametres de l
              'ellipse
    """
    # D (mesures)
    D = np.array([s[0]**2., s[1]**2., s[2]**2.,
                  2.*s[1]*s[2], 2.*s[0]*s[2], 2.*s[0]*s[1],
                  2.*s[0], 2.*s[1], 2.*s[2], np.ones_like(s[0])])

    # S, S_11, S_12, S_21, S_22 (eq. 11)
    S = np.dot(D, D.T)
    S_11 = S[:6, :6]
    S_12 = S[:6, 6:]
    S_21 = S[6:, :6]
    S_22 = S[6:, 6:]

    # C (Eq. 8, k=4)
    C = np.array([[ -1,  1,  1,  0,  0,  0],
                  [  1, -1,  1,  0,  0,  0],
                  [  1,  1, -1,  0,  0,  0],
                  [  0,  0,  0, -4,  0,  0],
                  [  0,  0,  0,  0, -4,  0],
                  [  0,  0,  0,  0,  0, -4]])

    # v_1 (eq. 15, solution)
    E = np.dot(linalg.inv(C),
               S_11 - np.dot(S_12, np.dot(linalg.inv(S_22), S_21)))

    E_w, E_v = np.linalg.eig(E)

    v_1 = E_v[:, np.argmax(E_w)]
    if v_1[0] < 0: v_1 = -v_1

    # v_2 (eq. 13, solution)
    v_2 = np.dot(np.dot(-np.linalg.inv(S_22), S_21), v_1)

    Q = np.array([[v_1[0], v_1[5], v_1[4]],
                  [v_1[5], v_1[1], v_1[3]],
                  [v_1[4], v_1[3], v_1[2]]])
    u = np.array([[v_2[0]],
                  [v_2[1]],
                  [v_2[2]]])
    j = v_2[3]
```

```
return Q, u, j
```

Ci-dessous le programme total utilisant la fonction `ellipsoid_fit()` et exportant les données corrigées dans un autre fichier `.txt`.

```
class Magnetometer(object):

    MField = 70
    # Champ magnetique local (a trouver sur internet),
    #dans la meme unite que le champ magnetique des valeurs
    #dans le fichier donne en entree

    def __init__(self, F=MField):

        # initialize values
        self.F = F
        self.b = np.zeros([3, 1])
        self.A_1 = np.eye(3)

    def run(self):
        data = np.loadtxt('magreadings.txt', delimiter=' ', skiprows=0)
        #Entree des donnees (fichier txt avec 3 colonnes pour les trois
        #composantes du champ)
        # ellipsoid fit
        s = np.array(data).T
        Q, u, j = self.__ellipsoid_fit(s)

        # calibration parameters
        Q_1 = linalg.inv(Q)
        self.b = -np.dot(Q_1, u) * (1/2)
        self.A_1 = np.real(self.F / np.sqrt(np.dot(u.T, np.dot(Q_1, u)) -
        j) * linalg.sqrtm(Q))

    print ("Soft iron transformation matrix:\n", self.A_1)
    print ("Hard iron bias:\n", self.b)

    result = []
    for row in data:
        # subtract the hard iron offset
        xm_off = row[0] - self.b[0]
        ym_off = row[1] - self.b[1]
        zm_off = row[2] - self.b[2]
        # multiply by the inverse soft iron offset
        xm_cal = xm_off * self.A_1[0, 0] + ym_off * self.A_1[0, 1] +
            zm_off * self.A_1[0, 2]
        ym_cal = xm_off * self.A_1[1, 0] + ym_off * self.A_1[1, 1] +
            zm_off * self.A_1[1, 2]
        zm_cal = xm_off * self.A_1[2, 0] + ym_off * self.A_1[2, 1] +
            zm_off * self.A_1[2, 2]

        result.append([xm_cal, ym_cal, zm_cal])

    result = np.array(result).reshape(-1, 3)
```

```

header = "X,Y,Z"
np.savetxt('magreadingscorrected.csv', result, fmt='%f', delimiter=
          ', ', header=header)

if __name__ == '__main__':
    Magnetometer().run()

```

8.7 ANNEXE 7 : COMMUNICATION SPI AVEC LE MICROCONTRÔLEUR

```

#include <SPI.h>

const int CSPin = 53;
int const nbMeasures = 150;

static int channelArray[8][3];
//a channel is represented by the list of its bits, MSB first

static float measures[nbMeasures][9];

static int result1;
static int result2;
static int result3;

void setup() {
    //Initialization of the channelArray
    for (int i = 0 ; i < 8 ; i++){
        int remainder = i;
        channelArray[i][0] = i / 4;

        remainder = i - 4 * channelArray[i][0];
        channelArray[i][1] = remainder / 2;

        remainder = remainder - 2 * channelArray[i][1];
        channelArray[i][2] = remainder;
    }
    Serial.begin(9600);

    pinMode(CSPin,OUTPUT);
    digitalWrite(CSPin,HIGH);
    SPI.begin();

}

float readInput(int b2, int b1, int b0){
    digitalWrite(CSPin,LOW);
    SPI.beginTransaction(SPISettings(2000 * 1000, MSBFIRST, SPI_MODE0));
    //frequency in kHz
    result1 = SPI.transfer(0b110 + b2);
    result2 = SPI.transfer(0b0 + (b1 << 7) + (b0 << 6));
}

```

```

result3 = SPI.transfer(0b0);
SPI.endTransaction();
digitalWrite(CSPin,HIGH);

float voltage = 256 * (result2 % 16) + result3;
return (voltage / 4096*5);
}

static int i = 0;
void loop() {
  measures[i][0] = micros();
  measures[i][0] /= 1000; //we want time in ms

  for (int j = 1 ; j < 9 ; j++){
    measures[i][j] = readInput(channelArray[j-1][0],channelArray[j-1][1],channelArray[j-1][2]); //j begins at 1 hence index j-1
  }

  i++;
  if (i == nbMeasures){
    for (int k = 0 ; k < nbMeasures ; k++){
      String line = "";
      for (int j = 0 ; j <= 7 ; j++){
        line = line + measures[k][j] + ",";
      }
      line = line + measures[k][8];
      Serial.println(line);
    }
    i = 0;
  }
}

```

8.8 ANNEXE 8 : ECHANTILLONNAGE AVEC UNE ARDUINO MEGA

Le code ci-dessous permet, en modifiant le registre ADCSRA, d'augmenter la fréquence d'échantillonnage de l'ADC (en diminuant la précision des mesures)

```

/* Noe Garric , 20/04/2024
Ce code vise a lire , en boucle , la valeur de tension sur un ensemble d'
entrees
(listees dans pinArray)
Ces donnees sont stockees dans le tableau 2d dataProvisionalArray (avec
la date de la mesure en premiere colonne)
Puis poussees sur le moniteur serie quand dataProvisionalArray est
plein
(cette methode est adaptable pour pousser le buffer sur carte SD)
La carte Arduino utilisee est une Mega 2560

```

```

*/

//Initialisation parametres mesure

const int nbMeasures = 150;
const int pinArray [] = {A0,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7};
const int nbPins = sizeof(pinArray) / sizeof(pinArray[0]);
float dataProvisionalArray[nbMeasures][nbPins+1];

int i = 0;
int startTime = millis();
float f = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.print("Taille d'un entier =");
  Serial.print(sizeof(i));
  Serial.println(" octets");

  Serial.print("Taille d'un flottant =");
  Serial.print(sizeof(f));
  Serial.println(" octets");
  ADCSRA = 151; //peut etre modifie pour adapter le temps de lecture
  Serial.println("_____Debut des acquisitions_____");
  Serial.print("Time,");
  for (int j = 1 ; j <= nbPins-1 ; j++){
    Serial.print(pinArray[j-1]);
    Serial.print(",");
  }
  Serial.println(pinArray[nbPins-1]);
}

void loop() {

  dataProvisionalArray[i][0] = micros();
  for (int j = 1 ; j <= nbPins ; j++){
    dataProvisionalArray[i][j] = analogRead(pinArray[j-1]);
    dataProvisionalArray[i][j] = dataProvisionalArray[i][j]/1024*5;
  }

  i += 1;

  if (i == nbMeasures){
    for (int k = 0 ; k < nbMeasures ; k++){
      String line = "";
      for (int j = 0 ; j <= nbPins-1 ; j++){
        line = line + dataProvisionalArray[k][j] + ",";
      }
      line = line + dataProvisionalArray[k][nbPins];
      Serial.println(line);
    }
  }
}

```



```
    i = 0;  
  }  
}
```