

Projet CoBRA : Nacelle n°3

SAPHIRE : 208
Projet pluridisciplinaire 2024.

RAPAILLE Quentin, TOURNIER Noah, CHEVALIER Damien,
CADEILHAN Pierrot, RETAILLEAU Mathieu, JACQUES Bastien,
OTALORA Loïs, MAISON Romain, AMITRANO Louis

école
normale
supérieure
paris-saclay

université
PARIS-SACLAY

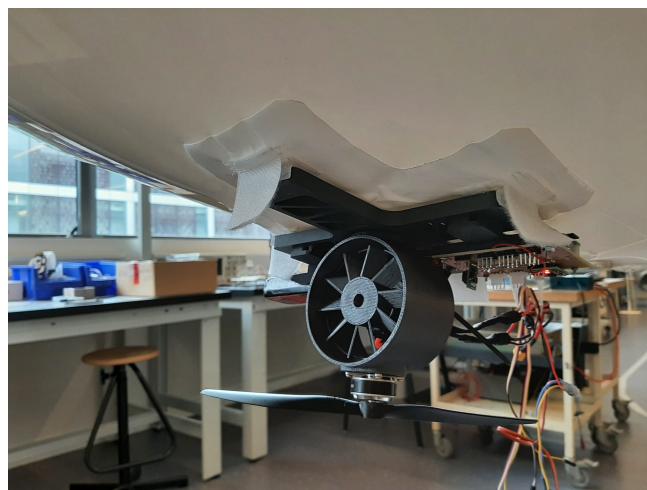


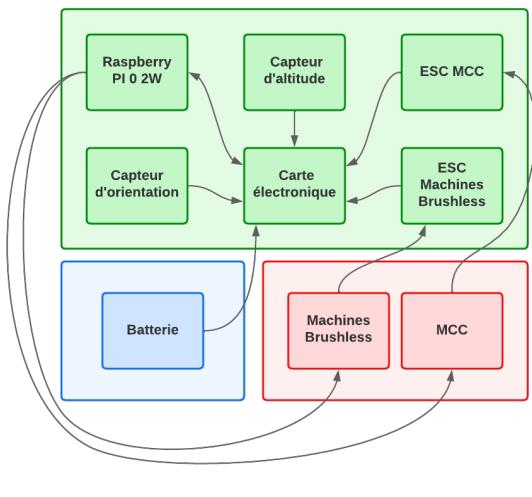
FIGURE 1 – Photo nacelle 3.

Table des matières

1 Position du problème. (Noah)	4
2 Cahier des charges. (Pierrot & Damien)	4
3 Etude des composants de la nacelle (Pierrot & Damien)	5
3.1 Liste exhaustive des composants	5
3.2 Commande des actionneurs	5
3.3 Acquisition	6
4 Stratégie d'asservissement (Pierrot, Damien, Noah, Loïs, Bastien)	8
4.1 Asservissement en altitude (Noah).	8
4.2 Asservissement en orientation.(Loïs, Noah, Bastien)	9
5 Conception de la nacelle (Quentin, Mathieu, Noah).	11
5.1 Description de la solution :	11
5.2 Problèmes posés par l'hélice horizontale :	11
5.3 Solution trouvée :	12
5.4 Structure du cylindre :	12
5.5 Optimisation de la masse embarquée :	13
5.6 Prise en compte des éléments de fonctionnement :	14
5.7 Conclusion :	14
5.8 Conception sur Fusion360. (Noah)	15
6 Conception de la carte électronique (Romain & Louis)	16
6.1 Objectifs	16
6.1.1 Contexte	16
6.1.2 Problématique	16
6.2 Démarche de réalisation	17
6.2.1 Formation EAGLE et soudage	17
6.2.2 Création du schéma électrique	17
6.2.3 Imlémentation du schéma dans EAGLE et rootage de la carte	17
6.2.4 Fabrication et soudage de la carte	18

7	Implémentation et essais de l'asservissement. (Pierrot, Damien, Noah)	19
7.1	Caractéristique des moteurs utilisés (Pierrot, Damien, Noah)	20
7.2	Asservissement en altitude. (Noah)	21
7.3	Asservissement en orientation.(Pierrot & Damien)	21
7.4	Utilisation de la caméra.	21
8	Conclusion.	21
9	Bibliographie	22
10	Annexes	23
10.1	Géométrie et physique du dirigeable (Noah).	23
10.2	Calcul de la surface du dirigeable (Noah)	24
10.3	Calcul de la matrice d'inertie d'une demi-ellipse (Noah)	24
10.4	Calcul du centre d'intertie du dirigeable (Bastien).	26
10.4.1	Centre de gravité des deux demi-ellipses.	26
10.4.2	centre de gravité de l'enveloppe	27
10.4.3	Centre de gravité de l'ensemble ballon + enveloppe	27
10.5	Modélisation du ballon sous CATIA (Loïs)	27
10.6	Étude de la vitesse du dirigeable à altitude constante (Loïs)	29

1 Position du problème. (Noah)



Dans le cadre du projet Saphire, il nous a été demandé de mettre en oeuvre une nacelle automatisée afin de piloter un dirigeable.

L'objectif de notre groupe est donc la conception de cette nacelle automatisée et plus précisément :

- Déterminer la forme de la nacelle et où placer les moteurs.
- Concevoir la nacelle.
- Concevoir une carte électronique.
- Asservir le dirigeable en altitude, en position et en orientation.

FIGURE 2 – Diagramme complet

Ce compte-rendu présente les résultats du groupe 3, la stratégie utilisée pour asservir le ballon, la conception de la nacelle, ainsi que la création de la carte électronique.

2 Cahier des charges. (Pierrot & Damien)

On peut résumer le cahier des charges par les exigences suivantes :

- Le dirigeable doit pouvoir supporter son propre poids
- La solution adaptée de doit pas comporter de servomoteurs
- Le dirigeable doit pouvoir se diriger en ligne droite d'un point à un autre
- Utilisation d'une solution à moteurs fixes
- La nacelle doit être légère
- Le dirigeable doit pouvoir conserver son altitude

En conclusion, la version finale de notre nacelle devra répondre à tous ces critères afin qu'elle puisse effectuer un déplacement entre un point A et un point B de manière autonome.

3 Etude des composants de la nacelle (Pierrot & Damien)

3.1 Liste exhaustive des composants

- 1 MCC
- 1 ESC pour MCC
- 2 machines brushless
- 2 ESC pour machines brushless
- 1 Raspberry Pi Zero 2W
- 1 SRF10
- 1 BNO055
- 1 carte électronique (faite maison)
- 1 batterie
- 1 PCA9685

3.2 Commande des actionneurs

Dans cette sous-section on présentera les solutions de contrôle des moteurs à l'aide de variateurs de vitesse électroniques, ou "ESC".

ESC pour les moteurs Brushless Ils ont pour fonction de commander les moteurs brushless à notre place, on leur communique la consigne en PWM. On observe un défaut sur un des deux ESC, on a pu cependant le compenser en adaptant la commande. Ce défaut peut se modéliser avec assez de précision par une erreur affine, cela peut traduire un défaut de programmation de l'ESC.

ESC pour la MCC Nous avons dans un premier temps considéré l'utilisation d'un ESC THOR14, mais celui-ci ne fonctionne pas. Nous nous sommes donc rabattus sur l'ESC du système natif, mais celui-ci n'était pas fonctionnel. Finalement, nous avons utilisé un hacheur déjà sur une carte, le ACM298NS. Celui ci permet effectivement le contrôle de la vitesse de rotation du moteur de lacet de façon réversible.

PWM Pour contrôler les différents ESC, on utilise une carte générant des signaux à rapports cycliques variables, variant de 0 à 100%. Cela nous permet de manipuler à la fois les ESC en contrôlant la largeur d'impulsion et le Hacheur en contrôlant le rapport cyclique.

Schéma global Finalement, on implémentera l'électronique de puissance comme présenté sur le schéma en figure 3. Tous les modulateurs de puissance seront alimentés en parallèle par la batterie de 7.2V.

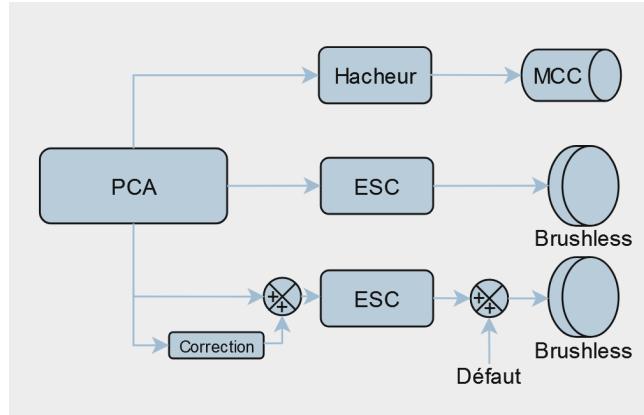


FIGURE 3 – Schéma de commande des moteurs

3.3 Acquisition

Capteur d'orientation. Afin de diriger le ballon, il est nécessaire de connaître sa direction courante. Pour ce faire, on utilise le gyroscope et le magnétomètre intégrés au BNO055. Le BNO055 communique avec la carte électronique via le protocole I2C. La carte électronique lit ainsi en permanence les valeurs d'angle que le BNO055 effectue par rapport à sa position initiale. Les données du gyroscope et du magnétomètre sont directement croisées dans le capteur, de sorte que les informations récupérées sont utilisables sans post-traitement important.

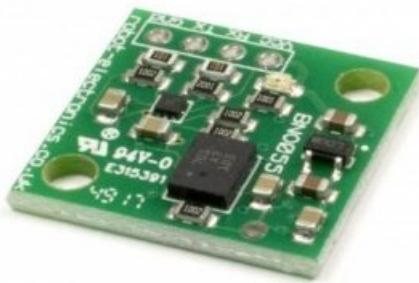


FIGURE 4 – Capteur d'orientation BNO055

Capteur d'altitude Pour éviter que le ballon ne s'approche trop du sol et ne s'écrase, la nacelle est équipée d'un SRF10, un télémètre à ultrason dirigeé ici vers

le sol afin de connaître l'altitude. La carte communique avec le capteur via le protocole I2C : la carte demande une mesure, le capteur prend la mesure, et la carte peut lire le résultat dans la mémoire du capteur. Cependant, le SRF10 n'est pas toujours très fiable : des valeurs aberrantes peuvent apparaître, ce qui nécessite un post-traitement assez important. On peut ainsi effectuer plusieurs mesures successives et prendre la médiane des valeurs d'altitude récupérées. Cependant les mesures étant relativement lentes (65ms) ce genre de solution est limité, puisque pour un asservissement efficace il faut que les données soient prises en compte le plus souvent possible.



FIGURE 5 – Télémètre ultrason SRF10

4 Stratégie d'asservissement (Pierrot, Damien, Noah, Loïs, Bastien)

Il est nécessaire d'effectuer deux asservissements pour que le ballon puisse se déplacer de façon autonome d'un point A à un point B. Tout d'abord un asservissement au niveau de l'altitude puis ensuite un asservissement au niveau de l'orientation du ballon. Ces deux asservissements nous garantissent que le ballon sera toujours dans la bonne direction à la bonne hauteur.

4.1 Asservissement en altitude (Noah).

A partir du capteur à ultrasons il est possible de récupérer l'altitude du ballon à un instant t . Pour maintenir le ballon il est alors nécessaire de définir une altitude minimale et une altitude maximale.

Ainsi lorsque la ballon dépasse l'altitude maximale on active le moteur vertical en inverse pour faire descendre le ballon.

Et lorsque le ballon est en dessous de l'altitude minimale alors on active le moteur vertical pour le faire remonter. Plus le ballon sort de la plage d'altitude voulue plus il sera nécessaire d'activer le moteur.

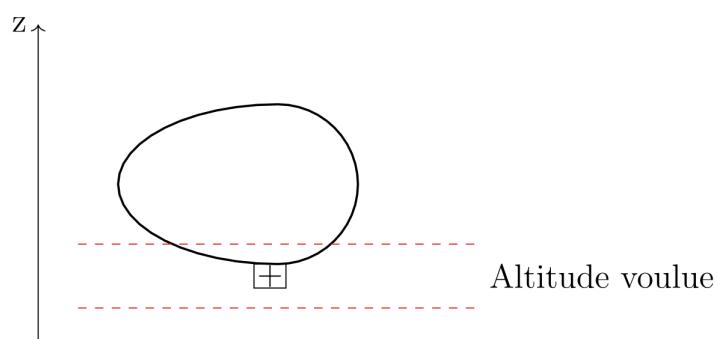


FIGURE 6 – Schéma de l'asservissement en altitude.

Cet asservissement nécessite donc plusieurs tests afin de déterminer quelle puissance mettre aux moteurs en fonction de la différence entre l'altitude voulue et l'altitude actuelle.

4.2 Asservissement en orientation.(Loïs, Noah, Bastien)

On note α l'angle formé par l'orientation initiale du ballon et la position des capteurs. Connaissant la position $(x(t), y(t))$ à l'instant t du ballon à l'aide de capteurs (ultrasons par exemple) on en déduit :

$$\tan(\alpha) = \frac{x(t) - x_{balise}}{y_{balise} - y(t)} \implies \alpha = \arctan\left(\frac{x(t) - x_{balise}}{y_{balise} - y(t)}\right)$$

Ainsi l'angle α est connu à chaque instant.

On introduit également θ qui représente l'angle entre l'orientation initiale du ballon et son orientation à l'instant t .

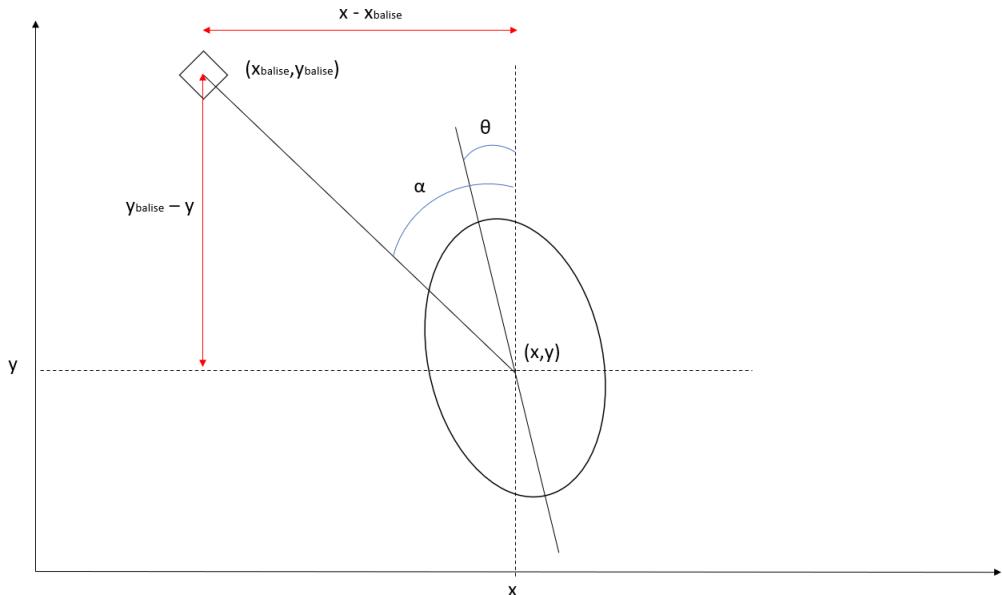


FIGURE 7 – Position et orientation du dirigeable

L'objectif est de contraindre la direction du ballon (angle θ) de la sorte :

$$\alpha - \epsilon_\alpha \leq \theta \leq \alpha + \epsilon_\alpha$$

Pour cela, on utilise un correcteur de type PID.

Pour déterminer la valeur des coefficients de notre correcteur il sera alors nécessaire d'effectuer des test sur le ballon. Un premier test à effectuer sera de mettre la ballon à une position fixe puis de modifier son orientation et d'observer la réaction du MCC à l'arrière. Il nous sera alors possible de modifier les valeurs des gains

pour modifier la réaction du moteur.

Algorithm 1: Correcteur PID

Input: r (consigne), y (mesure), K_p (gain proportionnel), K_i (gain intégral), K_d (gain dérivatif), T (période d'échantillonnage)

Output: u (signal de commande)

```

1 Function PID( $r, y, K_p, K_i, K_d, T$ ) :
2    $e \leftarrow r - y;$ 
      // Erreur
3    $P \leftarrow K_p \cdot e;$ 
      // Terme proportionnel
4    $I \leftarrow I + K_i \cdot e \cdot T;$ 
      // Terme intégral
5    $D \leftarrow K_d \cdot \frac{e - e_{\text{préc}}}{T};$ 
      // Terme dérivatif
6    $u \leftarrow P + I + D;$ 
      // Signal de commande
7    $e_{\text{préc}} \leftarrow e;$ 
      // Mise à jour de l'erreur précédente
8   return  $u;$ 

Data: Initialisation :  $I \leftarrow 0$ ,  $e_{\text{préc}} \leftarrow 0$ 
9 while true do
10    $u \leftarrow \text{PID}(r, y, K_p, K_i, K_d, T);$ 
11    $y \leftarrow \text{ReadProcessVariable}();$ 
      // Lire la nouvelle mesure
12    $\text{ApplyControlSignal}(u);$ 
      // Appliquer le signal de commande
13    $\text{Wait}(T);$ 
      // Attendre la période d'échantillonnage
  
```

5 Conception de la nacelle (Quentin, Mathieu, Noah).

5.1 Description de la solution :

L'avantage principal de la solution retenue pour notre groupe est sa facilité d'implémentation sur le ballon. Les deux hélices fixes ne demandent aucune utilisation de servo-moteur et permettent de réduire au maximum la complexité du système final tout en garantissant une mobilité complète (haut/bas/avant/arrière/rotation). C'est pourquoi la nacelle proposée initialement ne possédait qu'un mat au bout duquel se positionnerait l'hélice verticale, et un bloc pouvait être fixé sur le mat pour positionner l'hélice horizontale. Cette solution permettait en effet de respecter les critères demandés, cependant elle posait un certain nombres de problèmes que nous avons dû ajuster par la suite.

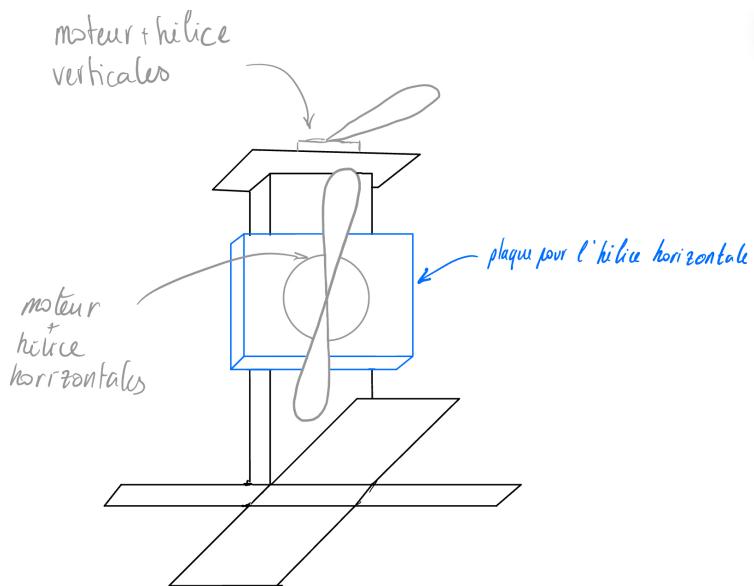


FIGURE 8 – Nacelle initiale

5.2 Problèmes posés par l'hélice horizontale :

Tout d'abord, les hélices retenues pour l'utilisation sur la solution retenue étaient plus grandes qu'initialement prévues. Ainsi, l'espace laissé entre la base de la nacelle et la base de l'hélice verticale n'était pas suffisamment important pour pouvoir disposer l'hélice horizontale. La solution de facilité aurait été d'agrandir le mat tenant les hélices, mais cette proposition ne pouvait être retenue. En effet, agrandir le mat pose deux principaux problèmes. Premièrement, cela risque de

changer le centre de gravité du ballon, surtout en considérant les instruments positionnés dessus, chose que l'équipe mécanique nous a explicitement demandé d'éviter. Mais surtout, ayant une hélice en son extrémité, la moindre rotation du ballon provoquerait une poussée non-purement verticale, et l'agrandissement du mat aurait pour conséquence la création d'un moment plus important, et donc une certaine instabilité provoquée par les deux hélices. C'est pourquoi il nous fallait réduire autant que possible la taille du mat tout en conservant les deux hélices.

5.3 Solution trouvée :

Les deux hélices ne pouvant se chevaucher, il faut trouver un moyen de réduire la taille de l'hélice horizontale. Pour cela, nous nous sommes inspirés de la solution constructeur qui proposait une plus petite hélice à 10 pales entreposées dans un cylindre. N'ayant pas besoin d'une poussée horizontale très importante, nous pouvions tout à fait nous contenter de cette solution pour cette hélice. De plus, elle permet d'éviter les perturbations provoquées par l'hélice horizontale sur celle verticale grâce au cylindre. Enfin, elle permet surtout de pouvoir positionner les hélices l'une au-dessus de l'autre tout en optimisant la place occupée.

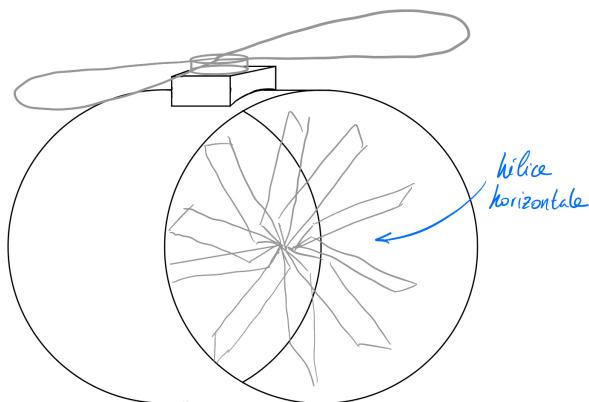


FIGURE 9 – Disposition étudiée

5.4 Structure du cylindre :

Le principal problème de l'utilisation d'un cylindre est le fait que ce dernier peut flétrir à cause de la poussée de l'hélice verticale sur ce même cylindre. C'est pourquoi il ne pouvait constituer en lui-même une base solide et fiable. L'utilisation de soutiens était donc de mise. Une première colonne fut donc positionnée

le long de l'axe de poussée de l'hélice verticale afin de conduire aussi bien que possible la force exercée par cette dernière vers la base de la nacelle. De plus, une tige relativement fine pour des questions d'économie de masse, a été fixée orthogonalement à la colonne afin d'éviter au mieux les effets de flexion qui pouvaient être causés par l'hélice verticale. D'autant plus que la présence de ces renforts permet d'éviter un second problème qui sont les vibrations dans la structure. En effet, la solution initiale était particulièrement sujette aux vibrations induites par la rotation des hélices du fait du bloc simplement fixé sur le mat. Notre solution permet donc d'éviter ce défaut grâce à sa structure très solidaire et compact.

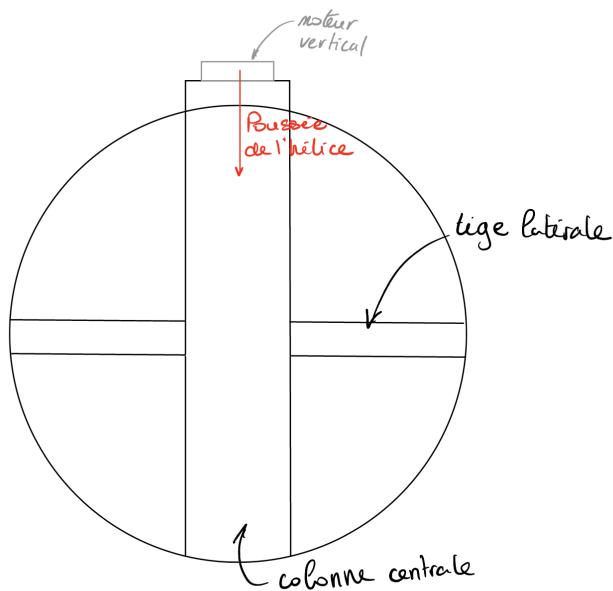


FIGURE 10 – Structure du cylindre

5.5 Optimisation de la masse embarquée :

L'ajout d'éléments pour l'hélice horizontale pose cependant un problème qui est celui de la limite de masse que peut transporter le ballon. Le but étant d'éviter autant que possible d'avoir à faire fonctionner le moteur pour repositionner le ballon en altitude, il nous faut respecter la limite de masse embarquée imposée par le ballon. Ainsi, la géométrie des bras de la nacelle est en partie creuse, ce qui réduit considérablement la masse du système, sans pour autant fragiliser la structure.

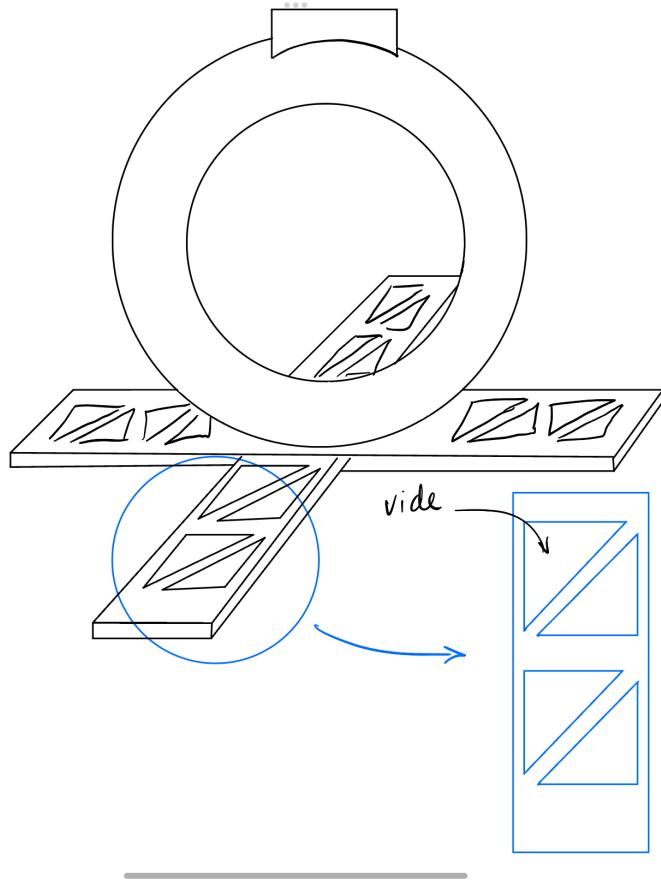


FIGURE 11 – Bras de la nacelle

5.6 Prise en compte des éléments de fonctionnement :

Enfin, le dernier point important concerne les éléments de guidage et d'alimentation qui vont être disposés sur la nacelle : la batterie, la carte électronique et le système de repérage. L'objectif est de choisir des emplacements appropriés afin de ne pas déstabiliser le ballon, tout en s'assurant que les flux d'air des pales ne soient pas perturbés. La solution naturelle consiste donc à positionner la batterie et la carte électronique de part et d'autre de l'hélice horizontale, sur les côtés des cylindres. Pour cela, on utilise la géométrie des bras notre nacelle pour créer des maintiens pour ces éléments. Quant au système de repérage, il sera fixé à l'aide de colliers de serrage en plastique sur l'avant notre structure.

5.7 Conclusion :

Pour conclure, nous sommes partis d'une solution aussi simple que possible qui nous a permis d'effectuer des tests afin de discerner les défauts qu'elle possédait.

Le but de notre travail était donc de corriger un à un ces défauts, tout en optimisant les solutions afin de respecter le cahier des charges en terme de mobilité, de stabilité, de masse embarquée et de transport du matériel.

5.8 Conception sur Fusion360. (Noah)

Après avoir déterminé où placer les moteurs et comment sur la nacelle, il est nécessaire de modéliser la nacelle sur un logiciel afin de pouvoir l'imprimer. Pour ce faire on a utilisé le logiciel Fusion360. La nacelle est composée de 5 pièces :

- La base, qui permet d'être fixé au dirigeable.
- Un support, pour fixer un des moteurs.
- Les pales, que l'on fixe à un moteur.
- La fixation de la carte électronique, que l'on fixe à la base.
- La fixation de la batterie, que l'on fixe aussi à la base.

Base	Support	Pâles	Fixation carte	Fixation batterie

TABLE 1 – Modélisation des 5 pièces sur Fusion360.

On peut alors placer toutes les pièces pour observer l'allure de la nacelle.

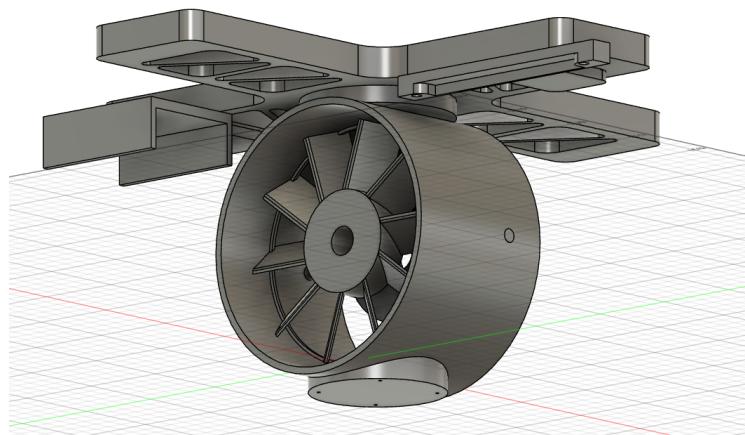


FIGURE 12 – Modélisation de la nacelle.

Comme expliqué dans la partie précédente, les moteurs sont fixés en dessous de la nacelle ainsi que dans le support fixé aux pâles.

Après impression on a alors pu fixer toutes les pièces et monter la nacelle sur le dirigeable.

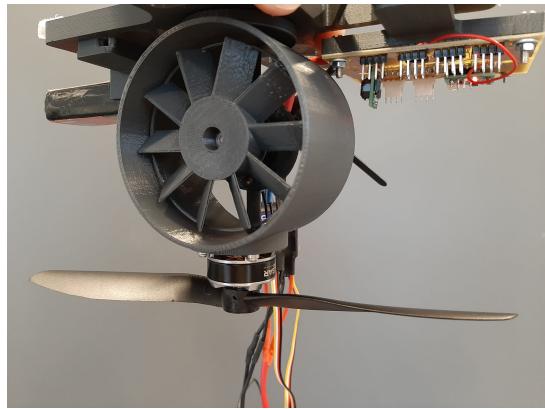


FIGURE 13 – Photo de la nacelle imprimée.

Les avantages de cette nacelle sont donc bien vérifiés. En effet, on n'observe pas de basculement, la nacelle est très légère,

6 Conception de la carte électronique (Romain & Louis)

6.1 Objectifs

6.1.1 Contexte

La conception de la nacelle du ballon dirigeable fait appel à différents domaines de compétences de l'ingénierie. Une séparation des tâches a donc été effectuée afin de remplir chacun des objectifs de la conception. Ainsi la conception mécanique, celle de la commande, l'étude de l'asservissement ainsi que la réalisation de la carte électronique ont été réparties au sein du groupe. C'est sur cette dernière que nous avons travailler durant la quasi totalité du semestre.

6.1.2 Problématique

La réalisation de cette carte était au centre de la conception électronique, des contraintes mécaniques liées au placement physique de la carte sur la nacelle, ainsi que des dispositions visant à simplifier le travail du sous-groupe commande. Nous

devions réaliser une carte fonctionnelle permettant de lier tous les composants électroniques. Elle se devait d'être compacte, et facilement fixable sur la nacelle. La problématique fut alors de se former pour la résolution du problème avant d'entammer la conception, puis la construction.

6.2 Démarche de réalisation

6.2.1 Formation EAGLE et soudage

La première des étapes était d'acquérir le savoir faire permettant de concevoir la carte, sur le logiciel EAGLE d'Autodesk, qui permet d'une part de réaliser le cablage électrique puis de préparer le typon qui permet de fabriquer la carte. Nous avons donc suivi la formation organisée par Fabien ADAM et Pascal VAROQUI. Celle ci consistait en la réalisation d'une petite carte simple en partant du schéma électrique et allant jusqu'au soudage des composants.

6.2.2 Création du schéma électrique

Un fois la formation terminée il nous a fallu déterminer le montage électrique nécessaire au bon branchement de chaque composant, à savoir :

- La batterie
- Le régulateur de tension
- La carte Raspberry Pi Zero
- Le capteur ultrason
- La centrale inertuelle
- Les différents moteurs ainsi que leurs variateurs

Le branchement est détaillé sur notre poster et a été réalisé grâce au groupe commande. Nous avons ensuite dû s'assurer de la conformité du schéma en analysant les datasheets de chaque composant en cherchant les éventuels problèmes.

6.2.3 Implantation du schéma dans EAGLE et rootage de la carte

Lors du report du schéma dans EAGLE, il a fallu trouver la version numérique de chaque composant, et importer si nécessaire les composants inexistant sur les bibliothèques en ligne (au nombre de deux).

Une fois cette étape terminée, la dernière étape de CAO a été de rooter la carte, c'est à dire de définir l'agencement physique des composants sur la carte, des connecteurs adaptés pour les composants ne se greffant pas directement sur la

carte et enfin des connections électriques. Les connexions électriques incluent l’agencement des pistes de cuivre conductrices, des ‘via’, permettant de créer un passage pour le courant d’un coté à l’autre de la carte et enfin la réalisation du plan de masse.

Une multitude de contraintes s’additionnent donc pour donner un challenge d’agencement nous ayant pris plusieurs séances pour terminer le rootage.

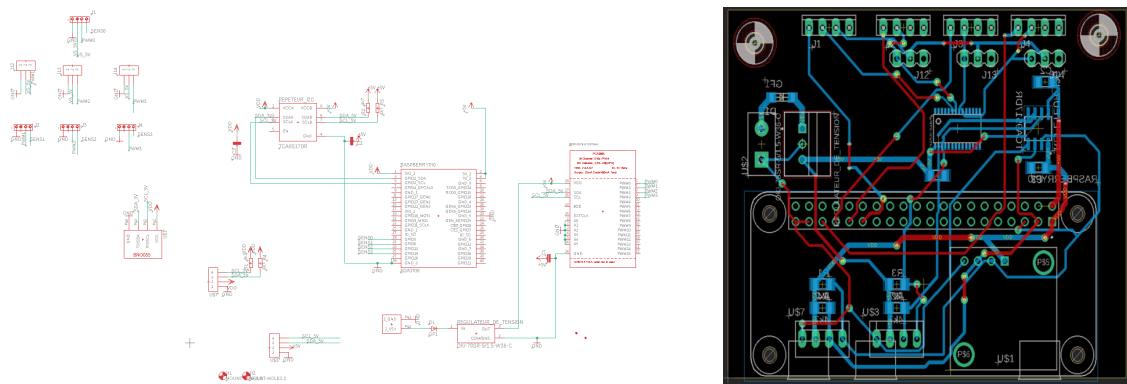


FIGURE 14 – Schéma électrique et rootage de la carte dans EAGLE

6.2.4 Fabrication et soudage de la carte

La dernière étape a été l'impression du typon afin de fabriquer la carte. La fabrication se fait au moyen d'une technique chimique : on part d'une carte en plastique recouverte de cuivre puis de résine photosensible des deux côtés, sur laquelle on place le typon. On place ce dispositif dans une machine exposant l'exposant aux UV, ce qui va retirer la résine aux endroits exposés. On utilise ensuite de la soude pour dissoudre le cuivre : partout où la résine a été retirée le cuivre l'est aussi. Ainsi on obtient l'agencement du cuivre, sur lequel on doit maintenant réaliser les vis, pour faire communiquer les deux côtés de la carte. Ce sont des perçages dans lesquels on inserte de l'étain que l'on soude. Il faut également percer les trous pour la fixation mécanique de la carte, et ceux permettant de fixer les gros composants.



FIGURE 15 – Percage et soudage des vias

On réalise enfin les soudages des connecteurs et des composants, que l'on fixe avec des vis et des entretoises pour les plus volumineux. Il a également fallu souder l'alimentation, pour la batterie et les moteurs, après les avoir fabriqués avec des câbles, connecteurs et gaines thermocollantes.

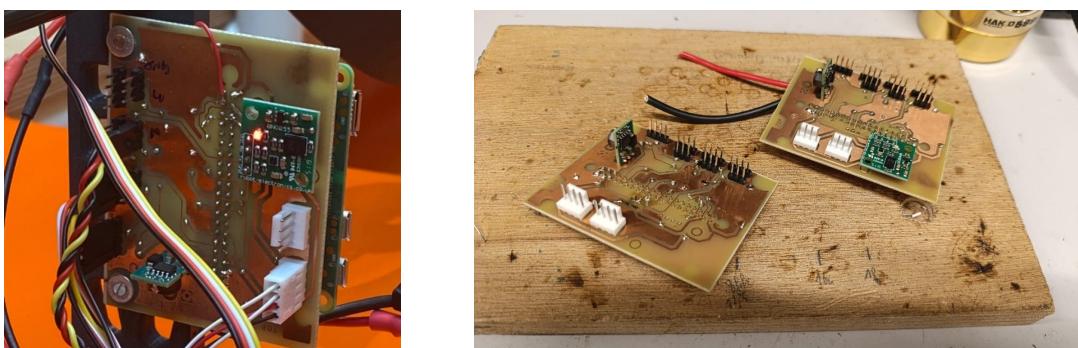


FIGURE 16 – Carte terminée

7 Implémentation et essais de l'asservissement. (Pierrot, Damien, Noah)

L'implémentation de l'asservissement se fera sur python. Avant de pouvoir effectuer les tests il est nécessaire de connaître la caractéristique des moteurs. En effet, connaître cette caractéristique pourra nous permettre de déterminer les paramètres de nos correcteurs.

7.1 Caractéristique des moteurs utilisés (Pierrot, Damien, Noah)

Pour déterminer la caractéristique des deux moteurs et de leur pâles l'expérience a été de placer le moteur sur une balance puis de mesurer la différence de masse observée sur cette balance lorsque l'on active le moteur. Pour le premier moteur, le moteur nous permettant de modifier l'altitude du dirigeable on a alors trouvé :

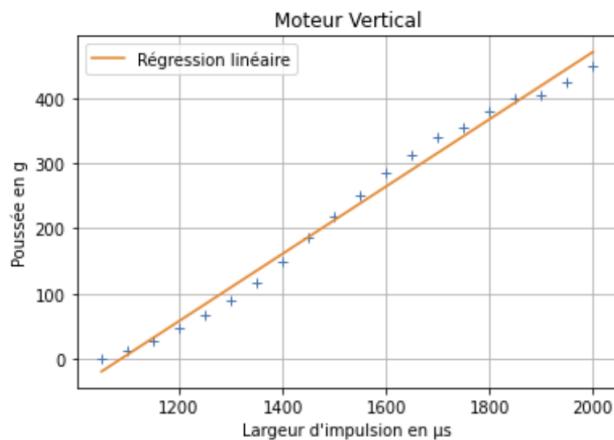


FIGURE 17 – Caractéristique du moteur vertical.

En faisant tourner le moteur dans l'autre sens on observe sensiblement les mêmes résultats aux erreurs de mesures prêt.

Pour le second moteur, le moteur permettant de faire avancer le dirigeable. On utilise les pâles imprimées en 3D que l'on fixe sur le moteur. La force de poussée

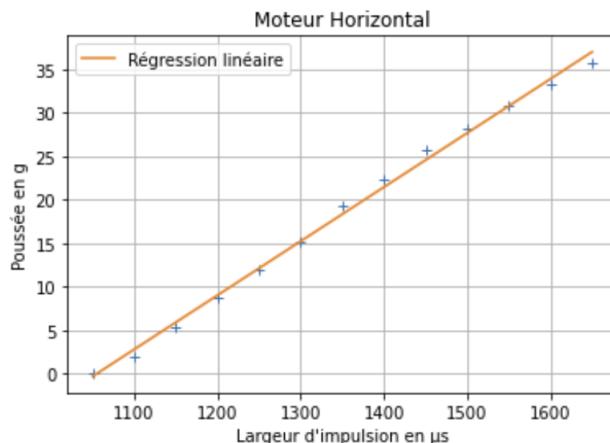


FIGURE 18 – Caractéristique du moteur vertical.

est moins importante que pour le premier moteur puisque les pâles sont plus

petites mais ce n'est pas un problème car la force de poussée nécessaire pour faire avancer le ballon n'est pas très élevée.

On observe que pour les deux moteurs et leur pâles la caractéristique est linéaire en fonction de la largeur d'impulsion. Ce résultat est parfaitement cohérent. Il est désormais possible de passer aux expériences pour déterminer les coefficients des asservissements.

7.2 Asservissement en altitude. (Noah)

Après avoir testé notre asservissement et trouvé les valeurs pour la puissance du moteur on peut faire plusieurs observations. Tout d'abord, on remarque que lorsque l'on active le moteur vertical à la puissance maximale alors le ballon reste stable et ne pivote pas. De plus, puisque notre nacelle est légère alors il est possible de la lever pour qu'elle soit à la limite du poids qu'il est possible de porter. Par conséquent l'utilisation de l'asservissement en altitude n'est que très rare.

7.3 Asservissement en orientation.(Pierrot & Damien)

Il est nécessaire de plus tester l'asservissement en orientation avant de pouvoir tirer des conclusions et de présenter les résultats obtenus. Cependant d'après les premiers résultats obtenus, cet asservissement sera suffisant dans le cadre du projet puisqu'il permettra au dirigeable d'effectuer des demi-tours mais aussi de se déplacer d'un point A à un point B.

7.4 Utilisation de la caméra.

Une caméra afin que le dirigeable se repère sera ajoutée au montage. Elle repérera des "Apriltag" positionné sur le sol de l'ENS. Par faute de temps elle n'a pas pu être testée sur le dirigeable avant la date butoire de rendu du rapport.

8 Conclusion.

En conclusion notre solution présente de nombreux avantages, en effet le fait qu'il n'y ait pas de servomoteurs facilite l'implémentation de l'asservissement. De plus la solution est très légère et particulièrement stable. Les asservissements sont suffisants dans le cadre de notre étude, et permettent le bon fonctionnement du dirigeable. Enfin la nacelle est fonctionnelle et permet bien au dirigeable de se déplacer de façon autonome. Afin d'améliorer le dirigeable il serait possible de

repenser la conception de la nacelle afin que celle-ci intègre directement une place pour la carte électronique. Cela la rendrait encore plus légère qu'elle ne l'est déjà. Diminuer de nouveau le poids de la nacelle pourrait nous permettre de tester la deuxième solution de localisation qui demande le transport d'une balise d'environ 80g. Cette deuxième solution n'est pas pratique dans notre cas car trop lourde. En effet, cela entraînerait une utilisation constante du moteur vertical afin de rester au dessus de l'altitude seuil. Une étude d'autres types d'asservissements pour l'orientation du dirigeable pourrait aussi être faite, car le correcteur PID ne permet pas d'avoir un pilotage de l'orientation parfaitement stable, et il peut y avoir des problèmes au niveau de l'angle 0° ou 360° et le dirigeable peut effectuer des demi-tours sans aucunes raisons.

9 Bibliographie

- Modélisation 3D : <https://www.autodesk.fr/solutions/fusion-360-3d-modeling>
- Github du projet : <https://github.com/bruno2nis/cobra>
- Datasheet de la raspberry : <https://www.raspberrypi.com/documentation/>
- Datasheet de la caméra raspberry : <https://www.raspberrypi.com/products/camera-module-v2/>
- Datasheet des moteurs Brushless : https://shop.pichler.de/Brushless-Motor-PULSAR-Shocky-Pro-2204-1400-KV_1

10 Annexes

10.1 Géométrie et physique du dirigeable (Noah).

Liste des paramètres physique et géométrique :

(a,b,c) dimensions du dirigeable (en m)

a = 1.182m ; b = 0.592m ; c = 0.811m

ρ_{He} : Masse volumique de l'hélium dans le dirigeable (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

$\rho_{He} = 0.1785 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

m_d : Masse totale du dirigeable (en kg)

S_{tot} : Surface totale du dirigeable (en m)

m_{He} : Masse d'hélium (en kg)

$m_S = \frac{m_d}{S_{tot}}$: Masse surfacique du dirigeable (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

On cherche à calculer la matrice d'inertie du dirigeable que l'on modélise de cette manière :

$$\begin{cases} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 & \text{si } x \geq 0 \\ \frac{x^2}{c^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 & \text{si } x \leq 0 \\ z^2 + y^2 = b^2 \end{cases}$$

où a,b et c sont les dimensions du dirigeable

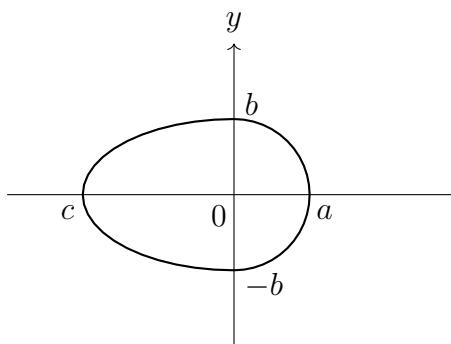


FIGURE 19 – Modélisation du dirigeable de profil

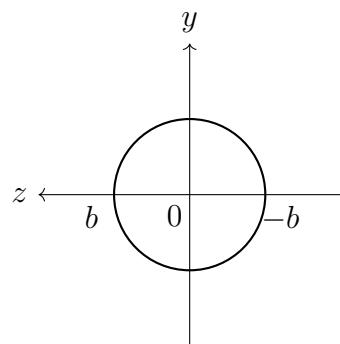
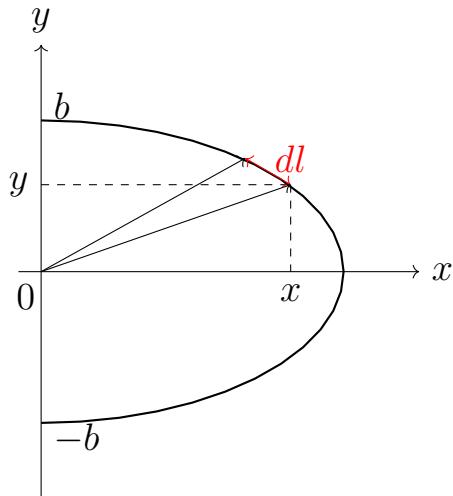


FIGURE 20 – Modélisation du dirigeable de face

10.2 Calcul de la surface du dirigeable (Noah)

On connaît la masse m_d du dirigeable. Calculons donc la surface totale du dirigeable. Nous allons intégrer en faisant varier l'angle θ entre 0 et $\frac{\pi}{2}$. Il suffit donc de trouver un lien entre dl et $d\theta$.



Après calcul on obtient comme formule pour la surface d'une demi-ellipse de révolution de longueur c et de rayon b :

$$S_c = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi b \sqrt{1 - \frac{b^2}{c^2(\frac{b^2}{c^2} + \tan^2(\theta))} + \frac{b^4}{c^4} \frac{1}{\frac{b^2}{c^2} + \tan^2(\theta)}} \frac{b \tan(\theta)}{\cos^2(\theta)(\frac{b^2}{c^2} + \tan^2(\theta))^{\frac{3}{2}}} d\theta$$

De même pour la demi-ellipse de longueur a :

$$S_a = \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi b \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2(\frac{b^2}{a^2} + \tan^2(\theta))} + \frac{b^4}{a^4} \frac{1}{\frac{b^2}{a^2} + \tan^2(\theta)}} \frac{b \tan(\theta)}{\cos^2(\theta)(\frac{b^2}{a^2} + \tan^2(\theta))^{\frac{3}{2}}} d\theta$$

Numériquement :

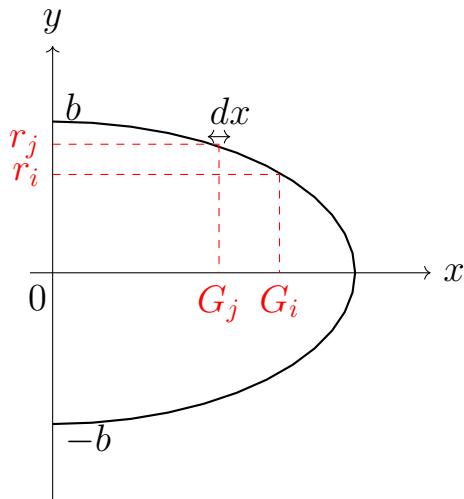
$$[S_c = 2.76m^2] \text{ et } [S_a = 3.76m^2]$$

Donc : $S_{tot} = S_a + S_c = [6.52m^2]$.

10.3 Calcul de la matrice d'inertie d'une demi-ellipse (Noah)

Pour calculer la matrice d'inertie du dirigeable, on calcule d'abord les matrices d'inerties de tous les cylindres infiniment fins entre 0 et c .

On utilise ensuite la formule de Huyghens pour les déplacer au point O.



Après calcul on obtient :

$$I_{O_c} = \frac{\rho_{He}\pi b^2 c}{15} \begin{pmatrix} 2b^2 & 0 & 0 \\ 0 & b^2 + c^2 & 0 \\ 0 & 0 & b^2 + c^2 \end{pmatrix}$$

De la même manière pour l'autre demi-ellipse on obtient :

$$I_{O_a} = \frac{\rho_{He}\pi b^2 a}{15} \begin{pmatrix} 2b^2 & 0 & 0 \\ 0 & b^2 + a^2 & 0 \\ 0 & 0 & b^2 + a^2 \end{pmatrix}$$

Donc la matrice d'inertie du dirigeable en O est :

$$I_O = I_{O_c} + I_{O_a}$$

$$\Rightarrow I_O = \frac{\rho_{He}\pi b^2}{15} \begin{pmatrix} 2b^2(c+a) & 0 & 0 \\ 0 & b^2(c+a) + a^3 + c^3 & 0 \\ 0 & 0 & b^2(c+a) + a^3 + b^3 \end{pmatrix}$$

D'après la formule de Huyghens :

$$I_G = I_O + m_{He} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\frac{3}{8}(c-a))^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\frac{3}{8}(c-a))^2 \end{pmatrix}$$

AN :

$$I_{Gxx} = 0.0183 \text{ kg.m}^2 \text{ et } I_{Gyy} = I_{Gzz} = 0.0428 \text{ kg.m}^2$$

10.4 Calcul du centre d'interie du dirigeable (Bastien).

Etant donné les symétries du ballon, on déduit que le centre de gravité à pour coordonnées dans le repère (O,x,y,z) : $G(x_G, 0, 0)$ avec $x_G = \frac{1}{M_{tot}} \cdot \int \int \int \rho_{helium} x dV$ (*) où x est la distance séparant l'élément infinitésimal de volume dV au point O selon l'axe x. On a $M_{tot} = \int \int \int \rho_{helium} dV = V_{calotte} \cdot \rho_{helium}$

Ainsi, on a :
$$\begin{cases} M_{calotte1} = \frac{2}{3}\pi ab^2 \rho_{helium} \\ M_{calotte2} = \frac{2}{3}\pi cb^2 \rho_{helium} \end{cases}$$

10.4.1 Centre de gravité des deux demi-ellipses.

On prend pour élément de volume dV un disque d'épaisseur infinitésimale dx et de rayon $r(x) = b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}$

Ainsi, on a $dv = \pi r(x)^2 dx = \pi b^2(1 - \frac{x^2}{a^2}) dx$

$$x_G = \frac{1}{M_{tot}} \cdot \int \int \int \rho_{helium} x dV = \rho_{helium} \int_0^a \pi b^2(1 - \frac{x^2}{a^2}) x dx = \frac{1}{4} \rho_{helium} \pi b^2 a^2$$

Donc on a :

$$x_{G1} = \frac{-3}{8}a$$

Donc pour la deuxième ellipse on a :

$$x_{G2} = \frac{3}{8}c$$

Finallement, le centre de gravité selon x de l'ensemble Calotte1 + Calotte2 a pour expression :

$$x_G = \frac{1}{\rho_{helium} V_{tot}} (x_{G1} \rho_{helium} V_{calotte1} + x_{G2} \rho_{helium} V_{calotte2})$$

$$x_g = \frac{3}{8}(c - a)$$

AN : $x_G = -142\text{mm}$

10.4.2 centre de gravité de l'enveloppe

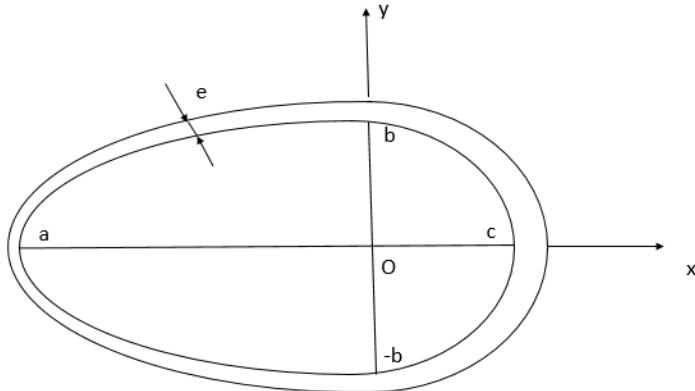


FIGURE 21 – modèle du ballon avec enveloppe

L'épaisseur de la coque est supposé constante égale à $e = 100\mu m$. On peut alors calculer le centre de gravité de la coque :

$$x'_G = \frac{3}{2} \frac{\left(\frac{e}{2} + \frac{2b}{3}\right)(a^2 - c^2)}{2(2(b+e)^2 + 4ab + ae + ce)}$$

Application numérique :

$$x'_G = -128\text{mm}$$

10.4.3 Centre de gravité de l'ensemble ballon + enveloppe

Le centre de gravité total se trouve par la formule :

$$x_{Gtot} = \frac{1}{M_{tot}}(M_{coque}x'_G + M_{ballon}x_G)$$

avec $M_{tot} = V_{coque}\rho_{coque} + V_{helium}\rho_{helium} = \rho_{coque}\left(\frac{2}{3}\pi(b+c)^2(a+c+2e) - \frac{2}{3}\pi b^2(a+c)\right) + \frac{2}{3}\pi b^2(a+c)\rho_{helium} \approx 275\text{g}$

Ainsi, on obtient :

$$x_{Gtot} = -140\text{mm}$$

10.5 Modélisation du ballon sous CATIA (Loïs)

On souhaite déterminer la matrice d'inertie du ballon (hélium + enveloppe) ainsi que ses caractéristiques géométriques. Pour cela nous avons construit un

volume d'hélium dans une enveloppe de 0,1 mm en polyuréthane à partir des longueurs fournies par le constructeur.

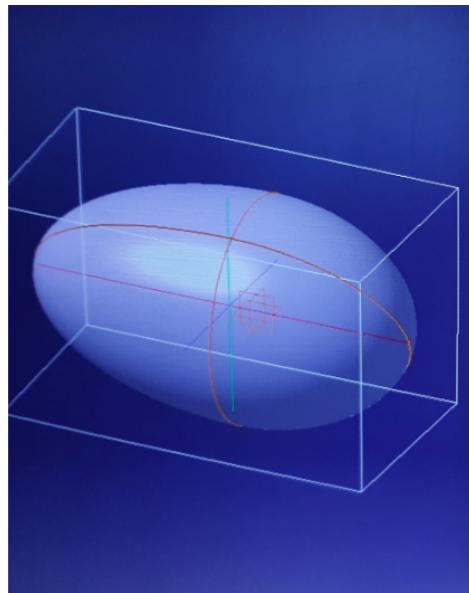


FIGURE 22 – Vue 3D du ballon sous CATIA

On obtient alors les moments d'inerties suivants :

Matrice d'inertie / G					
I_{xxG}	$0,077 \text{ kgxm}^2$	I_{yyG}	$0,039 \text{ kgxm}^2$	I_{zzG}	$0,077 \text{ kgxm}^2$
I_{xyG}	$7,47e-019 \text{ kgxm}^2$	I_{xzG}	$1,533e-022 \text{ kgxm}^2$	I_{yzG}	$-4,582e-012 \text{ kgxm}^2$
Moments principaux / G					
M_1	$0,039 \text{ kgxm}^2$	M_2	$0,077 \text{ kgxm}^2$	M_3	$0,077 \text{ kgxm}^2$

FIGURE 23 – Matrice d'inertie du ballon

On remarque que la matrice d'inertie est bien diagonale comme en témoigne la symétrie du ballon. De plus, les moments d'inerties sont du même ordre de grandeur que l'étude analytique mais avec des valeurs supérieures de part la présence de l'enveloppe.

On a également pu déterminer le volume d'hélium nécessaire pour remplir le

ballon, ainsi que sa surface (utile pour les études aérodynamiques), sa masse, et son centre de gravité :

Résultats		
Mode de calcul : Exact		
Type :	Volume	
Caractéristiques		
Volume	1,421m ³	Centre de gravité (G)
Aire	6,418m ²	Gx 0mm
Masse	0,254kg	Gy -142,875mm
		Gz -1,008e-008mm

FIGURE 24 – Caractéristiques géométriques du ballon

On obtient une valeur de l'aire très proche du résultat analytique ($6,52 \text{ m}^2$). Les coordonnées du centre de gravité sont également proche du résultat analytique (-140 mm selon l'horizontale).

10.6 Étude de la vitesse du dirigeable à altitude constante (Loïs)

On décide dans cette partie d'étudier la loi de vitesse horizontale du dirigeable lorsqu'il suit une trajectoire verticale afin d'en déduire sa vitesse maximale, son temps de réponse, et de manière plus générale son profil de vitesse. On travail pour cela à vitesse de rotation des moteurs fixe.

On effectue le bilan des forces s'appliquant au dirigeable :

- Force de poussée dont la modélisation et les coefficients proviennent de l'équipe propulsion à hélice : $\alpha\Omega^2 - \beta\Omega\dot{x}$

- Force de frottement fluide : $-\frac{1}{2}\rho C_x S \dot{x}^2$

Ainsi, le principe fondamental de la dynamique projeté selon l'horizontal donne :

$$m\ddot{x} = \alpha\Omega^2 - \beta\Omega\dot{x} - \frac{1}{2}\rho C_x S \dot{x}^2$$

Analytiquement, on peut en déduire l'expression de la vitesse maximale (vitesse pour laquelle l'accélération devient nulle) :

$$V_{max} = \Omega \frac{\sqrt{\beta^2 + 2\rho C_x S \alpha} - \beta}{\rho C_x S}$$

Afin de déduire le profil de vitesse ainsi que le temps de réponse à 5%, il est nécessaire de mener une résolution numérique, l'équation du principe fondamental dynamique étant dans notre cas non linéaire.

Après implémentation sur Python, on obtient alors le profil de vitesse suivant :

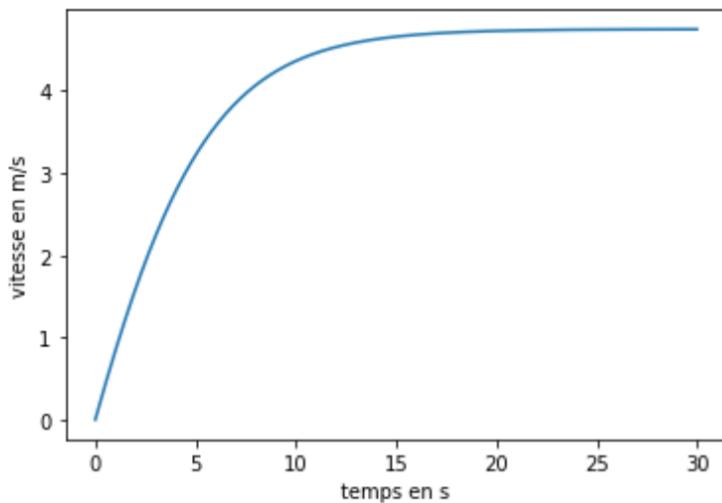


FIGURE 25 – Profil de vitesse

Le calcul numérique du temps de réponse donne $t_{5\%} = 11,7\text{s}$ et la vitesse maximale vaut $V_{max} = 4,75 \text{ m/s}$.