

**école  
normale  
supérieure  
paris-saclay**

ENS PARIS-SACLAY

208  
PROJET PLURIDISCIPLINAIRE

RAPPORT FINAL

---

**CoBRA**

---



**Élèves :**

Arthur WARWICK  
Salma BAIRAT  
Ibrahim EL KASSIMI  
Antoine HUET  
Antoine TRENTIN  
Ferdinand DELAUNE  
Gauthier MARANDE  
Ukäne TROHMAE

**Enseignants :**

Anthony JUTON  
Fabien ADAM  
Bastien DURAND  
Bruce ANGLADE

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Mécanique du système</b>	<b>2</b>
2.1	Propulsion du dirigeable . . . . .	2
2.1.1	Choix des moteurs et variateurs . . . . .	2
2.1.2	Test des moteurs . . . . .	3
2.1.3	Disposition des moteurs sur le dirigeable . . . . .	4
2.2	Structure de l'embase du système . . . . .	5
2.3	Alimentation . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Système de préhension</b>	<b>7</b>
3.1	Étude du système existant . . . . .	7
3.1.1	Les treuils . . . . .	8
3.1.2	Les pinces . . . . .	8
3.2	Solutions proposées . . . . .	9
3.2.1	Le treuil . . . . .	9
3.2.2	La pince . . . . .	10
3.3	Conclusion et solution retenue . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Électronique</b>	<b>12</b>
4.1	Protocole i2C . . . . .	12
4.2	Carte électronique . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Commande des moteurs</b>	<b>13</b>
5.1	Générateur de PWM - le PCA9685 . . . . .	13
5.2	Moteurs brushless . . . . .	14
5.3	Machines à Courant Continu (MCC) . . . . .	14
5.4	Commande via ordinateur ou via manette PS4 . . . . .	15
<b>6</b>	<b>Localisation</b>	<b>16</b>
6.1	Objectif . . . . .	16
6.2	Notations . . . . .	16
6.3	Détermination de la position du dirigeable ( $x_d, y_d, z_d$ ) à l'aide de la caméra V3 Wide et des AprilTags . . . . .	17
6.4	Détermination de l'altitude du dirigeable $z_d$ . . . . .	18
6.5	Détermination de l'orientation du dirigeable . . . . .	18
<b>7</b>	<b>Asservissement</b>	<b>19</b>
7.1	Objectifs . . . . .	19
7.2	Modèle d'asservissement . . . . .	19
7.3	Trajectoire . . . . .	19
7.4	Descente du treuil . . . . .	20
7.5	Mise en place pendant la dernière semaine (en cours) . . . . .	20
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>20</b>

# 1 Introduction

Face au regain d'intérêt pour la mobilité douce et sobre permise par les dirigeables, nous souhaitons en concevoir un capable de suivre un parcours de façon autonome et de déposer un colis précisément.

Ce projet consiste en la réalisation de différents systèmes. Il devra comprendre une solution de propulsion, une technologie de préhension, ainsi qu'un ensemble de composants d'électronique embarquée composé entre autres de capteurs permettant la localisation pour asservir le dirigeable dans ses mouvements.

Le dirigeable étant rempli d'un volume fini d'hélium, la masse qu'il peut sustenter, étant donnée la masse de son enveloppe, est limitée. C'est pourquoi la contrainte de minimisation de la masse est présente à chaque étape de conception des différents sous-systèmes. En effet, le dirigeable ne peut recevoir une masse embarquée de seulement **600g**. Le surplus de masse pourra être compensé par une poussée verticale mais entraînera un surcoût de consommation en énergie.

# 2 Mécanique du système

## 2.1 Propulsion du dirigeable

L'objectif du projet est de larguer un colis sur une cible à l'aide du dirigeable, c'est pourquoi, la mécanique du système doit permettre au ballon de se déplacer dans toutes les directions de l'espace avec précision. Pour valider ce critère, une estimation de chaque section a été établie. Il a été retenu de ne pas dépasser une masse de **400g** pour la propulsion du dirigeable. Le choix de la solution a donc été d'associer légèreté et simplicité de contrôle.

### 2.1.1 Choix des moteurs et variateurs

Un premier travail de recherche s'est concentré sur le dimensionnement des moteurs. Les anciennes versions de dirigeables proposaient des moteurs pesant **34g** avec 1200 rotations par minute par volt (figure 1a).

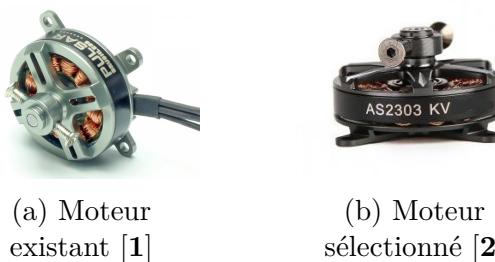


FIGURE 1 – Solutions de motorisation

L'ancienne solution était composée de variateurs unidirectionnels.

Pour évaluer et dimensionner les moteurs, il a été nécessaire de caractériser la force que doit exercer un moteur pour déplacer au maximum le ballon à une vitesse de **3km/h** (cf tableau 1 il s'agit du critère le plus contraignant pour le dimensionnement du moteur). Ainsi, en appliquant



FIGURE 2 – Variateur sélectionné

le second principe de la dynamique projeté selon l'axe  $\vec{e}_x$ , on obtient :

$$F = \frac{F_{trainée}}{2} \text{ avec } \begin{cases} F_{trainée} = C_x \frac{1}{2} \rho V_{air}^2 S_{ref} \\ C_x = 0.04 \\ S_{ref} = V^{2/3} \text{ V correspond au volume de l'enveloppe} \end{cases}$$

Ce qui donne :  $F_{trainée} = 1.35 \text{ N}$

Cela signifie donc que le couple hélice/moteur doit respecter une force de poussée minimale de 1,35 N. L'hélice retenue, étant la plus petite possible, a un diamètre de 0,127m. Cela permet donc d'établir le couple ainsi que la vitesse de rotation nécessaire pour respecter le cahier des charges tableau 1.

Cahier des charges	Critère	Niveau
Vitesse	minimum	3 km/h

TABLE 1 – Dimensionnement couple moteur-hélice

Finalement, il a fallu coupler des moteurs respectant ce critère de force de poussée, jumelés avec des variateurs capables de les commander dans les deux sens de rotation et les plus légers possible. La solution retenue a donc été des moteurs pesant 17g (figure 1b) avec une rotation de 2300 tour/V. De surcroît, notre solution se voulant d'avoir des moteurs bidirectionnels, nous avons fait le choix de variateurs le permettant (figure 2) :

L'assemblage de chaque moteur avec son hélice (5x5) et son variateur pèse désormais 29g.

### 2.1.2 Test des moteurs

Après avoir estimé théoriquement la force nécessaire pour remplir un critère du cahier des charges (tableau 1). Il a fallu définir expérimentalement la force de poussée de la paire moteur/hélice dans différents cas. En effet, il fallait caractériser l'influence du sens du flux d'air sur la force de poussée (sachant que les moteurs allaient être sollicités dans les deux sens). Le schéma expérimental est visible fig.3.

Le tableau suivant (tableau 2) référence les différents cas possibles permettant de caractériser l'influence du sens de l'hélice et du flux d'air perturbé par le moteur. Chaque test précise le sens de l'hélice (par rapport à l'axe  $\vec{e}_z$  vertical orienté vers le haut), si la balance travaille en compression ou en traction (par rapport à l'orientation de la force qui est de sens opposé au flux d'air) et si le moteur est dans le flux d'air ou non.

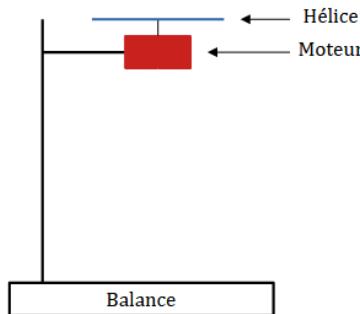


FIGURE 3 – Schéma expérimental du test des moteurs

Hélice 5x5	Sens hélice (selon $\vec{e}_z$ )	Balance	Moteur dans flux d'air	Poussée (g)
1	$+ \vec{e}_z$	Compression	Oui	190
2	$- \vec{e}_z$	Traction	Non	-125
3	$- \vec{e}_z$	Compression	Non	130
4	$+ \vec{e}_z$	Traction	Oui	-175

TABLE 2 – Test poussée couple moteur-hélice

Le travail de la balance en compression est plus pertinent car celui en traction signifie qu'une partie du flux d'air est directement dirigée sur le plateau de la balance et donc une partie de la poussée s'annule. Par ailleurs, il est intéressant de noter que l'hélice est plus performante lorsqu'elle tourne dans le sens du pas (il faudra le prendre en compte dans la commande et l'asservissement du dirigeable). En effet, on observe près de 60g de poussée de différence en fonction du sens de rotation de l'hélice par rapport au signe de son pas. Enfin, les calculs de dimensionnement des moteurs se révèlent pertinents car l'hélice pousse 190g ce qui correspond à une force de 1,9 N > 1,35 N.

### 2.1.3 Disposition des moteurs sur le dirigeable

Le dirigeable doit être capable de se déplacer sur une étendue et viser une zone de largage. Ainsi, la solution de propulsion doit pouvoir assurer un déplacement précis et contrôlé du dirigeable en sachant qu'il présente une inertie assez importante, le rendant difficilement maniable. Il doit également pouvoir atteindre une vitesse maximale suffisante pour traverser la zone rapidement. C'est pourquoi la disposition retenue pour les moteurs est celle représentée en figure 4 :

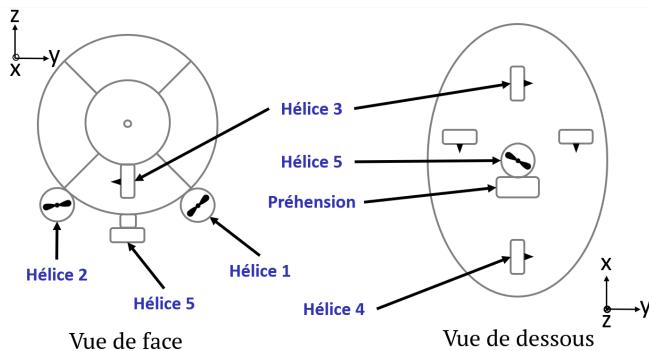


FIGURE 4 – Emplacement des différents propulseurs

Le moteur central (cf figure 4, moteur 5) assure le contrôle de l'altitude du ballon. Comme une série de tests (cf tableau 2) nous garantissent la capacité du moteur à soulever une masse de

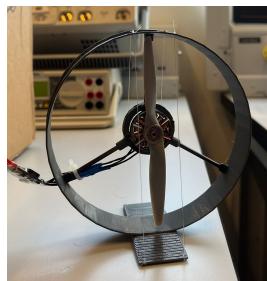


FIGURE 5 – Solution retenue pour les propulseurs numérotés de 1 à 4 en figure 4

100g, la stratégie retenue a donc été de surcharger le ballon pour le faire descendre sous l'effet de la gravité et commander l'actionneur pour maintenir une altitude constante (contraint ainsi le poids du système).

Les moteurs (cf fig.figure 4, moteurs 1 et 2) garantissent l'avance du dirigeable mais également la rotation autour de l'axe Z lorsque le flux d'air est opposé (cf fig.). Cependant, lors de la commande simultanée des deux moteurs pour l'avance du dirigeable, le couple engendré par la rotation des hélices fait dévier le dirigeable. C'est pourquoi les deux hélices sont équipées d'un pas opposé pour avoir un couple lié à la rotation des hélices nul.

Les deux moteurs à l'avant et à l'arrière (cf figure 4, moteurs 3 et 5) du dirigeable offrent la possibilité de se déplacer selon l'axe  $e_y$ . La translation selon cet axe n'est pas à privilégier dans le cadre d'un déplacement rapide pour se rendre à un point de la zone. Son but principal est de garantir la mobilité du ballon pour se placer de manière précise au-dessus de la cible. En effet, la capacité de translater selon l'axe  $e_y$  lui évite de devoir tourner pour se replacer. La paire de moteurs est également équipée d'une paire d'hélices avec les pas opposés pour éviter tout déplacement lié à la rotation des hélices qui pourrait engendrer un couple.

## 2.2 Structure de l'embase du système

Dans notre solution, une structure centrale fixée à l'extrémité inférieure du dirigeable doit accueillir le système de préhension, la solution de propulsion verticale ainsi que différents capteurs, les cartes électroniques ainsi que la batterie. On a donc conçu un support en impression 3D permettant de recevoir tous les éléments.

Encore une fois, cette solution se devait d'être extrêmement légère. La solution retenue ne fait que 26g.

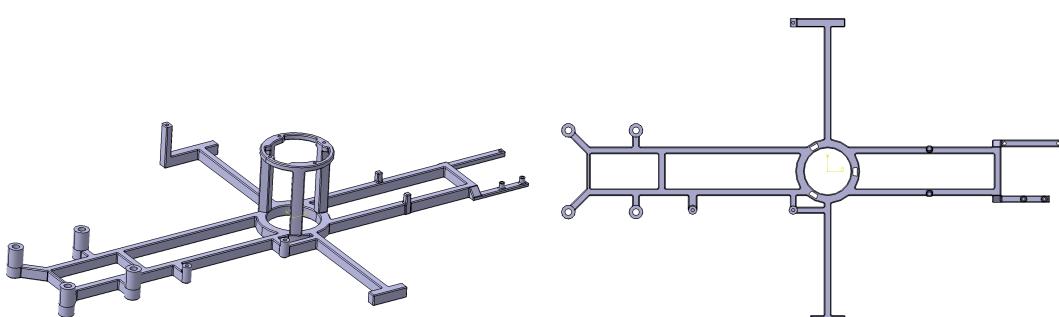


FIGURE 6 – Capture de la structure centrale – logiciel CATIA

On peut y voir différents emplacements :

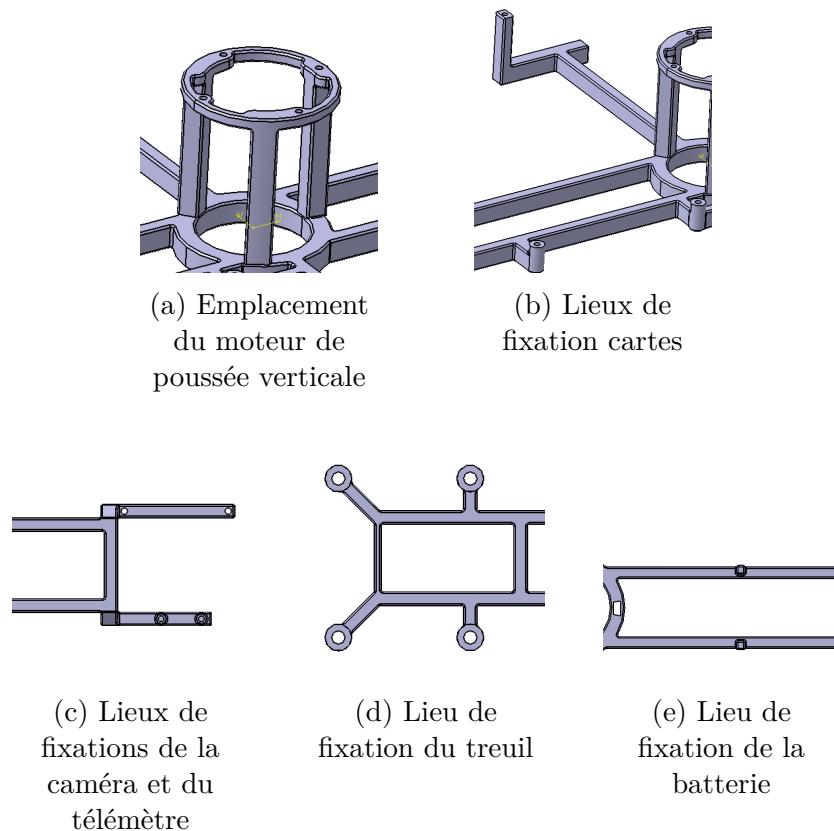


FIGURE 7 – Détail des parties de la structure centrale

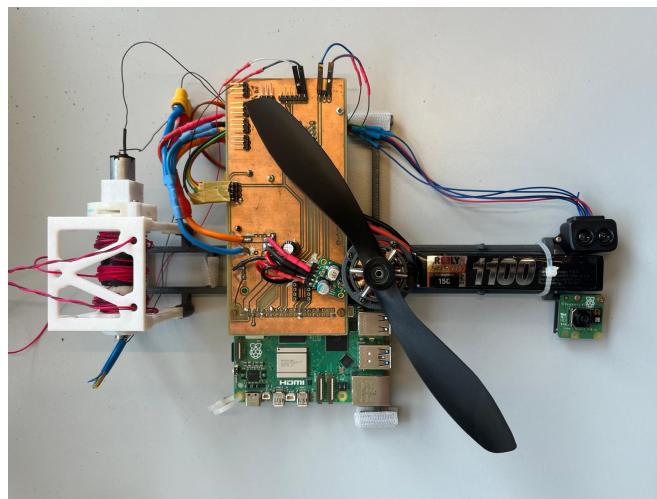


FIGURE 8 – Support centrale avec les éléments

Les quatre extrémités de la croix permettent via du ruban auto-agrippant de fixer cette structure au dirigeable.

### 2.3 Alimentation

L'ancienne solution retenue était une batterie de 1800mAh délivrant une tension de 7,4V et pesant 104g. Une optimisation de la masse de la batterie était nécessaire compte tenu du choix des nouveaux moteurs. Ainsi, le besoin en alimentation a été défini en relevant le courant maximal requis pour alimenter les moteurs. Sachant que la solution comprend 5 moteurs brushless, 2

moteurs à courant continu et d'une Raspberry PI 5, il s'est montré nécessaire de choisir une batterie capable de délivrer au maximum un courant de 27A à une tension de 7,4V. La solution finale est donc présentée en figure 9. La batterie pèse 55.7g.



FIGURE 9 – Batterie [4]

### 3 Système de préhension

L'objectif de la partie préhension du projet CoBRA est de concevoir un mécanisme permettant la récupération et le dépôt d'un colis. Ce système devra s'intégrer à l'architecture globale du dirigeable retenu par l'équipe.

On décrit ci-dessous le cahier des charges retenu :

- colis : environ 10 g, percé pour faciliter la préhension



FIGURE 10 – photo du colis retenu

- course verticale : 1 m
- temps de descente / remontée : environ 10 s
- poids du système global : dépend des solutions retenues pour les autres parties du dirigeable, mais environ 60 g

#### 3.1 Étude du système existant

Contrairement aux parties de cinématique de vol ou de commande de vol, nous partions de zéro, sans pouvoir nous appuyer sur les travaux des étudiants des années précédentes. Nous avons donc recherché des solutions existantes dans le milieu industriel ou celui de la recherche afin de poser les bases de nos futures solutions.

Nous sommes parti sur la même subdivision de la partie préhension que le projet de la start-up *Flying Whales*. (figure 11) : une solution combinant un treuil et une pince. Le treuil est en effet un moyen simple, peu coûteux et peu encombrant permettant l'enroulement / déroulement de

câbles. Dans notre cas, il permettrait la descente / remontée d'une pince qui attraperait un colis au sol et le maintiendrait entre ses bras durant le trajet vers le point de dépôt.

### 3.1.1 Les treuils

Dans l'industrie, l'utilisation du treuil pour dérouler un câble pesant est courante et en général, ce treuil est fixé sur le bâti. Dans d'autres cas, il est embarqué dans le système notamment pour les nacelles de nettoyage de gratte-ciel. (figure 11). Nous étudierons alors ces deux propositions pour déterminer la plus adéquate pour notre problème.



FIGURE 11 – Différentes solutions industrielles pour le treuil.

### 3.1.2 Les pinces

Si la technologie de treuil est plutôt universelle, il existe de nombreux moyens de concevoir une pince : deux groupes de solutions ont émergé : les pinces s'ouvrant et se fermant de manière **mécanique** et les pinces pilotées par un moteur **électrique**.

**Pince mécanique** Dans l'optique de réaliser le système le plus léger possible, il nous semblait intéressant de chercher une solution sans aucun système électrique extérieur (moteur, câbles, batterie). Une pince s'ouvrant et se fermant grâce à une cinématique adaptée semblait alors envisageable, quoique complexe.

Le principe des pinces mécaniques est que le système utilise le poids de la charge pour se refermer. Nous avons retenu deux types de mécanismes totalement différents : les pinces pantographe qui utilisent une structure en losange auto-serrante (figure 12a) et les pinces à tôle universelles qui utilisent des rouleaux excentrés.



(a) pince pantographe proposé par *INGENITEC*      (b) pince à tête proposé par *REMA*

FIGURE 12 – Solutions industrielles de pince mécanique

**Pince à contrôle électrique** Dans l’optique de réaliser un prototype plus fiable et commandable, nous avons décidé de nous intéresser à une technologie de pince utilisant un système électrique pour commander l’ouverture et la fermeture de la pince.

Un exemple de solution proposée par *MAKEBLOCK* (figure 13) est de mettre en translation une pièce de la pince via un système vis-écrou afin de forcer l’ouverture / fermeture de la pince.



FIGURE 13 – Pince électrique *MAKEBLOCK*

## 3.2 Solutions proposées

### 3.2.1 Le treuil

Deux solutions sont à considérer pour le treuil : il est possible de **fixer le treuil** au dirigeable et d’enrouler / dérouler les fils aux bouts desquels est fixé la pince, ou alors de **fixer les fils** au dirigeable et de faire en sorte que le treuil monte et descende en enroulant / déroulant le tambour autour des fils.

Nous avons envisagé le fait de placer le treuil en suspension, de sorte à ce que l’on puisse écarter les fils pour offrir plus de stabilité vis-à-vis des oscillations du dirigeable. De plus, cette solution est souvent retenue dans le cas où l’on a beaucoup de fils lourds car dans ce cas la partie en mouvement est réduite et ne travaille pas contre le moteur. Seulement, la solution du treuil embarqué pose aussi le problème de couple nécessaire au moteur du treuil pour soulever non seulement la pince, mais aussi son propre poids ! On se retrouve alors dans un cercle vicieux où l’on cherche à minimiser le rapport poids/puissance des moteurs. Ce rapport est à notre désavantage pour des petits moteurs comme dans notre système. De surcroît, les fils utilisés ont une masse négligeable ( $3 \times 0.3g.m^{-1}$ ) devant le moteur (12g), donc leur puissance développée est quasi-nulle. Enfin, plus les fils sont écartés pour être stables, moins ils tirent la masse vers le haut donc plus

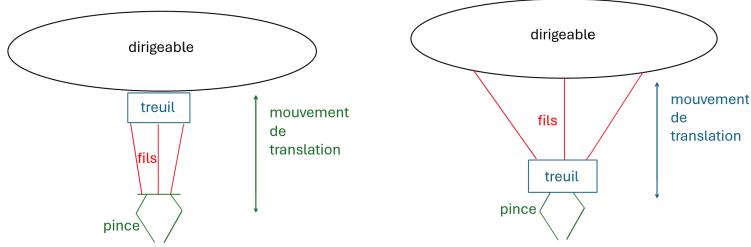


FIGURE 14 – schéma des 2 solutions envisagées

il faut un moteur puissant et gros. Finalement, à cause du critère numéro 1 de notre système (le poids) on gardera la solution du treuil fixé sur le dirigeable.

### 3.2.2 La pince

On a réfléchi à des solutions pour chacune des deux technologies (mécanique et électrique).

**Pince mécanique** On présente ci-dessous nos solutions de pinces mécaniques :

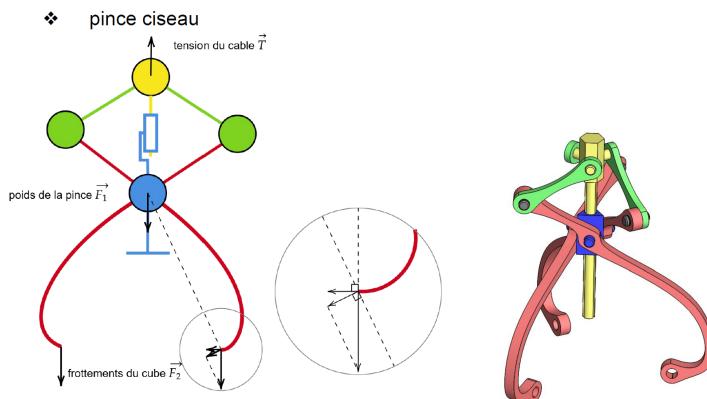


FIGURE 15 – Principe de fonctionnement d'une pince pesante

Le principe de la première pince mécanique (figure 15) est que le coin du losange qui reprend les efforts du treuil varie en fonction de la montée / la fermeture (solide jaune) et de la descente / l'ouverture (solide bleu) de la pince. Ainsi, en montée la pince se ferme naturellement et à l'inverse pour la descente. Le principal problème de cette solution est que son efficacité varie avec son poids : plus la pince est lourde plus son serrage est fort. Seulement, le poids reste un critère crucial qu'il nous faut absolument réduire. On ne retiendra alors pas cette solution.

La deuxième pince mécanique (figure 16) consiste à prendre le colis par adhérence avec 3 rouleaux qui se referment sur le colis à force d'être entraîné par celui-ci. Enfin, un troisième fil qui entraînerait la remontée manuelle des trois rouleaux simultanément permettrait de libérer le colis à tout moment. Cette solution a démontré de bonnes capacités de maintien et de préhension et notamment la capacité de capturer le colis sans ouverture manuelle. Cependant, l'adhérence entre le rouleau et le colis, le poids de ces rouleaux, leur excentricité et leur écartement sont plein de paramètres qui dépendent fortement du colis. C'est pour cela que nous avons à contre cœur renoncé à développer cette solution.

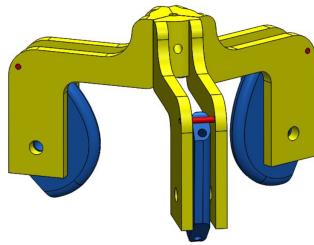


FIGURE 16 – prototypes de pinces mécaniques envisagées

**Pince électrique** Nous avons aussi proposé une solution de pince électrique :

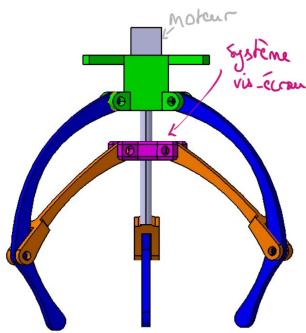


FIGURE 17 – schéma du fonctionnement de la pince

Celle-ci est, contrairement à la *MAKEBLOCK*, composée de 3 bras pour s'assurer que leur fermeture capture bien le colis. La fermeture et l'ouverture de ces bras se font par l'intermédiaire de trois bras inférieurs qui translatent par rapport au premier à l'aide d'un système de vis écrou. Pour ce qui est de la motorisation de ce système, on a le choix entre un moteur à courant continu ou un moteur pas à pas.

Le moteur pas à pas permet un asservissement précis de la position des bras et génère plus de couple à basse vitesse (c'est le cas pour notre pince) mais il demande une commande particulière plus complexe (donc plus de composants et donc plus de masse). Cependant, on peut calculer le couple qu'il est nécessaire de développer pour soulever la pince, afin de voir si on a besoin de mettre en place une telle motorisation :

$$C_{moteur} = P_{pince + colis} \cdot R_{treuil} = ((10 + 20) \cdot 10^{-3}) \cdot 9,81 \cdot (10 \cdot 10^{-3}) = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ N.m}$$

Le choix d'une motorisation par un **moteur à courant continu (MCC)** a finalement été choisi pour sa facilité de prise en main et de commande.

### 3.3 Conclusion et solution retenue

Nous avons donc finalement retenu la solution suivante :

- treuil fixé au dirigeable
- pince à contrôle électrique

- MCC
- impression 3D (ABS)

La solution a ensuite été modélisée sous *CATIA*, afin d'être imprimée en ABS (40 % de remplissage). On présente ci-dessous la solution imprimée et implémentée dans la structure globale du dirigeable :

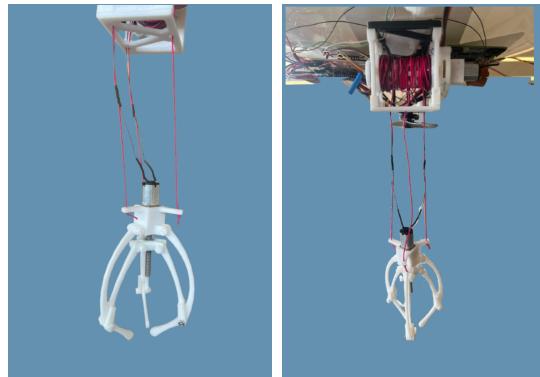


FIGURE 18 – photo du système conçu

Notre système (pince + treuil + moteurs) pèse finalement 73 g.

## 4 Électronique

### 4.1 Protocole i2C

Pour assurer la communication entre les différents composants électroniques embarqués, nous avons choisi le **protocole i2C**.

Le protocole i2C est un bus série permettant de faire communiquer entre eux un composant électronique "**maître**" et des composants électroniques "**esclaves**" grâce à deux signaux : un signal de donnée (**SDA**) et un signal d'horloge (**SCL**).

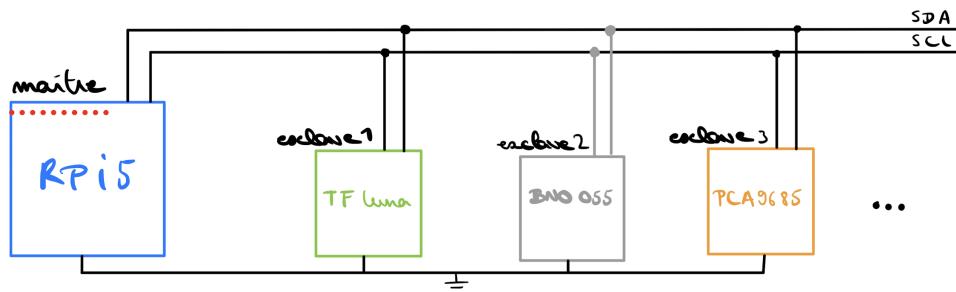


FIGURE 19 – Protocole i2C

Sur notre dirigeable, le maître est le microcontrôleur (nano-ordinateur) Raspberry Pi 5 et les esclaves sont les différents capteurs et pré-actionneurs.

Les données sont transmises par **paquets de 9 bits** :

- **Premier paquet** (9 bits) : contient uniquement l'adresse du périphérique cible (7 bits), le bit de lecture/écriture (1 bit), et le bit d'acquittement ACK envoyé par l'esclave (1 bit).
- **Deuxième paquet et les suivants** (9 bits chacun) : contiennent les octets de données envoyés ou reçus, suivis d'un bit ACK envoyé par le récepteur.

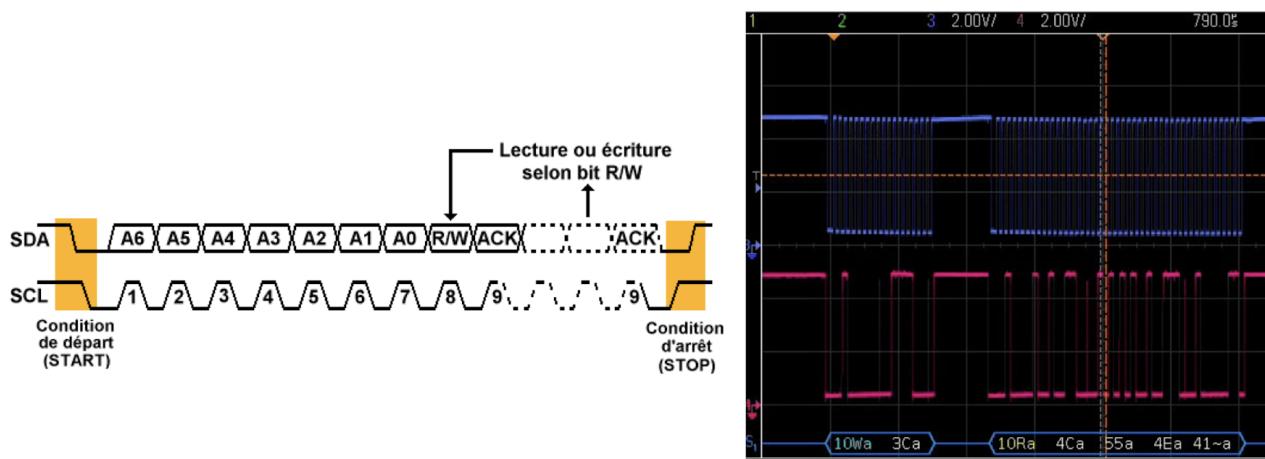


FIGURE 20 – Analyse des données d'un bus i2C (source image gauche : silanus.fr)

La valeur de chaque bit (0 ou 1) est lue sur chaque front montant du signal d'horloge (SCL).

Sur la capture de l'oscilloscope, on voit que l'on a d'abord **écrit** dans le registre 10 la donnée  $(3C)_{16} = (60)_{10}$ , puis on **lit** dans ce même registre les données  $(4C)_{16} = (76)_{10}$ ,  $(55)_{16} = (85)_{10}$ ,  $(4E)_{16} = (78)_{10}$ , et  $(41)_{16} = (65)_{10}$ .

## 4.2 Carte électronique

Pour alimenter et relier les composants d'électronique embarquée, on conçoit une carte électronique sur le logiciel **Eagle** en prenant en compte les entrées pour l'alimentation, les sorties pour les différents capteurs, pré-actionneurs et actionneurs, et les pistes les reliant entre eux.

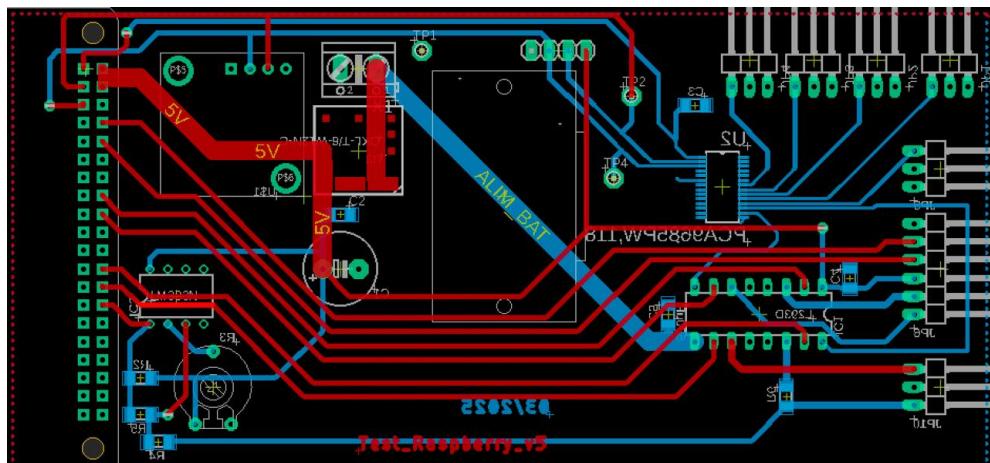


FIGURE 21 – Schéma de la carte électronique sur Eagle

## 5 Commande des moteurs

## 5.1 Générateur de PWM - le PCA9685

Pour commander des moteurs, on utilise souvent des signaux PWM (Pulse Width Modulation) dont on modifie la largeur d'impulsion pour commander la position ou la vitesse d'un moteur dans notre cas. Généralement :

- 1 ms correspond à la vitesse minimale

- 1,5 ms correspond à la **vitesse nulle**
- 2 ms correspond à la **vitesse maximale**

Pour générer ces signaux, on utilise le composant PCA9685 :



FIGURE 22 – PCA9685 (Source : lisleapex.fr)

En écrivant sur un registre du PCA9685, on peut modifier la **largeur d'impulsion** d'un signal PWM et donc modifier la **vitesse** d'un moteur.

On choisit par ailleurs une **fréquence** de PWM de **50Hz** (période de 20 ms) comme suggéré dans la documentation technique du variateur du moteur Brushless.

## 5.2 Moteurs brushless

La commande d'un moteur brushless se fait via un **variateur**.



FIGURE 23 – Moteur Brushless AS2303 (Source : intermodel.fr)

Le variateur reçoit un signal PWM du PCA9685 et met en rotation le moteur brushless à la vitesse correspondant à la largeur d'impulsion de la PWM. Pour commander efficacement les moteurs, nous avons rédigé un code informatique permettant d'écrire directement dans le registre du PCA9685 la largeur d'impulsion correspondant à la consigne en vitesse (en pourcentage de la vitesse maximale, compris entre -100% et 100%) qu'on lui demande.

Ainsi, on est capable de **commander en vitesse** les 5 moteurs brushless de notre solution à l'aide de **5 signaux PWM**.

## 5.3 Machines à Courant Continu (MCC)

La commande d'une MCC se fait via un **hacheur**.

Pour mettre en rotation la MCC, le hacheur (pont en H) a besoin de :

- un signal PWM pour la valeur absolue de la vitesse
- un premier signal logique pour le sens AVANT de rotation
- un second signal logique pour le sens ARRIÈRE de rotation

Le signal PWM sera généré par le PCA9685 comme vu précédemment. Les signaux logiques (prennent les valeurs 0 ou 1) seront générés par la Raspberry Pi 5 :

Ici aussi, pour commander efficacement les MCC, nous avons rédigé un code informatique permettant d'écrire directement dans le registre du PCA9685 et dans les sorties logiques de la Raspberry



FIGURE 24 – MCC 1210GM-06100 (Source : lextronic.fr)



FIGURE 25 – Raspberry Pi 5 (Source : raspberrypi.com)

Pi 5 afin d'obtenir la consigne en vitesse (en pourcentage de la vitesse maximale, compris entre -100% et 100%) qu'on lui demande.

Ainsi, on est capable de **commander en vitesse** les 2 MCC de notre solution à l'aide de **2 signaux PWM** et de **4 signaux logiques**.

#### 5.4 Commande via ordinateur ou via manette PS4

Les moteurs peuvent être commandés en vitesse soit sur un Terminal depuis un ordinateur portable via **connexion ssh** à la Raspberry Pi 5, soit sur une manette PS4 via **connexion Bluetooth** à la Raspberry Pi 5.

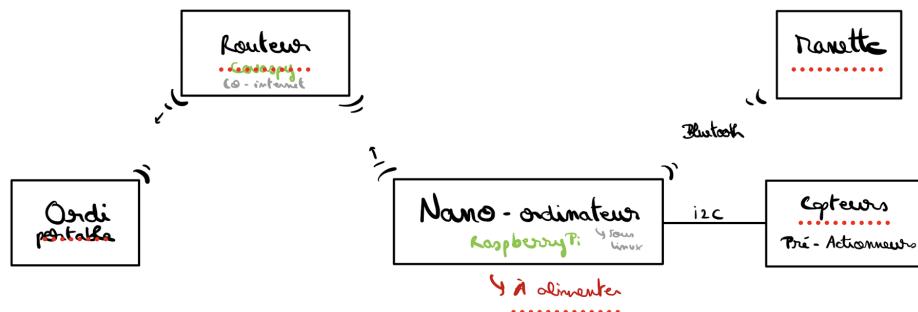


FIGURE 26 – Structure autour de la Raspberry Pi 5

Pour les deux cas de figures (nécessaires à la phase de test du dirigeable), nous avons écrits un code informatique permettant de commander les 7 moteurs de notre solutions (brushless et MCC).

## 6 Localisation

### 6.1 Objectif

L'objectif de la localisation est de déterminer en temps réel la position et l'orientation du dirigeable dans son environnement. Ces informations sont essentielles pour une navigation autonome et la récupération d'un colis à un point donné et son dépôt à un autre emplacement spécifique. Donc les grandeurs dont on a besoin sont :

### 6.2 Notations

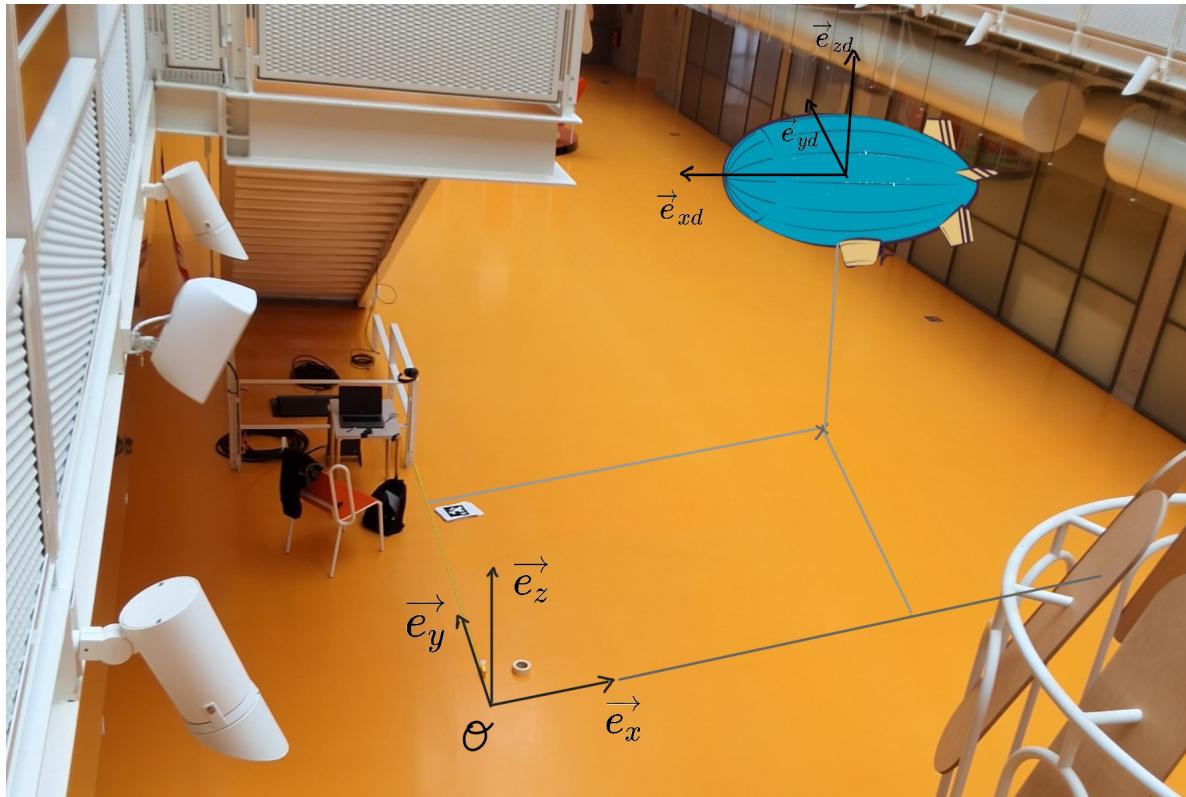
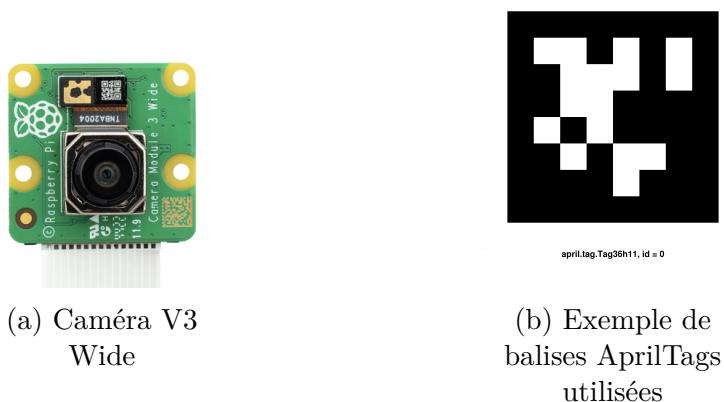


FIGURE 27 – Vue de la zone de mission

- $(\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$  : le repère associé au sol.
- $(\vec{e}_{xd}, \vec{e}_{yd}, \vec{e}_{zd})$  : le repère associé au dirigeable.
- $(x_d, y_d, z_d)$  : les coordonnées du dirigeable dans le repère du sol.
- $\psi = (\widehat{\vec{e}_{xd}}, \vec{e}_x)$  : angle de lacet.
- $\theta = (\vec{e}_{yd}, \vec{e}_y)$  : angle de roulis.
- $\phi = (\vec{e}_{zd}, \vec{e}_z)$  : angle de tangage.

### 6.3 Détermination de la position du dirigeable ( $x_d, y_d, z_d$ ) à l'aide de la caméra V3 Wide et des AprilTags



Pour localiser le dirigeable dans l'espace, nous utilisons une caméra V3 Wide montée à bord et orientée de manière à capturer l'environnement contenant plusieurs balises visuelles AprilTags placées à des positions fixes et connues dans le référentiel global.

Lorsqu'une image est capturée, un algorithme de détection (via la bibliothèque apriltag) identifie les balises visibles et en extrait leur identifiant, leur position dans l'image, ainsi que les points de contour. Grâce à la géométrie du tag et à la calibration préalable de la caméra (matrice intrinsèque, coefficients de distorsion), il est possible d'estimer la pose relative de chaque tag par rapport à la caméra, puis d'en déduire la pose de la caméra par rapport à chaque tag. En moyennant les poses obtenues à partir de plusieurs balises détectées, on obtient une estimation plus robuste de la position de la caméra dans le référentiel du sol, et donc celle du dirigeable.

Pour évaluer la précision de la localisation, nous comparons la position estimée à partir des balises AprilTags à une position de référence mesurée manuellement dans le repère du sol.

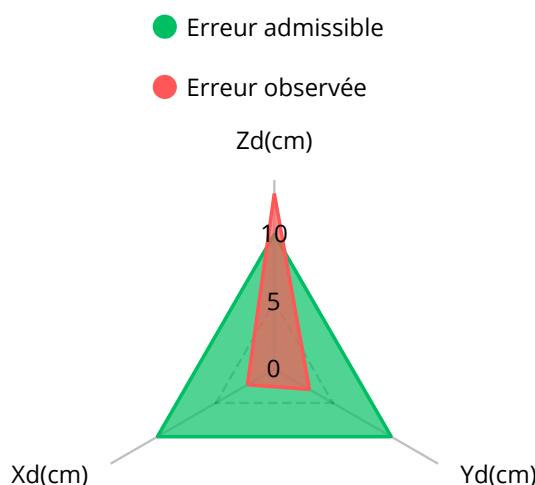


FIGURE 29 – Analyse graphique de l'erreur de localisation par rapport à la marge admissible

## 6.4 Détermination de l'altitude du dirigeable $z_d$

L'altitude estimée par la caméra ne répond pas aux exigences du cahier des charges. Pour améliorer la précision sur l'axe vertical, nous avons donc intégré un télémètre TF-Luna ainsi qu'une centrale惯uelle BNO055.

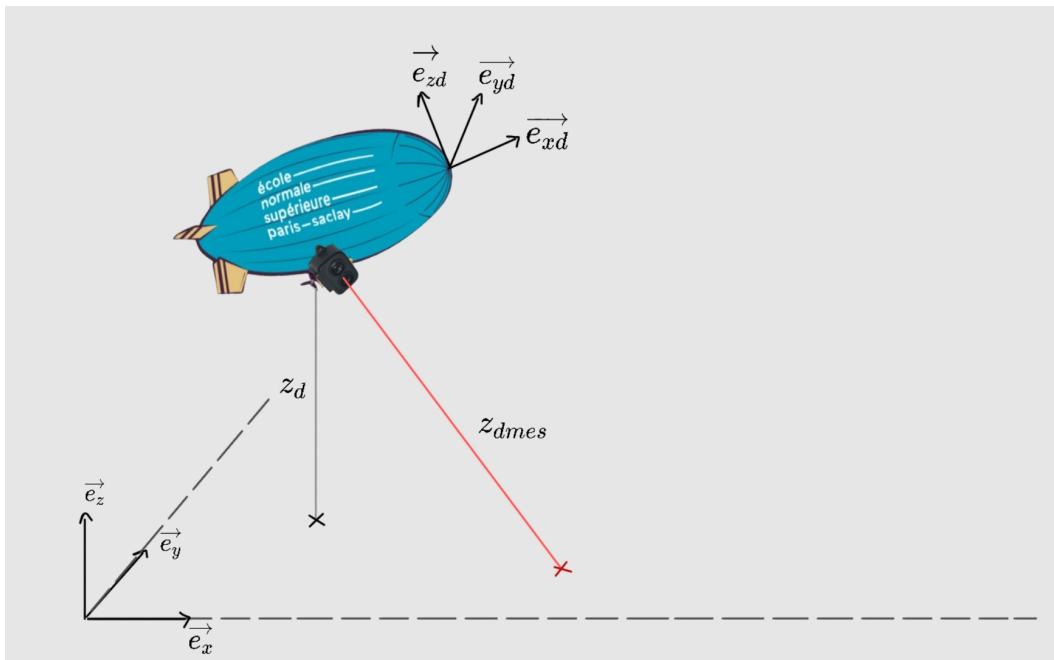


FIGURE 30 – Correction de l'altitude mesurée.

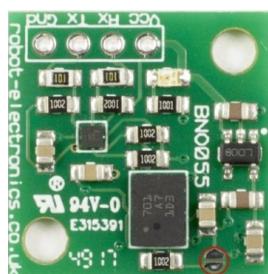
En raison de l'inclinaison permanente du dirigeable, la valeur mesurée par le télémètre ne correspond pas directement à l'altitude réelle. C'est pourquoi il est nécessaire de corriger cette mesure en tenant compte des angles de roulis et de tangage. On a 
$$z_d = z_{dmes} \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi)$$
 avec :

- $\theta$  : l'angle de roulis.
- $\phi$  : l'angle de tangage.

## 6.5 Détermination de l'orientation du dirigeable

Dans notre projet, nous utilisons la centrale惯uelle BNO055 pour obtenir l'orientation du dirigeable sous forme d'angles d'Euler : roulis ( $\phi$ ), tangage ( $\theta$ ) et lacet  $\psi$ .

Ces angles sont directement fournis par la centrale惯uelle BNO055 grâce à sa fusion de capteurs intégrée, sans nécessiter de traitement externe.



## 7 Asservissement

### 7.1 Objectifs

Une fois que les moteurs sont pilotables individuellement et que le dirigeable est contrôlable avec une manette de PS4, l'objectif est de le rendre **autonome**. On veut à terme que le dirigeable puisse se diriger vers la zone de chargement et qu'il y reste statique. Une fois cette partie effectuée, le treuil se déroule puis la pince récupère le colis. Pour finir, le treuil s'enroule avec le chargement, le dirigeable fait demi-tour et retourne à sa position d'origine. Dans l'idéal, l'intégralité de ces actions doivent se faire sans intervention du groupe.

### 7.2 Modèle d'asservissement

Afin d'asservir le dirigeable avec précision, on découpe l'asservissement en 3 différentes parties :

- Un premier asservissement pour la hauteur
- Un deuxième pour l'angle du dirigeable
- Un troisième pour sa position dans le plan (x,y)

Les trois asservissements sont obtenus en théorie avec des correcteurs PID, dont les parties intégrales et dérivées seront plus ou moins utilisées en pratique en fonction de leurs difficultés de mise en place et des résultats obtenus avec un proportionnel simple. La mesure de hauteur se fait à l'aide du capteur Lidar. L'angle du dirigeable est obtenu à l'aide de la centrale inertuelle. Sa position dans le plan (x,y) est obtenue à l'aide des AprilTags. Tous les capteurs ont été présentés auparavant. Le schéma d'une boucle d'asservissement est donc le suivant :

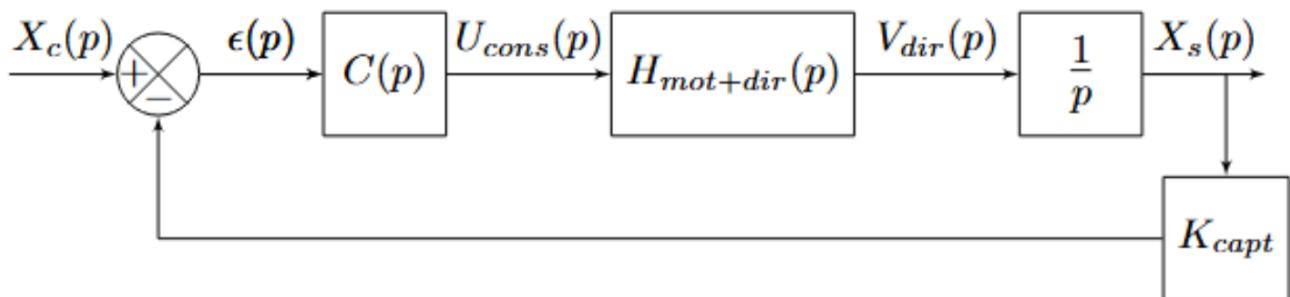


FIGURE 32 – Boucle d'asservissement

On a  $C(p)$  notre correcteur PID et  $K_{capt}$  le gain du capteur utilisé pour l'asservissement voulu.  $X_c$  et  $X_s$  représentent respectivement l'entrée (consigne) et la sortie (valeur mesurée) de la grandeur asservie.

### 7.3 Trajectoire

Une fois les boucles d'asservissement créées, il faut indiquer au dirigeable la position de la cible. Il se déplace alors en autonomie grâce à une boucle "while True" sur python. À chaque itération, les erreurs en hauteur, angulaire et en position dans (x,y) (soit la distance) sont calculées grâce aux différents capteurs.

Le code adapte alors la vitesse du moteur du bas en fonction de la hauteur et des moteurs latéraux en fonction de l'angle du dirigeable. Le dirigeable ne se déplace alors que suivant l'axe z, en translation et en rotation. Si l'angle du dirigeable correspond à l'angle entre la position actuelle

et la position de la cible, la condition de démarrage des moteurs de propulsion avant et arrière est validée. Le dirigeable avance donc en ligne droite vers la cible.

Pour résumer :

- Le dirigeable s'élève à la hauteur voulue et s'oriente vers la cible.
- Le dirigeable avance droit vers la cible.
- S'il n'est plus dans le bon axe, on retourne à la première étape.

## 7.4 Descente du treuil

Une fois le dirigeable statique et dans une zone où la distance avec la cible est considérée comme raisonnable, le treuil peut commencer à descendre. La durée de descente étant prédéterminée, il n'y a pas d'asservissement sur cette partie du dirigeable. Une fois le treuil en position basse, la pince se referme sur le colis (déplacé légèrement par un opérateur afin que la pince puisse bien le transporter) et le treuil remonte pendant le même temps défini plus tôt. Une fois le treuil remonté, le dirigeable fait demi-tour et repart vers le départ de la même façon que pour son premier trajet.

## 7.5 Mise en place pendant la dernière semaine (en cours)

Le code étant rédigé sur python, il faut maintenant l'implémenter sur la carte Raspberry et le tester sur le dirigeable pendant la semaine afin qu'il soit opérationnel pour le défi de vendredi. L'enjeu va être de bien régler ces correcteurs afin d'avoir un système stable et pas trop oscillants. Toutefois, il faut aussi qu'il soit rapide pour gagner la course. L'objectif de cette semaine est donc de réussir à bien adapter les outils théoriques développés pour qu'ils s'intègrent sur le système réel.

## 8 Conclusion

L'objectif était de réaliser un **dirigeable** capable de se déplacer de manière **autonome** pour déposer un **colis** avec une masse limite.

L'objectif de réduction de **masse**, imposée par la capacité du dirigeable, a été vérifiée avec 600.7g au total (total de la masse de tous les sous-systèmes). Ce qui permet au dirigeable de se sustenter à l'aide d'une légère poussée de la part du propulseur vertical.

La cinématique de propulsion s'est révélée, après quelques essais, très efficace pour la commande du dirigeable. Cette **précision** a permis de valider l'approche d'une cible et du dépôt de colis dans une zone de diamètre de 50cm.

## Références

- [1] Photo moteur existant Pulsar 2200KV <http://gmshipmodelling.com/fr/Moteur-sans-balais-Pulsar-Shocky-Pro-2204-2200kv-C9871/>
- [2] Photo moteur sélectionné <https://www.intermodel.fr/moteurs-electriques/12387-as2303-f3p-3d-4d-2300kv-17gr-t-motor-t-motor-brushless-moteur-3d-f3p-2300kv-.html>
- [3] Nouveau variateur sélectionné <https://www.intermodel.fr/controleurs-bec/12179-controleur-16a-f3p-3d4d-t-motor-controleur-3d-f3p-4d-tmotor-16a.html>

- [4] Nouvelle batterie <https://www.conrad.fr/fr/p/reely-pack-de-batterie-lipo-7-4-v-1100-mah-10c-1000000000000000000.html>